

文章编号: 0258-7025(2003)10-0943-04

基于 Fizeau 干涉仪的激光风速测量技术

孙东松, 杨 昭, 方建兴

(苏州大学理学院物理系, 江苏 苏州 215006)

摘要 设计和讨论了一种利用 Fizeau 干涉仪进行激光风速测量的原理。该系统采用 Fizeau 干涉仪进行信号频谱分析,形成的梳状干涉图案强度分布可以通过线列 CCD 探测器测定,其重心位置决定信号的多普勒频移量或径向风速。利用 Monte-Carlo 方法模拟计算了该系统的测量精度,结果表明,在 90% 的光子数探测几率下,多普勒测量精度约是单个 CCD 探测通道谱宽的 10%;激光雷达系统风速测量的精度在垂直高度 2 km 内优于 2 m/s。

关键词 雷达工程;风速;Fizeau 干涉仪;激光雷达;Mie 散射

中图分类号 TH 765.4 **文献标识码** A

Technique of Wind Velocity Measurement with a Fizeau Interferometer

SUN Dong-song, YANG Zhao, FANG Jian-xing

(Department of Physics, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract The technique for the atmospheric wind measurement with a Fizeau interferometer has been proposed. The system uses a Fizeau etalon for spectral analysis, and the comb-like interference patterns are determined by a linear CCD array. The gravity of the pattern is proportional to the Doppler shift of the backscattering signal from wind. The simulation with the Monte-Carlo method shows that the accuracy of Doppler measurement is better than a tenth of the spectral width of a single CCD component in 90% detection probability. The accuracy of the lidar system is about 2 m/s in the vertical up to height of 2 km.

Key words radar engineering; wind velocity; Fizeau interferometer; lidar; Mie scattering

1 引 言

具有一定精度的全球大气风场分布是目前气象学急需了解的参数之一。精确的风场分布可以为研究气候变化、天气预报和建立准确的大气模型提供依据。激光雷达可以通过多普勒频移测量直接得到速度,它是测量大气风速的重要工具之一,并具有测量精度高、分辨率高和三维风场信息等特点。直接接收激光雷达^[1~3]是目前普遍采用的大气多普勒测量手段,与相干接收^[4]工作方式相比,它具有测量原理简单、结构紧凑且受大气波动影响较小等优点。目前直接探测多普勒激光雷达主要采用边缘技术^[2](edge technique)和条纹技术^[5](fringe technique)两种,二者都是采用 Fabry-Perot 干涉仪作为多普勒频率检测元件。边缘技术在大气分子散射的多普

勒测量中具有明显的优点,条纹技术在利用大气米氏散射进行多普勒测量中有优势。条纹技术是通过干涉条纹的重心确定散射信号的多普勒频移量,因此信号处理简单,对系统的要求也不高。在传统的条纹技术中,由于产生的条纹是环状的,这给测量条纹位置带来不便,M. J. McGill 等采用复杂的光学系统将圆形条纹的移动转换成线性条纹移动^[6],这样就可以采用 CCD 线列探测器决定条纹位置,因此条纹技术在应用中受到限制。

由于条纹技术在信号处理方面的特点,本文提出了采用 Fizeau 干涉仪,将圆环条纹转换为线列条纹,直接由 CCD 检测条纹的重心。以往 Fizeau 干涉仪主要用于高分辨率的激光波长计^[7],即可以实时测量脉冲和连续工作的激光波长。由于多普勒速

收稿日期:2002-06-28;收到修改稿日期:2002-08-27

作者简介:孙东松(1962—),男,江苏省人,苏州大学物理系研究员,博士,主要从事大气遥感激激光雷达、成像激光雷达方面的研究。E-mail:dssun@suda.edu.cn

度测量比波长测量要求更高的分辨率,因此这种用于大气风场测量的 Fizeau 干涉仪的设计要求较高,据报道欧航局已经开展了利用 Fizeau 干涉仪进行多普勒测量的研究工作。本文介绍了 Fizeau 干涉仪测量大气风速的工作原理,分析了线列 CCD 确定速度的精度,并分析估算了激光雷达系统性能和风速测量精度。

2 工作原理

利用直接探测方式进行多普勒测量的 Fizeau 干涉仪由两个光学平板组成,彼此之间以一定的微小楔角分开,形成楔形空气空间。入射光在通过两个平板间楔形空间后,沿楔角方向产生干涉条纹,如图 1。Fizeau 楔角在进行波长测量时,干涉条纹强

