

文章编号: 1007-5461(2006)03-0330-05

利用 Fizeau 干涉仪进行激光风速测量的原理分析

沈法华¹, 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: 导出了激光多普勒雷达基于 Fizeau 干涉仪及 CCD 探测器进行测风时, 每个 CCD 元最终接收到信号的一般表达式。对系统的参数做了整体优化, 得出一组优化参数。在 0~3 km 高度, 得出系统风速误差小于 0.16 m/s。对最终的风速反演分别运用最小二乘拟合法和重心法。分析表明最小二乘拟合法只适用于风速较小的情况。详细分析了运用重心法计算风速必然会引起误差, 并提出一种解决方法。修正后, 在 ±30 m/s 风速范围内, 该方法产生的误差小于 0.25 m/s。

关键词: 大气光学; 风速测量; 激光雷达; Fizeau 干涉仪; 气溶胶散射

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

1 引言

对大气风场的测量以获得全天候、全高度的风场数据对于改进大气模型、提高大气分析能力、提高数值天气预报的准确性、避免机场附近切变风可能造成的飞行事故等方面具有重要的意义。激光雷达可以通过对多普勒频移的测量得到风速, 它是目前较为精确地测量大气风速的重要工具, 而且其空间和时间分辨率高。多普勒激光雷达分为相干探测和直接探测两种。直接探测相对于相干探测具有原理简单、受大气波动的影响小、探测高度高等优点。目前, 直接探测多普勒激光雷达中应用的频率检测技术主要有三种: 单边缘技术^[1,2]、双边缘技术^[3]和多通道条纹成像技术^[4~7]。边缘技术的鉴频器一般采用 F-P 干涉仪^[1,3]或碘分子窄带吸收线^[2]; 条纹成像技术一般采用 F-P 干涉仪^[4~6], 也有采用 Fizeau 干涉仪、Mach-Zehnder 干涉仪^[7]作为鉴频器的报道。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。由于 F-P 标准具产生的是环形条纹, 不利于和已有的线型像素探测器(如 CCD)匹配, 而为此专门设计的环状阴极倍增管量子效率又很低, 从而限制了条纹技术在激光测风中的应用。而 Fizeau 干涉仪产生的是线条纹, 可以用线列探测器直接探测条纹的移动, 有利于风速的测量。基于 Fizeau 干涉仪的测风激光雷达 NASA 和 ESA 已研究设计过。

2 基本原理

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

$$T = (1 - A - R)^2 \left| \sum_{n=0}^N R^n \exp\left(i \frac{2\pi}{c} \cdot 2\nu L P_n\right) \right|^2, \quad (1)$$

其中 $P_n = \frac{\sin \theta - \sin(\theta - 2n\alpha)}{2 \tan \alpha}$, A 为光束在通过干涉仪的光损耗; R 为干涉仪对应波长的反射率; N 是光在两平板之间的反射次数; α 为两干涉平板的夹角; θ 为入射光线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, $L = L_0 + \Delta L$, 其中 L_0 为 Fizeau 干涉仪中心腔长。获得正确的条纹形状所必须

基金项目: 中科院百人计划资助

收稿日期: 2005-10-17; 修改日期: 2005-11-22

E-mail: sfh81914@tom.com

的最小值 N 的判断标准有许多，根据 Rogers 判据，强度误差小于 ΔI 要求 $N \approx \log(\Delta I)/2\log(R)$ [8]。如果频率和腔长都有微小的变化， $\nu = \nu_0 + \Delta\nu$ ， $L = L_0 + \Delta L + \Delta d$ ，则有 $\nu L = \nu_0 L_0 + \nu_0 \Delta L + \nu_0 \Delta d + \Delta\nu L_0$ 。实际的干涉仪存在缺陷，假定缺陷可表示为缺陷因子 Δd_D 的高斯分布；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，可看做高斯分布。则最终的透过率为 (1) 式先对缺陷平均再与高光谱卷积得到

$$T_f = (1 - A - R)^2 \left\{ \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^N R^{n+m} \cos \left[\frac{2\pi}{c} \cdot 2(P_n - P_m)(\nu_0 L_0 + \nu_0 \Delta L + \Delta\nu L_0) \right] \times \right. \\ \left. \exp \left[- \frac{4\pi^2 (P_n - P_m)^2 \Delta d_D^2}{\lambda_0^2} \right] \exp \left\{ - \left[\frac{\pi (P_n - P_m) \Delta\nu_l}{\Delta\nu_{FSR}} \right]^2 \right\} \right\}. \quad (2)$$

