

## 瑞利散射多普勒测风激光雷达频率动态跟踪系统

唐磊<sup>1,2</sup>, 吴海滨<sup>2</sup>, 孙东松<sup>3</sup>, 舒志峰<sup>1</sup>, 董吉辉<sup>1</sup>, 王国成<sup>1</sup>, 胡冬冬<sup>1</sup>, 徐文静<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031 ;
2. 安徽大学 物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230031 ;
3. 中国科学技术大学 地球与空间物理学院, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 基于瑞利散射的多普勒测风激光雷达在利用频率差分技术测量风场的过程中, 激光脉冲频率随室温和谐振腔温度变化而产生抖动和漂移, 给系统测量精度带来极大影响。为了解决激光频率长期漂移给风场测量带来的影响, 设计了一种频率实时动态跟踪硬件电路。介绍了该硬件电路的设计思想、关键技术和核心器件的选取, 并利用该硬件电路与米散射测风激光锁频技术进行对比实验。结果表明: 在激光频率漂移较小条件下, 基于瑞利散射测风激光雷达的频率实时跟踪技术可以使激光脉冲频率稳定在设定的测量精度范围之内,  $SD=3.07\text{MHz}$ ; 在激光频率漂移相对较大的条件下,  $SD=6.18\text{MHz}$ , 维持在测量高灵敏度区, 频率相对稳定性得到了很大改善, 提高了锁定信息反馈的实时性, 提高了风场测量精度。

**关键词:** 频率漂移; 激光雷达; 测量精度; 透过率

**中图分类号:** TN958.98      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-2276(2011)06-1049-05

## Dynamic frequency tracking system for Doppler lidar wind measurement based on Rayleigh scattering

Tang Lei<sup>1,2</sup>, Wu Haibin<sup>2</sup>, Sun Dongsong<sup>3</sup>, Shu Zhifeng<sup>1</sup>, Dong Jihui<sup>1</sup>, Wang Guocheng<sup>1</sup>,  
Hu Dongdong<sup>1</sup>, Xu Wenjing<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. School of Physics and Material Sciences, Anhui University, Hefei 230031, China; 3. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The frequency of laser pulses generate jitter and drift with the changing temperature of the room and the resonant cavity of laser in a differential frequency Doppler lidar wind measurement based on Rayleigh scattering. It brings significantly influence on the measuring accuracy during the wind measurement. In order to eliminate the effects, a dynamic frequency real-time tracking system was designed. The principle, key technique and the chosen core devices were introduced, and the comparison experiment between the system and wind lidar

收稿日期: 2010-10-11; 修订日期: 2010-11-23

基金项目: 国家 863 计划

作者简介: 唐磊(1972-), 男, 博士生, 主要从事激光遥感信息控制与处理方面的研究。Email: tanglei\_66@163.com

导师简介: 孙东松(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光遥感方面的研究。Email: dssun@aiofm.ac.cn

based on Mie scattering was done. The experimental results show that it improves the work efficiency of system. With the utility of tracking frequency circuit, laser frequency librated near the midpoint of the region between the peaks of two overlapping edge function at the relative small frequency drift,  $SD=3.07$  MHz, and laser frequency maintained in the region of high sensitivity at the reverse condition,  $SD=6.18$  MHz. The relative stability of laser frequency is greatly improved, and the locked information of laser frequency is fed back in time, so the accuracy of wind measurement is greatly improved as well.

**Key words:** frequency drift; lidar; accuracy of measurement; transmittance

## 0 引言

高精度、高分辨率的全球大气风场观测在气象研究、天气预报、大气环境监测和国防高技术战略/战术武器系统的气象保障、靶场气象条件检测等方面都具有广泛的应用价值。准确及时的风场数据可以提高长期天气预报的准确性、提高对飓风等恶劣天气跟踪及登陆预报的准确性、改进气候模型、促进大气动力学研究、为国防安全提供更好的战场环境预报、为飞机的起飞和着陆以及航空航天飞行器的发射和接收提供安全保障<sup>[1]</sup>。

然而,在风场测量中,激光脉冲频率和标准具频谱相对漂移经常给测量带来较大的误差。尽管采用了种子注入稳频激光器,但对于测风激光雷达还满足不了测量精度要求,目前,国内外通常采用可调谐标准具和软件频率跟随技术来克服激光脉冲频率和标准具频谱相对漂移问题。但从实际运行效果来看,软件跟随技术仍然不能很好地解决风场测量过程中频率相对漂移的实时跟踪问题,而且利用软件跟踪技术往往造成控制系统过于复杂,影响其运行效率。