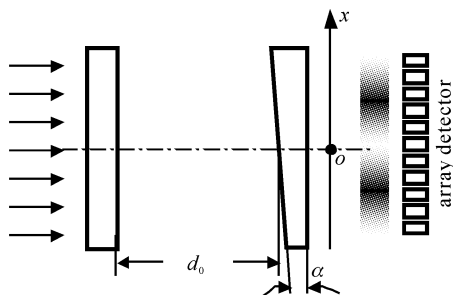


图 1 Fizeau 楔板的框图

Fig. 1 Diagram of Fizeau wedge

度分布可以用正弦函数描述^[8];而在多普勒测量中,由于楔角非常小,这时干涉条纹强度分布应该采用 Airy 函数描述^[9],即

$$A(\phi) = \frac{(1-R)^2}{1-2R\cos(\phi)+R^2} \quad (1)$$

式中, R 为平板内表面的反射率, ϕ 为相位因子,它与平板间距 d 及入射光频率 ν 之间的关系为 $\phi = 4\pi d\nu/c$ 。平板间距 d 可以表示为 $d = d_0 - \alpha x$,其中 d_0 为平板中心间距, α 为楔角。如果激光发射频率 ν_0 在干涉仪透射的条纹位于 Fizeau 平板的中心 d_0 处,则接收的大气多普勒散射信号 $\nu_0 + \nu_d$ 的干涉条纹满足 $d_0\nu_0 = d(\nu_0 + \nu_d)$,于是条纹在干涉板输出端的位置为

$$x = \frac{\nu_d}{\alpha(\nu_0 + \nu_d)}d_0 \approx \frac{\nu_d}{\alpha\nu_0}d_0 = \frac{2\nu_r}{c\alpha}d_0 \quad (2)$$

式中, ν_d 为多普勒频率, ν_r 为径向速度, c 表示光速;由于 $\nu_d \ll \nu_0$,所以得到公式(2)的近似结果。考虑到 Fizeau 干涉仪孔径受光学加工和接收系统的限制,最大测量速度范围通过改变楔角 α 决定。例如,

如果最大多普勒频移为 ± 376 MHz(对应于 532 nm 激光波长的速度范围为 ± 100 m/s),Fizeau 干涉仪的 FSR(free spectral range)为 1 GHz,孔径为 30 mm,则楔角 α 应为 $3.3 \mu\text{rad}$ 。

激光大气散射包括气溶胶和分子散射两部分,气溶胶散射光(米氏散射)在经过 Fizeau 干涉仪后的光强分布可以表示为 Airy 函数和散射光谱的卷积

$$I_M(x, \nu) = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} A(\nu - \nu', x)G(\nu')d\nu' \quad (3)$$

式中, I_0 为入射光强; $G(\nu')$ 表示 Mie 散射信号谱,并假设与发射激光谱相同具有 Gaussian 分布。瑞利散射信号在通过干涉仪后的光强分布可以表示为

$$I_R(x, \nu) = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} A(\nu - \nu', x)R(\nu')d\nu' \quad (4)$$

式中, $R(\nu)$ 为瑞利散射谱分布。由于瑞利散射谱的宽度(对于 532 nm 波长和大气温度 300 K,约为 2.6 GHz)远大于米氏散射谱的宽度,因此在所研究的多普勒频移范围内,可以将瑞利信号视为噪声信号处理。例如,对于波长为 532 nm 的发射激光和最大 100 m/s 的径向风速情况下,所产生的多普勒频移约为 380 MHz,约为瑞利散射谱宽的 1/7。

如果采用线列 CCD 探测 Fizeau 干涉图的重心分布情况,其测量的准确性可以采用 Monte-Carlo 方法进行模拟,即从已知分布的总体中产生简单子样作为随即变量抽样。由于探测到的光强分布为两个函数的卷积,因此选用复合抽样方法进行抽样模拟。对于 12 元线列 CCD 和选取每个 CCD 单元可以接收的频谱宽度为 75MHz(对应 20m/s 的径向速度)的探测方式,图 2 给出了两个图示模拟结果。其中,选取总光子数为 1000 个,径向速率分别为 0 和 25 m/s。通过模拟计算的结果表明,在 90%以上的探测几率范围内所对应的谱重心的误差小于 7.5 MHz,或速率误差小于 2 m/s。同时在大量的模拟计算后发现,采用上述结构确定谱重心的误差总是小于每个单元对应谱宽的 10%。

3 风速测量原理系统

可以采用 Nd:YAG 激光器经过倍频产生 532 nm 的可见激光作为光源,它通过扩束器和扫描定位系统以 30° 的天顶角发射,散射信号通过相同的扫描系统和孔径为 250 mm 的卡塞格伦望远镜系统接收,然后耦合到光纤的一端,另一端输出和透镜耦合进入 Fizeau 干涉仪,干涉仪放在一个恒温室内以

