# 利用 Fabry-Perot 标准具的米散射测风激光雷达接收机

李 琛[1],舒志峰[1],夏海云[2],孙东松[2],周广超[3],汪建业[1]

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气光学中心,安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院,安徽 合肥 230026;
3. 大庆油田新工程材料有限公司,黑龙江 大庆 166521)

**摘 要**:介绍了基于米散射多普勒测风激光雷达的基本原理。测风激光雷达系统一般由发射系统、接收系统、信号发射接收光学系统、控制系统组成,其中接收系统在整个系统中最重要,起到信号鉴频的作用。基于测量误差最小和实际加工工艺的考虑,设计了标准具的参数和米散射测风激光雷达接收机的结构,并且把该接收机用于米散射测风激光雷达系统中并进行了标准具透过率的测量,用 Pseudo-Voigt 函数拟合出标准具的各个参数,与理论设计相差在 5%以内。同时进行了风廓线的初步测量,与风廓线雷达 Airda16000 进行了比对,两者符合很好。

**关键词**:Fabry-Perot 标准具; 测风激光雷达; 接收机; 米散射
**中图分类号**:TN958.98 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2012)01-0107-05

# Mie wind lidar receiver based on Fabry-Perot etalon

Li Chen[1], Shu Zhifeng[1], Xia Haiyun[2], Sun Dongsong[2], Zhou Guangchao[3], Wang Jianye[1]

(1. Center of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. The Limited Company of Daqing New Engineering Materials, Daqing 166521, China)

**Abstract:** The principle of Doppler wind lidar based on Mie backscattering was introduced. The wind lidar was composed of transmitting system, receiving system, transceiving system and controlling system. The most important of these systems is receiving system which was usd for a frequency discriminator. The parameters of Fabry-perot etalon were designed while the wind measure′s error was least and the mechanical technics can be realized. The structure of Mie Doppler wind lidar receiver was designed. The transmittance of etalon was measured and the parameters of etalon were fitted by Pseudo-Voigt function. The difference between the measured etalon′s parameters and designed parameters was lower than 5%. This receiver be used for the wind lidar system and the horizon wind velocity and direction were obtained. The result of wind profile measured by the system is in accordance with the wind profile measured by Airda16000 approximately.

**Key words:** Fabry-Perot etalon; wind lidar; receiver; Mie scattering

**收稿日期**:2011-05-05; **修订日期**:2011-06-03
**基金项目**:国家自然科学基金(41174130)
**作者简介**:李琛(1977-),男,博士生,主要从事激光雷达方面的研究。Email:lichen@mail.ie.ac.cn
**导师简介**:汪建业(1966-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事大气探测中的光电子学方面的研究。Email:jywang@aiofm.ac.cn

## 0 引 言

大气风场的测量对研究气候变化、数值天气预报和建立准确的大气模型有重要的意义。目前,对大气风场测量的手段主要有声雷达、微波雷达、超声风速仪、无线电探空仪和激光雷达等。测风激光雷达技术是精确测风的主要手段，其频率检测主要有边缘技术和条纹成像技术，两种技术都利用 Fabry-Perot (F-P)标准具作为鉴频器。条纹技术是利用 F-P 标准具产生环形条纹，然后利用圆转为线的锥形光学系统(CLIO)将环形条纹转变为线条纹,再用 CCD 探测。还有利用 Fizeau 干涉仪直接产生线条纹再用线列探测器探测条纹移动。边缘技术是利用 F-P 标准具的陡峭边缘，后向散射的激光因多普勒效应而产生频率移动,使得发射激光处的透过率值发生变化,造成强度的变化，利用探测器探测后向散射光强度从而反演出多普勒频率。文中采用边缘技术原理来设计米散射测风激光雷达接收机。