其中 $\Delta\nu_l = \delta\nu/\sqrt{4\ln 2}$ ($\delta\nu$ 为激光发射谱宽)，自由谱范围 $\Delta\nu_{FSR} = c/2L_0$ ， L_0 对应频率为 ν_0 ， $\Delta\nu$ 为频移量。

多普勒激光雷达向大气发射激光脉冲，激光束被大气中的气溶胶粒子和大气分子散射。其中一小部分散射信号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，接收的光信号相对于发射激光频率产生了多普勒频移，该多普勒频移与径向风速的关系为 $\Delta\nu = 2V_r/\lambda$ ，从而引起条纹中心的移动。若利用 Fizeau 干涉仪作为鉴频器，由 (2) 式知频移后条纹中心的位置满足 $\nu_0 \Delta L + \Delta\nu L_0 = 0$ ，而 $\Delta L = -\alpha \cdot \Delta y$ ，如图 1 所示。所以有 $\Delta y = \frac{2L_0}{c\alpha} V_r$ ，条纹位移与径向风速大小成正比，如图 2 所示。

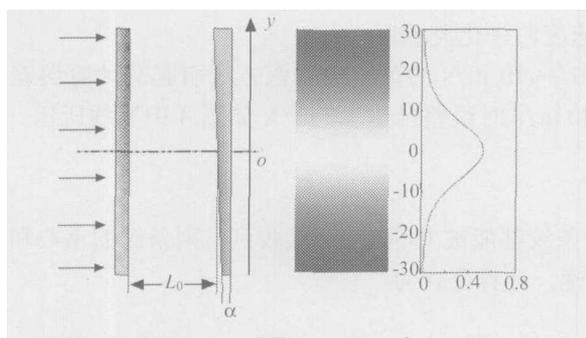


Fig.1 Diagram of Fizeau interferometer

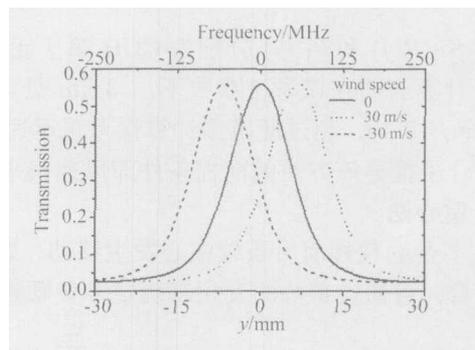


Fig.2 Diagram of displacement of fringe

假设 Fizeau 干涉仪条纹成像在 CCD 上 (成像范围不一定是一个自由谱范围)，则 CCD 第 j 元的透过率

$$T_f(j) = (1 - A - R)^2 \left\{ \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^N R^{n+m} \cos \left[2\pi(P_n - P_m) \left(\frac{\nu_0}{\Delta\nu_{FSR}} + \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{FSR}} + \frac{j - 1/2 - n_z/2}{n_z} \cdot \frac{\Delta\nu_z}{\Delta\nu_{FSR}} \right) \right] \times \right. \\ \left. \exp \left[- \frac{4\pi^2 (P_n - P_m)^2 \Delta d_D^2}{\lambda_0^2} \right] \exp \left\{ - \left[\frac{\pi (P_n - P_m) \Delta\nu_l}{\Delta\nu_{FSR}} \right]^2 \right\} \text{sinc} \left(\frac{P_n - P_m}{n_z} \cdot \frac{\Delta\nu_z}{\Delta\nu_{FSR}} \right) \right\}, \quad (3)$$

式中 n_z 为 CCD 的元数， $\Delta\nu_z$ 为条纹成像在 CCD 上总的频率范围。对应 n_z 元 CCD 的第 j 个单元接收到的气溶胶归一化散射信号强度为 $i_f = T_f(j)/n_z$ 。只要将 i_f 中的 $\Delta\nu_l$ 换成 $(\Delta\nu_l^2 + \Delta\nu_M^2)^{1/2}$ ($\Delta\nu_M$ 在高度 3 km 处约为 2.21 GHz)，即得分子归一化散射信号强度 i'_f 。则探测器第 j 元接收到的气溶胶和分子后向散射光子数分别为

$$N_A(j) = i_j \cdot \varepsilon \Delta t \frac{E_0 S}{h\nu r^2} \eta_0 \eta \beta_A(r) \Delta r \cos(\phi) \exp \left[- 2\text{sec}(\phi) \int_0^r \alpha(r) dr \right], \quad (4)$$

$$N_M(j) = i'_j \cdot \varepsilon \Delta t \frac{E_0 S}{h\nu r^2} \eta_0 \eta \beta_M(r) \Delta r \cos(\phi) \exp \left[- 2\text{sec}(\phi) \int_0^r \alpha(r) dr \right], \quad (5)$$