据此,文中介绍了一种可编程硬件动态频率跟踪系统,应用于多普勒测风激光雷达,以解决激光脉冲频率和标准具频谱相对漂移带来的测量误差,提高风场测量精度。

## 1 基本原理

基于双边缘技术的多普勒测风激光雷达,其基本原理是利用边缘技术测量激光后向散射信号通过标准具的透过率变化,当激光后向散射信号通过两个标准具时,由于多普勒效应,信号的频谱相对发射激光频率发生移动,两个标准具的输出信号产生差异,根据其大小可以反演出频率移动的量,即多普勒频率<sup>[2-3]</sup>。

如图 1 所示,测量时发射激光频率  $\nu_0$  锁定在标准具透过率曲线 Locking Filter 的半高处,若大气后

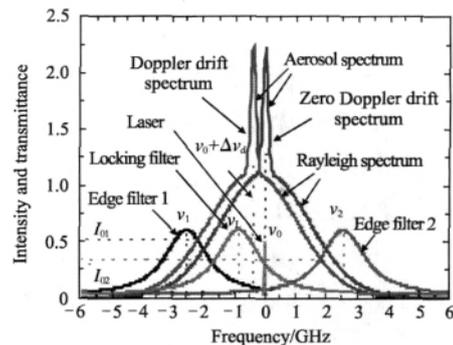


图 1 三通道标准具和瑞利后向散射频谱

Fig.1 Rayleigh backscattering spectrum and three channel etalon

向散射信号没有发生多普勒频移,则两边缘通道 Edge filter1 和 Edge filter2 输出光强相同,如图中右侧散射谱线所示;若大气后向散射信号由于风场作用产生了多普勒频移,则两边缘通道 Edge filter1 和 Edge filter2 输出光强不同,一个增大,一个减小,如图中左侧散射谱线所示。通过这两个边缘通道后向散射信号的比值可以反演出后向散射光的频率,而多普勒频移为后向散射光的频率与激光发射频率的差值。后向散射信号与两透过率曲线 Edge filter1、Edge filter2 的交点分别为  $I_{01}$  和  $I_{02}$ ,透过率之比  $R$  是多普勒频率的响应函数, $T$  是大气温度。

$$R(\Delta\nu, T) = \frac{I_{01}}{I_{02}} = \frac{T_1(\nu_1 + \Delta\nu_d)}{T_2(\nu_2 + \Delta\nu_d)} \quad (1)$$

由模拟计算可得频率响应函数曲线如图 2 所示,由图可见多普勒频率是  $R$  的单值函数,根据  $R$  的值即可确定多普勒频移<sup>[4]</sup>,再根据公式(2)反演出风速。

$$\nu_r = \frac{R(\nu_0 + \Delta\nu_d, T) - R(\nu_0, T)}{R(\nu_0, T)} \cdot \frac{1}{\theta_\nu} \quad (2)$$

式中: $\nu_r$  是径向风速; $\Delta\nu_d$  是多普勒频率; $\theta_\nu = \frac{2}{\lambda R(\nu)} \frac{dR(\nu)}{d\nu}$

是速度灵敏度;  $\lambda$  是激光波长。

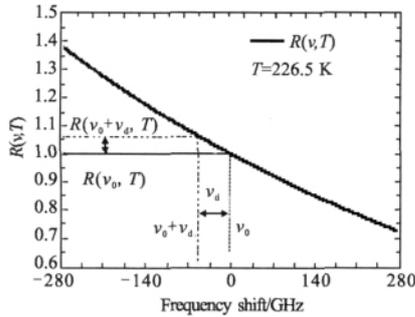


图 2 多普勒频率的响应函数

Fig.2 Response function of Doppler frequency drift

实际上,激光器在工作过程中,室温和谐振腔的温度逐渐改变,激光脉冲频率随温度发生抖动和漂移,导致激光发射频率偏离锁定通道透过率半高位置,使激光发射频率偏离测量的高灵敏度区域,造成测量的速度灵敏度降低和动态范围减小,测量误差增大,有时甚至使发射激光频率跑出测量动态范围之外而无法进行测量<sup>[5]</sup>。因此,测量过程中要对激光频率进行实时跟踪并锁定在锁定通道透过率曲线半高处,提高测量精度。

### 2 系统设计与器件选取

基于上述分析,设计了一种动态频率跟踪系统,通过硬件电路调节双 Fabry-Perot 标准具频谱,使标准具频谱跟随发射激光频率的变化而移动,使得发射激光频率始终处于锁定通道透过率曲线半高点附近,即让标准具频谱始终跟踪并锁定发射激光频率,抑制频率漂移,提高风场测量精度<sup>[6-7]</sup>。

