

对基于 Fizeau 干涉仪的测风激光雷达的研究

沈法华^{1,2}, 孙东松², 陈敏¹, 夏海云¹, 董晶晶², 王邦新², 钟志庆², 周小林²

(1. 苏州大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006;

2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:介绍了基于 Fizeau 干涉仪测风激光雷达的系统结构。在已有的系统参数下,对探测器测量的频率范围和 Fizeau 楔角作了优化,得出的系统误差在 3 km 处小于 0.17 m/s。讨论了不同的数据反演方法。采用 Voigt 拟合法对用 Monte-Carlo 方法模拟的信号进行了多次处理,反演出的风速和实际值相差很小,标准偏差和用最小二乘拟合方法的系统误差公式值相符。表明用 Voigt 拟合方法反演风速是可行的,尤其在大风速情况下,其优势明显。在 3 km 处,当 $K=0.1$ 时,探测器的盲区存在将产生约 0.01 m/s 的测量误差。

关键词: Fizeau 干涉仪; 风速; 激光雷达; 米散射**中图分类号:** TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2006)06-0691-05

Wind lidar based on Fizeau interferometer

SHEN Fa-hua^{1,2}, SUN Dong-song², CHEN Min¹, XIA Hai-yun¹, DONG Jing-jing²,
WANG Bang-xin², ZHONG Zhi-qing², ZHOU Xiao-lin²

(1. Department of Physics, Soochow University, Suzhou 215006, China;

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

Abstract: The system of wind lidar based on Fizeau interferometer is introduced. Frequency range of detector measuring and Fizeau wedge angle are optimized. At altitude of 3 km, the system error of radial wind is below 0.17 m/s. Several data processing methods are discussed. Voigt fitting method is used to deal with signal perturbed with random noise simulated by Monte-Carlo technique. The calculated error is small and the standard deviation agrees well with the value calculated by the formula of system error for least square fitting. The result shows that the use of Voigt fitting method to retrieve wind is feasible, its advantage is obvious especially when wind velocity is large. When $K=0.1$, the wind error due to dead space of detector is about 0.01 m/s at altitude of 3 km.

Key words: Fizeau interferometer; Wind velocity; Lidar; Mie scattering

0 引言

风场分布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具有很重要的意义。多普勒激光雷达是目前精确测量风速的主要手段。其频率检测主要有边缘技术(双边缘技术)^[1]和条纹成像^[2-4]技术。

收稿日期: 2006-01-15; 修订日期: 2006-02-10

基金项目: 中国科学院百人计划资助项目(202032403130); 中国科学院知识创新工程资助项目(CX0201)

作者简介: 沈法华(1981-), 男, 江苏盐城人, 硕士生, 主要从事多普勒测风激光雷达的研究。Email: sfh81914@tom.com

因为边缘技术易受瑞利散射背景的影响,对基于气溶胶米散射信号测风激光雷达(如对边界层风速的探测),条纹技术具有一定的优势。以前普遍采用的条纹技术是基于 F-P 标准具产生的环形条纹,它的缺点是和已有的线型像素探测器(如 CCD)不匹配。一种解决办法是专门为此设计一种环状阴极倍增管,但其量子效率很低^[5];另一种解决办法是利用复杂的圆转变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^[6]。还有利用全息技术将环状条纹转变为点阵的。而 Fizeau 干涉仪可以直接产生线条纹以利于采用线列探测器直接探测条纹移动。基于 Fizeau 干涉仪的测风激光雷达 ESA 已研究设计过。在已有的基于双边缘技术测风激光雷达设备的条件下,研究设计了基于 Fizeau 干涉仪的测风激光雷达。

1 系统结构

基于 Fizeau 干涉仪测风激光雷达系统结构如图 1 所示。发射机采用 Continuum 公司的注入锁定 Nd:YAG 激光器,波长为 1 064 nm 的激光束经过扩束镜通过扫描反射镜指向大气探测区域。发射激光分出一部分作为参考光,减小短期激光频率漂移以及环境对干涉仪的影响。大气散射信号经过扫描和望远镜接收系统耦合到光纤一端,光纤的另一端输出光束经过组合透镜耦合到 Fizeau 干涉仪。光纤有两个作用,一是能很好地将光信号传送到光学平台上的复杂光路中;另一个是使信号光强均匀化以减小光强不均匀产生的系统测量误差。利用一球面凸透镜和一柱面凸透镜将像会聚到 16 元线列探测器。探测器信号输出经过采集卡送入计算机进行数据处理。发射的激光束被大气中的气溶胶粒子和大气分子散射,其中一小部分散射光沿发射方向返回激光雷达接收望远镜。由于风的作用或大气粒子的运动,接收的光信号包含气溶胶和分子散射,它们的频谱宽度不同,但是都产生相对于发射激光频率的多普勒频移。当激光测量对象有一径向速度 V_r 时,频率变化为 $\Delta\nu=2V_r/\lambda$,从而引起条纹中心的移动。