## 1 设计原理

### 1.1 米散射测风激光雷达基本原理

基于米散射测风激光雷达的测量原理是利用发射激光在大气中粒子的后向散射信号反演出激光的多普勒频率,从而得到径向风速,进而利用多波束原理得到水平风速和风向。如图 1 所示,利用频谱分布相同而中心频率不同的两个 F-P 标准具作为边缘滤波器,两个标准具的透过率约在半高宽处相交。若将发射激光的频率锁定在它们的交叉点处，并假定输入光强相同,则两个标准具的输出光强相同。发射激光经过望远镜和扫描系统入射到大气中，若遇到有平均运动速度(即风速)的大气气溶胶和分子,将产生多普勒频移。被望远镜接收的部分后向散射光经过准直系统后,再被均分入射到标准具上,这时两个标准具的输出光强将有所不同（图 1 中阴影部分面积),根据这两个光强的比值变化可以确定多普勒频移量,根据多普勒原理即公式(1)可以得到径向风速。然后利用四波束扫描合成后可以得到水平风速和风向[1-3]。

$$V=\frac{c}{2v_0}\Delta v_d \tag{1}$$

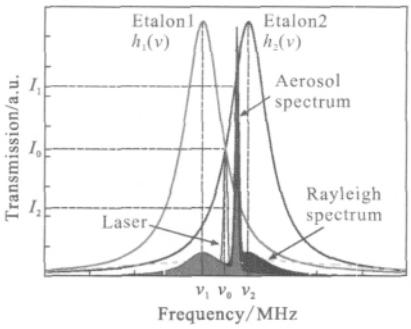


图 1 基于 F-P 标准具的米散射多普勒频率测量原理

Fig.1 Measure principle of Doppler frequency shift of Mie backscattering based on F-P etalon

### 1.2 米散射测风激光雷达接收机的关键参数选取

米散射测风激光雷达探测的目标是气溶胶粒子，径向风速测量的动态范围为±50 m/s，文中的接收机服务于测风激光雷达系统激光器的工作波长是 1 064 nm。在整个测风激光雷达中,接收机是重要组成部分,其原理如图 2 所示[4-6]。

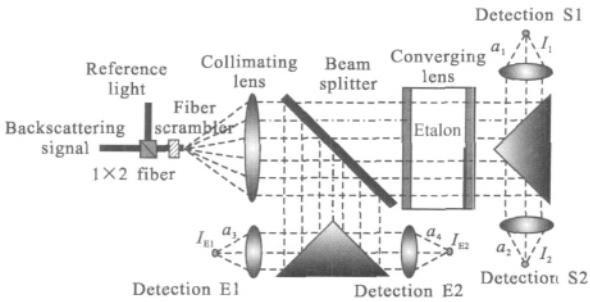


图 2 米散射测风激光雷达接收机原理图

Fig.2 Principle figure of Mie backscattering wind lidar

接收机中最关键的器件是标准具，其参数的选取是由风速测量误差决定的，原则是风速测量误差达到最小，但设计时要结合实际进行。径向风速 $V_r$ 的动态范围为±50 m/s,相应地要求标准具中心频谱间隔为：

$$v_2-v_1=2\times 2V_r/\lambda=188\ \text{MHz} \tag{2}$$

由于在标准具峰值附近的速度灵敏度很小,故一般取略大的动态范围，两个 F-P 标准具的中心频谱间隔定为 200 MHz。米散射测风激光雷达利用气溶胶后向散射信号进行多普勒频率测量，此时的分子后向散射信号需当作噪声加以扣除。在风速反演的算法中扣除的是标准具一个自由谱范围内接收到的分子散射信号，所以为了不让分子信号进入标准具透过率的邻级而导致漏扣，要求后向分子散射谱