系统设计中需要解决的关键技术有 3 个方面:

- (1) 激光脉冲信号的捕捉 由于激光脉冲宽度只有 8~10 ns,要求采集频率非常高,同时 PMT 输出的光纤后向散射信号又非常弱,需要克服高频和电噪声所带来的影响。
- (2) 数据运算量大 发射激光脉冲频率为 30 Hz,标准具透过率是信号通道和能量通道之比<sup>[8]</sup>,需要使用浮点运算,且每次采集到的数据要求能够及时处理并判断输出。
- (3) 系统要求的控制信号多 既要与激光器触发同步,又要与上位机控制系统进行通信,还要能及时准确输出控制信号,同时又要求计算机能够准确

获取标准具每次调整量的大小及位置<sup>[9]</sup>。

针对上述技术要求,硬件选择控制功能好的单片机和运算能力强的大规模现场可编程逻辑器件 FPGA 的组合为核心,关键的前端采集部分使用高性能、低噪声的模数转换芯片 AD9248,输出部分选用 AD669 数模转换芯片。系统结构如图 3 所示:空心箭头表示信号流路径,细线加箭头表示控制信号,点线表示光路,虚线表示标准具频谱跟踪激光器频率漂移,左侧长线加箭头表示上位机获取标准具调节信息。

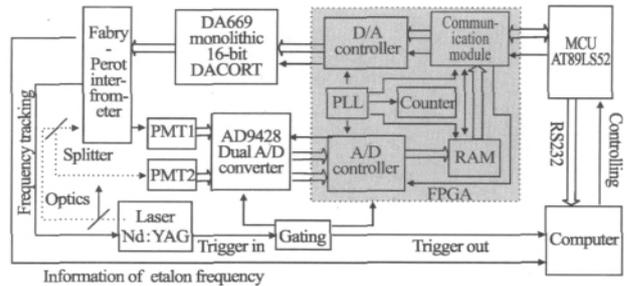


图 3 动态频率跟踪系统结构示意图

Fig.3 Block diagram of dynamic frequency tracking system

### 3 实验与对比结果分析

利用该硬件电路系统对瑞利散射多普勒测风激光雷达进行实验,并与米散射测风激光雷达软件锁频技术进行对比。

首先,关键的信号采集部分。激光器发射的激光经分束片分出一小部分进入锁定通道,再由图 3 中 Splitter 分出 77% 经过标准具后进入 PMT1, 23% 直接进入 PMT2, 输出信号如图 4 所示。水平短线表示激光器输入同步触发信号,下部曲线是锁定通道信号,上部曲线是锁定通道能量,中间水平长线表示信号与能量之比,左端密集黑点表示信号溢出,中间水平

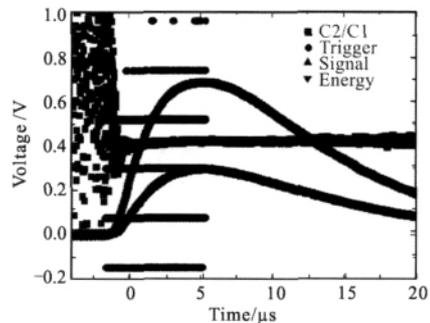


图 4 AD 信号采集示意图

Fig.4 Schematic of AD signal collected

部分表示信号最稳定部分,可用于计算透过率,水平长线上下变化即表示透过率发生改变。

其次,透过率计算。改变标准具位置进行采集并计算结果,选取中间最稳定的 2~10 μs 进行透过率计算,并考虑到单脉冲采集偶然性较大,信噪比低,容易产生较大误差,因此,透过率计算时,累计 7 s 钟采集 210 个脉冲输出一次透过率。标准具位置不同锁定通道信号与能量值也会有所变化,如图 5 所

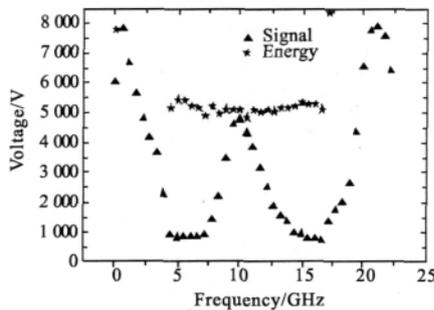


图 5 选取的有效累加信号

Fig.5 Effective accumulated signal

示,三角形点表示信号,星形点表示能量,信号变化大,能量比较稳定。信号与能量之比即为透过率,输出结果如图 6 所示。由图可见透过率峰值位置、上升沿、下降沿非常明显,完全符合测风激光雷达设计指标,包括透过率最小值设计指标 6% 以下和关键的半高全宽 1.7 GHz 也满足设计要求。