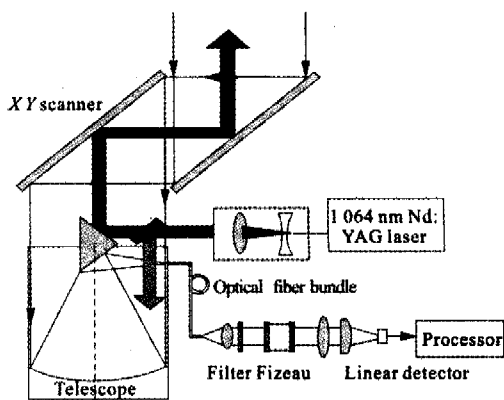


图 1 直接接收激光多普勒雷达系统
Fig.1 Diagram of direct detection Doppler lidar for wind measurement

表 1 直接接收激光雷达系统参数

Tab.1 Parameters of direct detection lidar

	Parameters	Value
System	Velocity dynamic range/ ms^{-1}	± 30 (los)
	Vertical resolution $\Delta r/\text{m}$	30
	Integration time $\Delta t/\text{s}$	5
	Zenith angle $\Phi/(\text{°})$	45
	Wavelength/ nm	1 064
Transmitter	Linewidth/ MHz	80
	PRF ϵ/Hz	50
	Energy $E_0/\text{mJ}\cdot\text{pulse}^{-1}$	170
	Telescope diameter/ mm	300
Receiver	Field of view/ mrad	0.15
	Optical efficiency $\eta_0/\%$	5
	Detector efficiency $\eta/\%$	80
	Number of channels	16
Fizeau interferometer	Range imaging on detector $\Delta\nu_r/\text{MHz}$	300.8
	FSR/ GHz	3.5
	Effective finesse	21
	Fizeau diameter $\Delta y/\text{mm}$	20
	Wedge angle/ μrad	2.29

2 理论分析

单色平行光入射到 Fizeau 干涉仪时,在贴近干涉仪平板后表面透过率函数为:

$$T=(1-A-R)^2 \left| \sum_{n=0}^N R^n e^{i \frac{2\pi}{c} 2vLP_n} \right|^2$$

其中:
$$P_n = \frac{\sin\theta - \sin(\theta - 2n\alpha)}{2\tan\alpha} \quad (1)$$

式中: A 为光束在通过干涉仪时的光损耗; R 为干涉仪对应波长的反射率; N 为光在两平板之间的反射次数; α 为两干涉平板的夹角; θ 为在后一块平板上入射光照射角; L 为干涉仪平板之间的间隔。获得正确的条纹形状所必须的最小值 N 的判断标准有许多, 根据 Rogers 判据, 透过率相对误差小于 ΔT , 要求 $N \approx \log(\Delta T)/2 \log(R)^{[7]}$ 。

实际的干涉仪存在缺陷, 假定缺陷可表示为缺陷因子 Δd_D 高斯分布, 而大气气溶胶后向散射光的频谱形式与发射激光的频谱近似相同, 可看作高斯分布, 则最终的透过率为公式(1)先对缺陷平均再与高斯谱卷积得到。将最终的透过率函数对 L 积分, 积分限为探测器每个通道对应的 L 变化范围, 得到第 j 通道的透过率:

$$T_j(j) = (1-A-R)^2 \times \left[\sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^N R^{n+m} \cos \left[\frac{2\pi(p_n - p_m) \left(\frac{v_0}{\Delta v_{FSR}} + \frac{\Delta v}{\Delta v_{FSR}} + \frac{j-1/2 - n_z/2}{n_z} \cdot \frac{\Delta v}{\Delta v_{FSR}} \right)}{n_z} \right] \times \exp \left(-\frac{4\pi^2 (p_n - p_m)^2 \Delta d_D^2}{\lambda_0^2} \right) \cdot \exp \left(-\left[\frac{\pi(p_n - p_m) \Delta v_1}{\Delta v_{FSR}} \right]^2 \right) \times \text{sinc} \left(\frac{p_n - p_m}{n_z} \cdot \frac{\Delta v_z}{\Delta v_{FSR}} \right) \right] \quad (2)$$