上式中 ε 为激光脉冲重复频率， Δt 为积分时间， S 为接收望远镜系统的面积， r 为垂直高度， $\beta_A(r)$ 和 $\beta_M(r)$ 分别为 r 高度气溶胶及大气分子后向散射系数， $\alpha(r)$ 为大气总的消光系数。下文的模拟计算的参数如表 1。采用标准大气模型。

Table 1 Parameter for direct detection lidar system

扫描角 ϕ	45°	激光线宽 $\delta\nu$	80 MHz	FSR	500 mHz
垂直分辨率 Δr	30 m	除干涉仪光学效率 η_0	5%	反射精细度	9.94
有效天线口径	300 mm	CCD 量子效率 η	80%	干涉仪平板缺陷 Δd_D	6 nm
接收视场 FOV	0.15 mrad	CCD 元数 n_z	16	照射角 θ	0
工作波长 λ_0	1064 nm	成像范围 $\Delta\nu_z$	1FSR	垂直高度	3 km
激光单脉冲能量 E_0	170 mJ	Fizeau 通光孔径 Δy	60 mm	积分时间 Δt	5 s
脉冲重复频率 ε	50 Hz	Fizeau 平板夹角 α	8.87 μ rad	测风动态范围	± 30 m/s

3 风速反演及误差分析

3.1 最小二乘拟计算法

如果风速很小,以致当风速为 V_r (径向)时第 j 元的信号 $N_{Aj}(V_r)$ 与没有风速时的信号 $N_{Aj}(0)$ 成线性关系,并假设 $N_{Aj}(0)$ 已知 (N_{Aj} 即代表 $N_A(j)$),并假设各元的信号误差不相关,对信号用最小二乘法拟合得到径向风速表达式^[5]及系统误差表达式^[6]

$$\sigma_{V_r} = \left\{ \sum_{j=1}^{n_z} \left[\frac{N_{Aj}(j)}{\sqrt{N_{Aj}(j) + N_{Mj}(j)}} \right]^2 \left[\frac{2}{\lambda N_{Aj}(j)} \frac{\partial N_{Aj}(j)}{\partial \nu} \right]^2 \right\}^{-1/2} = \left\{ \sum_{j=1}^{n_z} SNR^2(j) \times \theta_V^2(j) \right\}^{-1/2}, \quad (6)$$

其中 $SNR(j)$ 和 $\theta_V(j)$ 分别为 CCD 第 j 元的信噪比和速度归一化灵敏度。

计算表明在该系统参数下, 3 km 处风速在 -10 m/s~ 10 m/s 的范围内用该方法引起的计算误差在 0.25 m/s 以内,超过此范围计算误差将迅速增大,在 ± 20 m/s 时误差已达 1.9 m/s,如图 4 中实线所示。这也符合了推导该方法的前提条件即风速很小的情况。

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 CCD 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

$$V_r = (j_0 - j_{V_r}) \times V_c = \left[\frac{\sum_{j=1}^{n_z} j \cdot N_{Aj}(0)}{\sum_{j=1}^{n_z} N_{Aj}(0)} - \frac{\sum_{j=1}^{n_z} j \cdot N_{Aj}(V_r)}{\sum_{j=1}^{n_z} N_{Aj}(V_r)} \right] \times V_c, \quad (7)$$

其中 V_c 为 CCD 一个元对应的风速大小,本文为 16.625 m/s。

由图 4 看出直接计算的误差很大(未加噪声时的结果),尤其当风速较大时更明显。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 CCD 中心位置),而当条纹移动后,其中心和重心不再重合。此时重心位置为(假定图 3 中 $2\Delta j$ 所示部分的透过率 T_{\min} 变化很小近似为一常量)

$$j_{V_r} = j'_{V_r} - C \cdot \Delta j, \quad (8)$$

其中 $C = N_{\min} \cdot n_z / N_T$, j_{V_r} 和 j'_{V_r} 分别为条纹移动后的重心位置和中心位置, Δj 为条纹中心的位移。 N_{\min} 为元透过率为 T_{\min} 时,该 CCD 元对应的光子数, N_T 为 CCD 接收到的总的光子数(在频移前后近似不变)则

$$\Delta j' = \Delta j - C \cdot \Delta j, \quad \text{故} \quad V_{MAU} = V_{CRT} - C \cdot V_{CRT}. \quad (9)$$