集中在标准具的一个自由谱范围内。温度取 300 K,根据 $\Delta v_r=(8kT/M\lambda^2)^{1/2}$(式中:$\lambda$ 为激光波长;$k$ 为玻耳兹曼常数;$T$ 为大气分子的温度;$M$ 为分子质量)及关系式 $\delta_r=\Delta v_r/2^{1/2}$,得到瑞利高斯散射谱的方差 $\delta_r$ 约为 0.55 GHz。对于瑞利高斯谱线,在 $-3\delta_r$~$3\delta_r$ 范围的积分面积为总面积的 99.73 %,即 99.73 %的瑞利信号集中在 $6\delta_r$ 的频率范围内。再考虑到 188 MHz 的频率测量动态范围,要求标准具最小的自由谱范围 $v_{FSR}=6\delta_r+188\ \text{MHz}\approx3.5\ \text{GHz}$。标准具的透过率带宽 $\Delta v_{1/2}=v_{FSR}/F_e$,式中:$F_e$ 为有效精细度,当标准具的透过率带宽优化确定之后,$v_{FSR}$ 增大,要求 $F_e$ 也增大,而 $F_e$ 越大,标准具越难加工,一般 $F_e$ 不超过 30,所以 $v_{FSR}$ 应尽量取小。综合以上两点,标准具自由谱范围取 3.5 GHz。同时,从测量风速误差最小的要求以及实际入射光束发散角的影响等因素考虑,得到标准具的整体参数如表 1 所示。对于标准具的口径的选取,通常其取值越大越好,但是口径越大,价格越贵。考虑到光学耦合效率,标准具口径需要满足基本的光学传递条件 $\Omega_e\cdot A_e\geqslant\Omega_f\cdot A_f$,式中:$\Omega_e$、$\Omega_f$ 分别为标准具和光纤的接收立体角;$A_e$、$A_f$ 分别为标准具和光纤的通光面积,再结合发散角的要求以及满足项目本身测量指标的情况设计口径参数。

**表 1 标准具参数**

**Tab.1 Parameters of etalon**

| Parameter | Value |
|---|---|
| Wavelength/ nm | 1 064 |
| Free spectral rang/ GHz | 3.5 |
| FWHM/ MHz | 170 |
| Edge channel separation/ MHz | 200 |
| Peak transmission/ % | ≥60 |
| Cavity spacing/ mm | 42.857 |
| Step height/ nm | 30.4 |
| Diameter/ mm | 50 |
| Finesse | 21 |

## 2 结构实现

米散射测风激光雷达系统可分为 4 个子系统:发射系统、接收系统、发射接收光学系统和控制系统。其中接收系统是整个系统的关键,承担着鉴频任务,核心器件是一个双通道 F-P 标准具,其次还有光学镜片、探测器、机械结构、电源、门控电路等。它们被合理地安置在 482 mm×178 mm×650 mm 的 19 in(1 in=2.54 cm)的标准机箱里,如图 3、图 4 所示[7-8]。

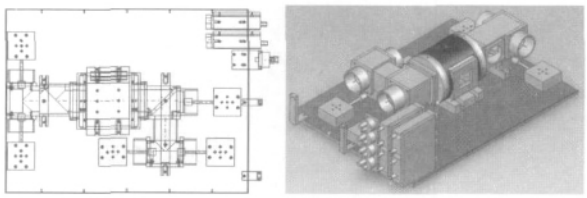

图 3 接收机机械结构原理图

Fig.3 Principle of receiver's mechanical structure

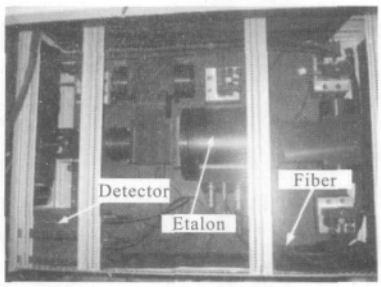


图 4 接收机实物图

Fig.4 Actual figure of receiver

进入接收机中的光信号先由准直镜组准直,出射的平行光经过带宽为 0.5 nm@1 064 nm 的干涉滤光片后,被分束比为 $R/T$=20/80 的分束片分束。透射光入射到双 F-P 标准具的两个通道,出来的光信号由分光棱镜将两个通道的信号分开,再分别用 PerkinElmer 公司生产的两个 Si:APD 光子计数探测器接收;反射光束由分光棱镜从中间分成两束,再用两个 Si:APD 光子计数探测器接收,用于双 F-P 标准具两个通道对应能量的探测。光子探测器输出的信号进入到光子计数卡,再由计算机进行数据处理、存储以及风速反演结果显示。