式中: $\Delta v_1 = \delta v / \sqrt{4 \ln 2}$ (δv 为激光发射谱宽); n_z 为探测器的通道数; 自由谱范围 $\Delta v_{FSR} = c/2L_0$, L_0 为 Fizeau 干涉仪中心腔长, 其对应频率为 v_0 ; Δv_z 为探测器探测的总的频率范围; Δv 为频移量。则探测器第 j 通道接收的气溶胶后向散射光子数为(单脉冲):

$$N_A(j) = \frac{T_j(j)}{n_z} \cdot \frac{E_0}{h\nu} \cdot \frac{S}{r^2} \eta_0 \eta \beta_a(r)$$

$$\Delta r \cos(\phi) \exp \left[-2 \sec(\phi) \int_0^r \alpha(r) dr \right] \quad (3)$$

式中: S 为接收望远系统的面积; r 为大气垂直高度; $\beta_a(r)$ 为 r 高度处气溶胶后向散射系数; $\alpha(r)$ 为大气总的消光系数, 其余参数如表 1 所示。只要将公式(2)的 Δv_1 换成 $(\Delta v_1^2 + \Delta v_M^2)^{1/2}$ (Δv_M 在高度 3 km 处约为 0.738 GHz) 代入公式(3), 再将公式(3)的 β_a 替换为 r 高度处分子后向散射系数 β_m , 即得第 j 通道分子后向散射信号 $N_M(j)$ 。

3 数据模拟及误差分析

实际探测器每个通道接收到的光子数为: $N(j) = N_A(j) + N_M(j)$ 。每个通道的背景光子数和探测器暗计数很小, 在此不考虑。由于瑞利散射谱的宽度远大于米散射谱的宽度, 在所研究的多谱勒频移的范围内, 将其散射信号看作噪声处理。

3.1 最小二乘拟合法

如果风速很小以致当径向风速为 V_r 时, j 通道的 $N_A(V_r)$ 信号与没有风速时的信号 $N_A(0)$ 的关系为^[3]:

$$N_A(V_r) = N_A(0) + \frac{\partial N_A}{\partial v} \frac{2v_0}{c} V_r \quad (4)$$

假设 $N_A(0)$ 已知 (N_A 即 $N_A(j)$), 其误差不相关, 对信号采用最小二乘法拟合得到径向风速表达式^[3]以及系统误差表达式^[4]:

$$\sigma_{V_r} = \left(\sum_{j=1}^{n_z} \left(\frac{N_A(j)}{\sqrt{N_A(j) + N_M(j)}} \right)^2 \left(\frac{2}{\lambda} \frac{1}{N_A(j)} \frac{\partial N_A(j)}{\partial v} \right)^2 \right)^{-1/2} = \left(\sum_{j=1}^{n_z} SNR^2(j) \times \theta_v^2(j) \right)^{-1/2} \quad (5)$$

式中: $SNR(j)$ 和 $\theta_v(j)$ 分别为第 j 通道的信噪比和速度灵敏度。

如图 2 实线所示, 在该系统参数下, 3 km 处风速在 $-15 \sim 15$ m/s 的范围内用该方法引起的计算误差在 0.46 m/s 以内, 一旦超过此范围, 误差将增大较快, 在 ± 20 m/s 时误差达 1.1 m/s。这也符合推导该方法的前提条件即风速很小的情况。利用公式(5)计算出的在 3 km 范围内系统风速误差如图 3 所示, 在 3 km 处径向风速误差小于 0.17 m/s。