其中 V_{CRT} 和 V_{MAU} 分别为修正值和直接计算值, C 即为风速的相对误差。该误差可以通过增大 CCD 的探测范围及增大反射率 R 得到改善,但干涉仪透过率不可能达到 0,则这种误差就存在。修正方法是将 CCD 接收光子数最小的元的光子数作为 N_{\min} 带入求出 C ,再求得 V_{CRT} 。产生的风速误差修正后在 ± 30 m/s 内小于 0.25 m/s,如图 4 所示。随着条纹的位移增大 $2\Delta j$ 所示部分的透过率逐渐增大,故 C 不是严格的常量,也会逐渐增大,这从图 4 中修正后的误差曲线可以看出。

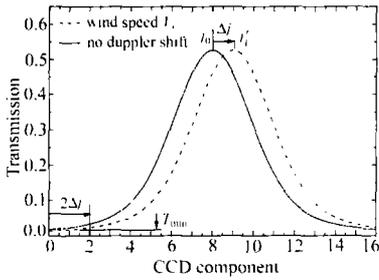


Fig.3 Principle of correction of gravity method

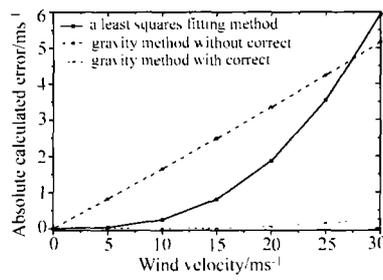


Fig.4 Calculated wind error by different methods vs wind velocity

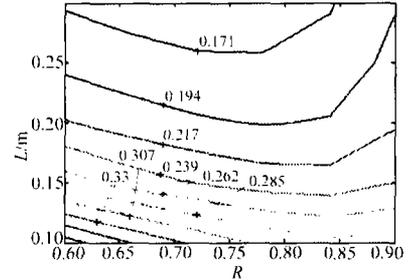


Fig.5 When $\Delta\nu_c=1\text{FSR}$, Optimization of L and R

4 干涉仪参数的优化

Fizeau 条纹一般是非对称的并且伴有次极大产生, 可以通过优化 θ 来获得最接近 Airy 条纹的 Fizeau 条纹。Langenbeck 发现使条纹形状最佳的倾角为 $F_E \cdot \alpha / 2^{1/4}$ (其中 F_E 为有效精细度)^[9]。实际的最佳倾角比该值要略大。同时根据 Jacquinot 标准^[9]、允许照明 Fizeau 干涉仪的最大立体角为 $\theta_{\max} = (\lambda / F_E \cdot L_0)^{1/2}$; 干涉仪的缺陷平均可使条纹平滑, 但是缺陷平均后条纹变宽, 峰值降低, 同样会影响测量精度; 平板楔角 $\alpha = \Delta\nu_c \cdot L_0 / (\nu_0 \cdot \Delta y)$ 。根据表 1 已知的系统参数以及上述的 α 、 θ 的表达式代入系统误差表达式 (6)。则 (6) 式中右边只有干涉仪腔长 L 、干涉仪平板反射率 R 及 CCD 探测范围 $\Delta\nu_c$ 三个变量。这就可以以风速误差最小化为原则对干涉仪参数作总体优化 (在 3 km 处, 运用标准大气模型)。图 5、图 7 分别是当 $\Delta\nu_c = 1 \text{ FSR}$ 和 $\Delta\nu_c = 300 \text{ MHz}$ 时, 风速误差作为 L 和 R 的函数作出的等高图, 图中风速误差单位为 m/s 。