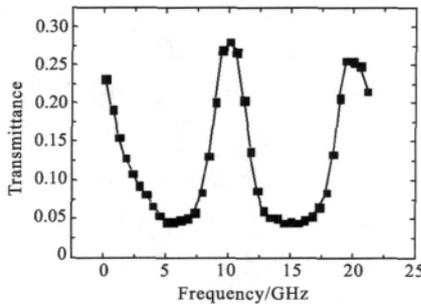


图 6 透过率输出结果

Fig.6 Result of transmission calculating

最后,将测量结果与米散射测风激光雷达进行对比。笔者研究室早期研制的国内首台米散射测风激光雷达采用国际上通用的相对比较容易实现的软件锁频技术,没有单独的锁定通道,测量开始前发射激光一段时间,由分束片分出一小部分参考光进入接收机,用于检测激光频率,检测出激光频率后,调整标准具到两透过率曲线交叉点位置并锁定,测量

过程中不再进行锁定,直到一个方向测量结束,再调整标准具位置再次锁定,结构如图 7 所示。与米散射激光雷达相比,瑞利散射测风激光雷达增加了单独的锁频通道,使用硬件锁频,脱离系统控制软件,测量过程中实时调整标准具频谱跟踪激光频率漂移,既简化了系统控制软件又提高了频率跟踪的实时性,对比结果如图 8、图 9 所示。

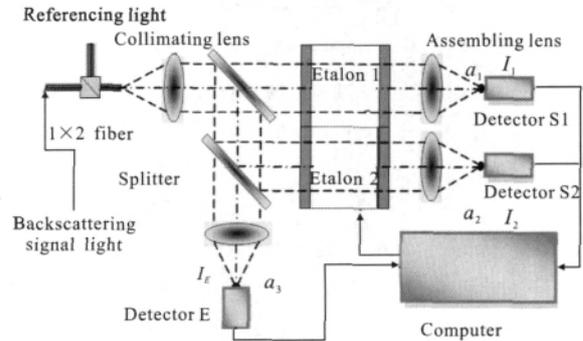


图 7 米散射锁频示意图

Fig.7 Schematic of frequency tracking based on Mie scattering

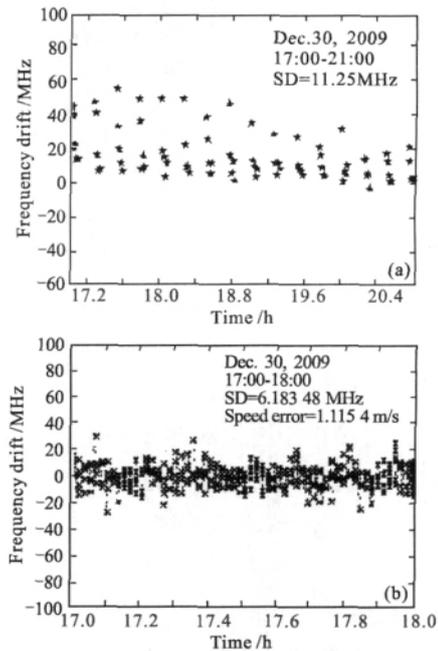


图 8 在激光频率漂移相对较大条件下的频率跟踪

Fig.8 Frequency tracking of laser at the relative big frequency drift

图 8 所示为下午至晚上这段时间,温差变化较大,激光频率漂移相对较大。图 8(a)为米散射锁频技术,图 8(b)为瑞利散射锁频技术。由图 8(a)可见:米散射锁频技术锁定次数明显少于瑞利散射锁频技术;每两次测量间隔之间,激光频率都会存在明显的跳变,测量开始前调整到透过率半腰处之后,随着测

量的深入频率又开始逐渐漂移;相邻两个测量方向之间的频率漂移也很明显,这是影响测量精度的主要原因,仅统计4个测量方向之间的激光频率漂移,SD=11.25 MHz。相比于米散射锁频技术,瑞利散射锁频技术测量过程中能够实时检测激光频率漂移情况,如果漂移超出设定的精度范围,就调整标准具频谱跟踪激光频率漂移,跟踪结果如图8(b)所示,SD=6.183 48 MHz,相比于 $\pm 300$  MHz测量动态范围,可以确保测量始终处于高灵敏度区域,提高了测量精度。