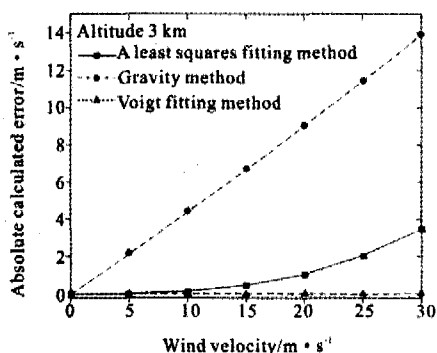


图 2 用不同的方法得出的风速误差与风速大小的关系

Fig.2 Absolute calculated error by different methods vs wind velocity

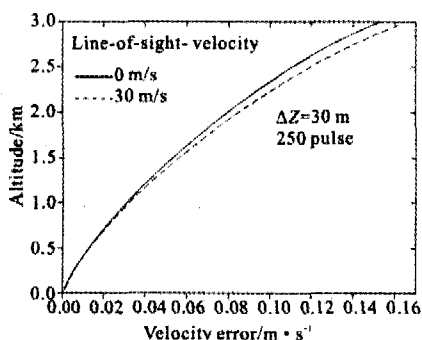


图 3 径向风速误差随高度的变化

Fig.3 Error of radial wind velocity vs vertical height

3.2 重心法

多普勒频移前后条纹中心发生移动,如果频移前后条纹都能被线列探测器完全接收到,则条纹的重心和中心重合。可通过重心的变化来确定多普勒频移及径向风速,计算公式为:

$$V_r = (j_0 - j_v) \times V_c = \left[\frac{\sum_{j=1}^n j \cdot N_A(0)}{\sum_{j=1}^n N_A(0)} - \frac{\sum_{j=1}^n j \cdot N_A(V_r)}{\sum_{j=1}^n j \cdot N_A(V_r)} \right] \times V_c \quad (6)$$

式中: j_0 和 j_v 分别为参考谱重心位置和有径向风速 V_r 时的重心位置; V_c 为线列探测器每个通道对应的风速大小,文中为 10 m/s。

由图 2 可以看出,直接计算的误差很大(未加噪声时的结果)。原因是无多普勒频移时测量的条纹中心和重心重合都为 j_0 (因设定了条纹开始在探测器中心位置),而当条纹移动后,其中心和重心不再重合;且多普勒频移越大,这种偏差也就越大。在文中描述的系统参数下不适合用重心法反演风速。

3.3 Voigt 函数拟合法

Fizeau 干涉仪透过率在倾角很小时近似为 Airy 函数,而 Airy 函数在一个周期里近似为洛仑兹函数(R 越大越精确)^[6],其与高斯函数卷积后为 Voigt 函数。故选用 Voigt 函数对信号进行拟合以确定参考条纹与频移后条纹的中心位置,从而求得 V_r 。大量的拟合结果表明,未加噪声时拟合出的结果误差很小,如图 2 所示;且在风速达 ± 80 m/s 时仍拟合得很好,所以在该系统下,理论风速测量动态范围可达 ± 80 m/s。

一般大气回波信号很微弱,是以光子计数的,信号的主要噪声是光子的量子随机效应而产生的散粒噪声。假设光子服从泊松统计规律,对采用 Monte-carlo 方法模拟的信号用 Voigt 拟合进行数据处理。表 2 同时给出了用最小二乘拟合方法得出的结果。

表 2 对模拟的信号用不同的方法算出的风速值及标准偏差

Tab.2 Calculated wind velocity and standard deviation obtained by different methods

Method	Integral pulse	Wind velocity/ ms ⁻¹		Std. Deviation of	
		Input value	Recovered value	Average	Calculated
Voigt fitting	250	10	10.007 2	0.166 1	
	1 000	10	9.997 5	0.084 1	
Least square fitting	250	10	9.871 6	0.153 7	0.153 9
	1 000	10	9.866 6	0.076 9	0.077 0

上表采用的是 3 km 处的信号,得出的风速值为 500 次模拟结果的平均值。由表 2 可知,利用 Voigt 函数拟合方法得出的风速结果和实际值很接近,标准偏差与用公式(5)所得的值相符,所以在该系统下利用 Voigt 函数拟合方法反演风速是可行的。

4 探测器探测范围及平板夹角的优化

根据表 1 已知的系统参数,运用公式(5)对探测器测量范围 Δv_z 进行优化。在 3 km 处采用标准大气模型,空气分子和大气气溶胶粒子的消光后向散射比分别为 $8\pi/3$ 和 50。