## 3 实验结果

调试好的激光雷达接收机的透过率测量是通过系统运行控制软件的 CS100 控制子程序对腔长大小进行控制,从而得到频率与透过率的对应曲线。文中的接收机采用波长 1 064 nm 的连续激光,标准具步长 5 步采集一个数据点,得到了 4 天的数据,利用 Pseudo-Voigt 函数对数据进行透过率曲线的拟合,得到的透过率曲线如图 5 所示。这期间未曾对接收机光路进行调整,从图中可以看出,标准具透过率曲线

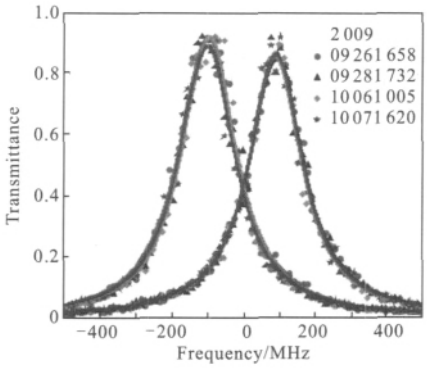


图 5 标准具透过率曲线

Fig.5 Measure transmittances of etalon

稳定,说明此接收机性能稳定,对 4 天所测得的透过率数据拟合得到标准具的平均参数见表 2。可以看出：实际测量的标准具参数值除了峰值透过率提高外,其他参数和理论设计的参数值相近,两者出入在 5%以内。标准具峰值透过率的提高使得标准具的测量灵敏度增加,进而风速测量精度得到提高。在进行风速测量时要知道参考光的频率，并且根据此频率得到的透过率值反馈给标准具控制系统，使得标准具腔长能够移动，从而消除因环境和激光器本身原因造成的激光器频率偏移，为了不使参考光和大气后向散射信号产生混淆，提取参考光的散射光纤采用 200 m 的裸光纤，用于对大气回波信号延时的光纤采用 400 m 的裸光纤。这样,参考光被展成 2 μs 的准连续信号,而大气回波信号正好被延时 2 μs,两者不会相互干扰。图 4 中未显示裸光纤,它们被安置在接收机之外。

表 2 标准具测量参数

Tab.2 Measure parameters of etalon

| Parameter | Value | Difference |
|---|---|---|
| Etalon 1 FWHM/ MHz | 174.94 | 2.9% |
| Etalon 2 FWHM/ MHz | 177.77 | 4.6% |
| Edge channel separation/ MHz | 190.44 | 4.8% |
| Etalon 1 peak transmission | 92% | – |
| Etalon 2 peak transmission | 85% | – |

2009 年 10 月中旬,笔者利用接收机在米散射测风激光雷达系统中进行了风廓线的测量，测风系统的参数如表 3 所示，同时与风廓线雷达进行了比对，如图 6 所示。从图中可以看出:两个雷达所测得的水平风速的大小和风向符合很好，个别地方有微小出入是因为两个雷达系统本身的系统误差所致，从而可以说明文中的接收机可以用于米散射测风激光雷达系统对风速的测量。

表 3 系统技术参数

Tab.3 System parmeter of DWL

| System parameter | Value |
|---|---|
| Nd:YAG wavelength/ nm | 1 064 |
| Pulse energy/ mJ·pulse$^{-1}$ | 200 |
| Repetition/ Hz | 50 |
| Pulse width/ ns | 7–9 |
| Laser linewidth/ MHz | 90 |
| Telescope-scanner aperture/ m | 30 |
| Receiver full FOV/ mrad | 0.15 |
| Zenith angle/ (°) | 45 |