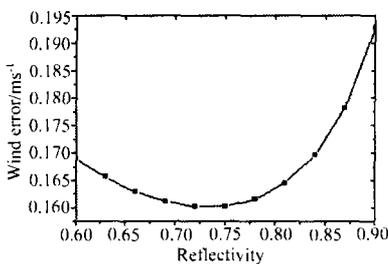


Fig.6 When $\Delta\nu_c=1\text{FSR}$, $L=0.3 \text{ m}$, Optimization of R

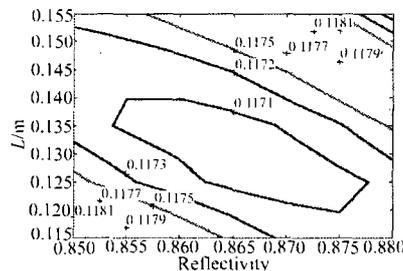


Fig.7 When $\Delta\nu_c=300.8 \text{ MHz}$, Optimization of L and R

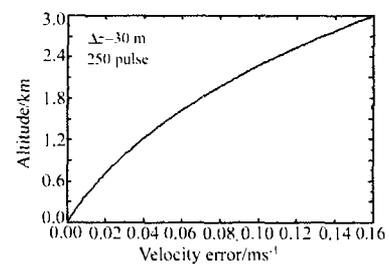


Fig.8 System velocity error vs vertical height

值得注意的是由图 5 看出最佳的 L 大于 0.3 m, 但由于设计水平的限制, 最大的 L 一般只能设计到 0.3 m, 故图 6 将 L 定在 0.3 m。再对 R 优化。由图 5 和图 6 得当 CCD 探测范围为 1FSR 时, 最佳的参数值为: $L=0.3 \text{ m}$, $R=0.73$, $a=8.87 \mu \text{ rad}$, $\theta = 29 \mu \text{ rad} \approx 0$ 。风速误差为 0.16 m/s 。若探测范围小于 1FSR (当然 CCD 的最小探测范围是受到测量的风速动态范围及最终的条纹谱宽的限制), 这样可以使得每个元的信号增强, 从而提高了信噪比, 降低了风速误差。例如当 $\Delta\nu_c=300.8 \text{ MHz}$, 得最佳参数为: $L=0.13 \text{ m}$, $R=0.866$, $a = 2.31 \mu \text{ rad}$, 风速误差为 0.117 m/s , 如图 7 所示。但在此参数下给风速反演带来不便, 在本文仍选 CCD 探测范围为 1FSR。将上面参数代入公式 $s = (2L \cdot \alpha^2 / \lambda)^{1/3} F_R$ 得 $s=0.35$ 。根据 Koppelman 标准, 在此优化参数下的 Fizeau 条纹非常接近 Airy 条纹^[9]。将上面得出的优化参数带入风速误差公式 (6), 得出 0~3 km 的风速误差随高度的变化如图 8 所示。

5 结论

推导出了基于 Fizeau 干涉仪和 CCD 探测器测风激光雷达的每个 CCD 元接收到信号光子数的一般表达式, 该式对于 CCD 探测范围无论是否是 1FSR 都适用。选择合理的系统参数后对干涉仪的参数做了优化计算, 得出在 CCD 探测范围为 1FSR 时, 在 0~3 km 高度, 风速测量的系统误差小于 0.16 m/s 。对于

最终的风速反演, 在风速大于 10 m/s 时, 最小二乘拟合方法不再适用。对重心法产生的固有误差加以修正后, 在设定的系统参数下, 在 ± 30 m/s 风速范围内, 产生的方法误差小于 0.25 m/s。故在 ± 30 m/s 风速动态范围内风速测量误差可以满足小于 1 m/s 的精度。同时还给出了当 CCD 探测范围小于 1FSR 时, 系统误差可以更小。

参考文献:

- [1] Korb C L, Gentry B M, *et al.* Edge technique Doppler lidar wind measurements with high vertical resolution [J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36(24): 5976-5983.
- [2] Liu Zhishen, Wu Dong, *et al.* Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter [J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(33): 7079-7086.
- [3] Cristina Flesia, C. Laurence Korb. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(3): 432-440.
- [4] 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.
- [5] Skinner W R, Hays P B. Incoherent Doppler lidar for measurement of atmospheric winds [C] // *SPIE*, 1994, 2266: 383-394.
- [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] Bruneau D. Fringe-imaging Mach-Zehnder interferometer as a spectral analyzer for molecular Doppler wind lidar [J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(3): 503-509.
- [8] 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.
- [9] Mckay J A. Assessment of a multibeam Fizeau wedge interferometer for Doppler wind lidar [J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41: 1760-1767.

Analysis of principle of wind velocity measurement with Fizeau interferometer

SHEN Fa-hua¹, 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: A generalized formulation of signal on each pixel for a wind detection lidar based on Fizeau interferometer and CCD is derived. System parameters is optimized through numerical simulation. System wind error is below 0.16 m/s at the altitude from 0 to 3 kilometers. Least square fitting method and gravity method are used to retrieve wind velocity. The analysis shows that least square fitting method can only be used when the velocity is small. Gravity method is analyzed and the method error is corrected by a new method. After correcting, the error due to the method is below 0.25 m/s at the range of wind velocity from -30 m/s to 30 m/s.

Key words: atmospheric optics; wind velocity measurement; lidar; Fizeau interferometer; aerosol scattering

作者简介: 沈法华 (1981 -), 男, 苏州大学物理科学与技术学院在读硕士, 主要从事多普勒测风激光雷达研究。