由图 4 看出,最佳值在 250 ~300 MHz 附近,在这个范围附近风速误差相差很小。本系统选取 $\Delta\nu_z=$

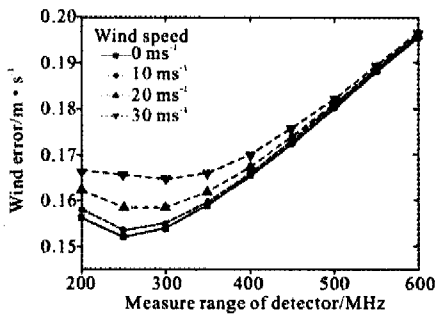


图 4 探测器探测范围优化图

Fig.4 Optimization of measure range of detector

300.8 MHz, 而平板倾角 $\alpha=\Delta\nu_z L_d/(v_0 \Delta y)$, 求得 $\alpha=2.29 \mu\text{rad}$ 。Koppelman 给出 Fizeau 条纹的形状可通过 s 来表征, 其中 $s=(2L\alpha^2/\lambda)^{1/2} F_R$, 当 $s<0.6$ 时, Fizeau 条纹将非常接近 Airy 条纹^[9]。将一系列参数值代入得 $s=0.158$, 所以在该设计参数下, Fizeau 条纹已非常接近 Airy 条纹, 不需要使光束倾斜入射以改变条纹形状, 取 $\theta=0$ 。

5 线列探测器的盲区产生的测量误差

线列探测器都不是紧密排列的, 通道与通道之间存在盲区。本系统采用的探测器 $K=0.1$ (K 为探测器通道之间的盲区和通道间距之比)。由于盲区的存在使得信号损失一部分, 总的信噪比下降, 所以系统误差变大。如图 5 所示, 在无风速时, $K=0.1$, 在 3 km 处产生约 0.01 m/s 的误差, 在 9 km 处将产生 0.13 m/s 的误差。

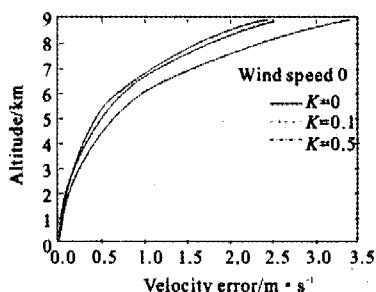


图 5 不同 K 时速度误差随高度的变化

Fig.5 System velocity error vs height for different K

6 结论

在已有的系统参数下, 对探测器测量的频率范围和 Fizeau 楔角作了优化。使得在 0~3 km 高度下, 系统风速误差小于 0.17 m/s, 完全可以满足通常要求的 1 m/s 的风速测量精度。对不同的数据处理方法进行讨论, 结果表明: 在该系统下, 尤其在大风速情况下, 适合用 Voigt 函数拟合反演风速。结果表明, 用该方法反演风速是可靠的。探测器盲区产生的风速误差在 0~3 km 内不超过 0.01 m/s。

参考文献:

- [1] FLESIA C, KORB C L. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(3): 432-440.
- [2] MCGILL M J, SKINNER W R, IRGANG T D. Analysis techniques for the recovery of winds and backscatter coefficients from a multiple-channel incoherent Doppler lidar [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(6): 1253-1268.
- [3] SKINNER W R, HAYS P B. Incoherent Doppler lidar for measurement of atmospheric winds [C]// *Proceeding of SPIE, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research*, 1994, 2266: 383-394.
- [4] MCKAY J A. Modeling of direct detection Doppler wind lidar. II. The fringe imaging technique [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(27): 6487-6493.
- [5] KILLEEN T L, KENNEDY B C, HAYS P B, et al. Image plane detector for the Dynamics Explorer Fabry-Perot interferometer [J]. *Appl Opt*, 1983, 22(22): 3503-3513.
- [6] Irgang T D, HAYS P B, SKINNER W R. Two-channel direction-detection Doppler lidar employing a charge-coupled device as a detector [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(6): 1145-1155.
- [7] KAJAVA T T, LAURANTO H M, SALOMAA R R E. Fizeau interferometer in spectral measurements [J]. *J Opt Soc Am B*, 1993, 10: 1980-1988.
- [8] SLOGGET G J. Fringe broadening in Fabry-Perot interferometers [J]. *Appl Opt*, 1984, 23(14): 2427-2432.
- [9] MCKAY J A. Assessment of a multibeam Fizeau wedge interferometer for Doppler wind lidar [J]. *Appl Opt*, 2002, 41: 1760-1767.