图9所示是凌晨时分,温差变化不大,激光频率相对稳定。图9(a)是米散射锁频技术,图9(b)是瑞利散射锁频技术。由图可见:米散射锁频技术在零点附近跳变,测量间隔之间的频率漂移相对减小,SD=3.562 4 MHz,由此引起的速度测量误差为1.1 m/s;而瑞利散射锁频技术基本稳定在设定精度的上限与下限之间,随着测量的深入,温度略有变化,使激光频率有微小波动,即从设定的上限位置变到下限位置或从下限位置变到上限位置,如图9(b)中所示,SD=3.07 MHz,由此引起的速度测量误差可忽略不计,统计的结果仅为0.56 m/s。

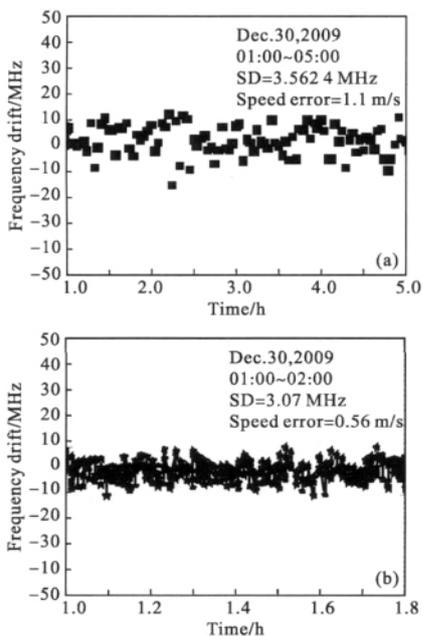


图9 在激光频率漂移相对较小条件下的频率跟踪  
Fig.9 Frequency tracking of laser at the relative small frequency drift

由实验和对比结果可以看出,瑞利散射锁频技术

在原有米散射锁频技术的基础上增加了专门的锁定通道,脱离了系统控制软件,实现了激光频率漂移的实时跟踪,简化了系统控制软件,提高了测量精度。

## 4 结 论

文中介绍了基于瑞利散射的多普勒测风激光雷达基本原理,分析了风场探测过程中由于激光脉冲频率漂移给探测精度带来的影响。针对激光频率长期漂移对测量精度的影响,设计了一种可编程动态频率跟踪系统。论述了系统设计思想、关键技术及核心器件的选取,并利用该锁频技术与米散射激光雷达锁频技术进行实验对比,结果表明:瑞利散射测风激光雷达锁频技术可以实现频率漂移的实时跟踪,解决了激光频率长期漂移引起的风速测量误差,提高了风场测量精度,简化了系统控制软件。

## 参考文献:

- [1] Xia Haiyun, Sun Dongsong, Yang Yuanhong, et al. Fabry-Perot interferometer based Mie Doppler lidar for low tropospheric wind observation[J]. *Applied Optics*, 2007, 46 (29): 7120-7131.
- [2] Sun Dongsong, Liu Dong, Xia Haiyun, et al. Low tropospheric wind profile from a 1.06  $\mu\text{m}$  Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 52-56. (in Chinese)  
孙东松, 刘东, 夏海云, 等. 1.06  $\mu\text{m}$  多普勒激光雷达的低对流层风场测量[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36 (1): 52-56.
- [3] Flesia C, Korb C L. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Appl Opt*, 1999, 38: 432-440.
- [4] Gentry B M, Korb C L. Edge technique for high accuracy Doppler velocimetry[J]. *Appl Opt*, 1994, 33(24): 5770-5777.
- [5] Gentry B M, Chen H L, Li S X. Wind measurements with 355-nm molecular Doppler lidar[J]. *Optics Letters*, 2000, 25 (12): 1231-1233.
- [6] Mckay J A. Modeling of direct detection Doppler wind lidar. II. The fringe imaging technique [J]. *Appl Opt*, 1998, 37 (27): 6487-6493.
- [7] Mckay J A. Modeling of direct detection Doppler wind lidar. I. The edge technique[J]. *Appl Opt*, 1998, 37(27): 6480-6486.
- [8] Mckay J A. Fabry-Perot etalon aperture requirements for direct detection Doppler wind lidar from earth orbit [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(27): 6480-6486.
- [9] Shen Fahua, Cha Hyunki, Sun Dongsong, et al. Low tropospheric wind measurement with Mie Doppler lidar [J]. *Optical Review*, 2008, 15(4): 204-209.