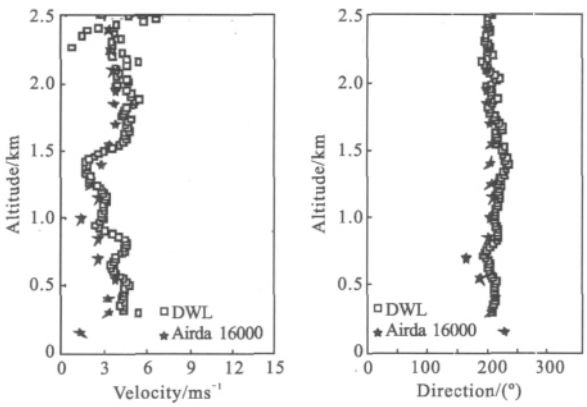


图 6 对比的风速和风向

Fig.6 Comparison of wind velocity and direction

## 4 结 论

光学接收机是测风激光雷达最核心的部件,它的好坏直接影响测量的准确性。文中首先讲述了基本的测风原理，从测量精度最小原理结合实际工艺条件出发，设计出接收机核心部件标准具的理论参数,以及按照此标准具所组合的光学机械结构。接着利用接收机对透过率进行了测量，用 Pseudo-Voigt 函数拟合了标准具的各个参数。最后把接收机运用到米散射测风激光雷达系统中进行了水平风速和风向的测量,且与风廓线雷达进行了比对,二者符合很

好。故文中接收机可以用于基于米散射的测风激光雷达系统中进行风速的测量。

## 参考文献:


[1] Souprayen C, Garnier A, Hertzog A, et al. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. I. instrumental setup, validation and first climatological results [J]. ***Appl Opt***, 1999, 38(12): 2410–2421.

[2] Laurence Korb C, Gentry Bruce M, Weng Chi Y. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind[J]. ***Appl Opt***, 1992, 31(21): 4202–4213.

[3] Cristina Flesia, Laurence Korb C. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measure[J]. ***Appl Opt***, 1999, 38(3): 432–440.

[4] Wang Bangxin, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing, et al. Analysis of data processing method for Doppler wind lidar [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2007, 36(3): 373–376. (in Chinese)
王邦新, 孙东松, 钟志庆, 等. 多普勒测风激光雷达数据处理方法分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 373–376.

[5] Shu Zhifeng, Tang Lei, Wang Guocheng, et al. Application of triple Fabry-Perot etalon for Rayleigh wind lidar [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(8): 1474–1480. (in Chinese)
舒志峰, 唐磊, 王国成, 等. 三通道 Fabry-Perot 标准具在瑞利测风激光雷达中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1474–1480.

[6] Sun Dongsong, Yang Zhao, Xue Guogang. Performance analysis of direct detection Doppler lidar for wind measurement [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2003, 32 (2): 115–117. (in Chinese)
孙东松, 杨昭, 薛国刚. 直接探测测风激光雷达的性能分析[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(2): 115–117.

[7] Sun Dongsong, Zhong Zhiqing, Zhou Jun, et al. Accuracy analysis of the fabry-perot etalon based Doppler wind lidar [J]. ***Optical Review***, 2005, 12(5): 209–414.

[8] Xia Haiyun, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing, et al. Design of verifying attachment for calibration of wind lidar[J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2006, 33(10): 1412–1416. (in Chinese)
夏海云, 孙东松, 钟志庆, 等. 应用于测风激光雷达的多普勒校准仪[J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1412–1416.


**下期预览**

# 大气对红外偏振成像系统的影响


邹晓风,王　霞,金伟其,陈伟力,陈振跃

(北京理工大学 光电学院,北京 100081)



摘　要:红外偏振成像系统探测的是某个特定偏振方向上的目标和背景辐射强度,有必要对不同目标的偏振特性及偏振辐射大气传输进行研究。首先采用双向反射分布函数对反射辐射偏振特性进行分析,推导出反射辐射偏振度的一般表达式。根据表达式模拟了目标的物理特征对反射偏振特性的影响。随后利用 MODTRAN 软件在典型大气条件下对红外波段的大气吸收以及程辐射进行了建模和计算。大气中的悬浮颗粒对目标的红外辐射进行散射,场景的偏振度随传输距离衰减。对目标反射辐射偏振特性的仿真结果与实测数据基本吻合,验证了理论的正确性。考虑大气对偏振辐射传输的影响使得计算结果更加合理和准确。