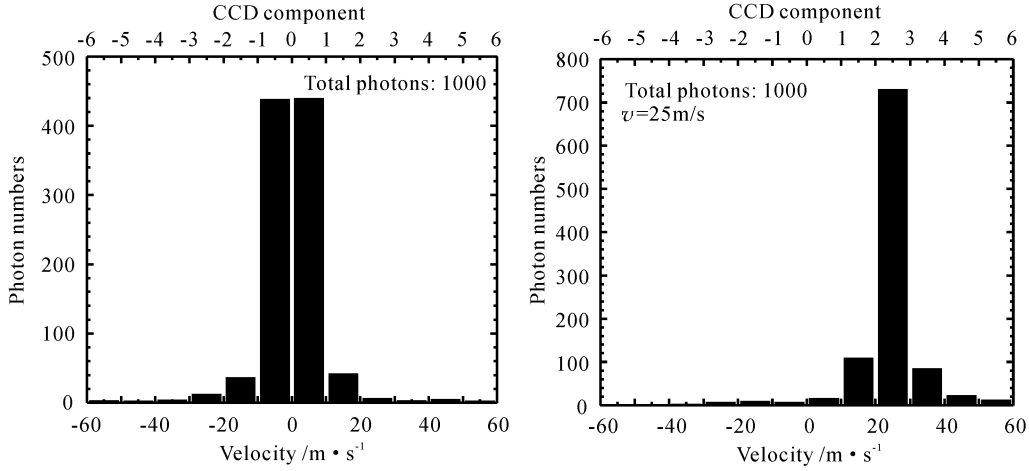


图 2 CCD 线列单元的光子数分布

Fig. 2 Simulation of the center of the gravity for received photons

表 1 直接接收激光雷达系统参数

Table 1 Parameters for direct detection lidar

Items	Parameter
System	
Dynamic range	±50 m/s (Horizon)
Accuracy	±1 m/s
Resolution	100 m
Zenith angle	30°
Transmitter	
Wavelength	532 nm (Nd:YAG)
Energy	100 mJ/pulse
Line width	70 MHz
PRF	20 Hz
Optical efficiency	90%
Receiver	
Telescope diameter	250 mm
Optical efficiency	50%
Quantum efficiency	60% (APD)
Fizeau interferometer	
FSR	830 MHz
Finesse	22
Tilted angle	~4 μrad
Peak transmission	60%

保证其稳定和减小测量误差。利用会聚透镜和柱面透镜将像会聚到线列 CCD 探测器,如图 3。选取比较实际的激光雷达系统的设计参数见表 1。

由于干涉条纹与线列 CCD 的位置是线性对应的,于是对应 n 元 CCD 的第 i 个单元接收到的归一化光信号强度 i_i 可以写为

$$i_i(\nu) = \frac{1}{nI_0} \int_{x_1}^{x_2} I(x, \nu) dx \quad (5)$$

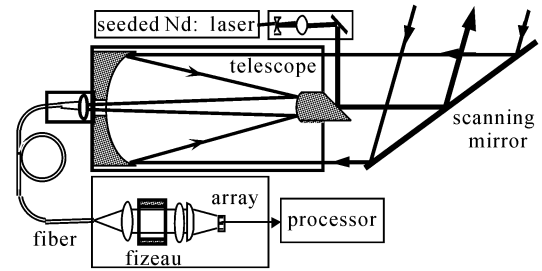


图 3 直接接收激光多普勒雷达系统

Fig. 3 Diagram of direct detection Doppler lidar for wind measurement

接收系统单元接收到的散射信号光子数随距离 z 的变化表示为^[10]

$$N(z) = \frac{\eta E \lambda}{hc} Y(z) \frac{A_r}{z^2} \Delta z \beta(z) \eta_{sys} T^2(z) \quad (6)$$

式中, η 为量子效率, E 为激光脉冲能量, $Y(z)$ 为重叠因子, A_r 为望远镜有效接收面积, Δz 为距离分辨率, $\beta(z)$ 为后向散射系数(包括分子散射和气溶胶散射), η_{sys} 为系统总光学效率, $T(z)$ 为单程大气透过系数, h 为普朗克常数。在信号散粒噪声限下,每个 CCD 单元的光子探测信噪比为^[2]

$$\left(\frac{S}{N}\right)_i = \frac{\sqrt{n} N(z) i_i(\nu, T)}{\sqrt{N(z) i_i(\nu, T) + N_b + N_d}} \quad (7)$$

式中, N_b 为背景噪声光子数, N_d 为探测器本身产生的噪声光子数。CCD 输出的总探测信噪比为

$$(S/N) = \left[\sum_{i=1}^n (S/N)_i^{-2} \right]^{-1/2} \quad (8)$$

激光雷达系统的测量误差可以表示为

$$\epsilon_v = \frac{1}{\theta_v (S/N)} \quad (9)$$

式中, θ_v 为速度灵敏度, 定义为单位速度变化时干涉条纹相对强度的变化, 即 $\theta_v = \frac{1}{i} \frac{di}{dv}$ 。根据表 1 给出的系统参数和采用图 3 的激光雷达系统结构, 并根据美国 1976 年大气标准和分层气溶胶模型, 模拟计算了速度测量误差随高度的变化, 如图 4。可以看出, 在 2 m/s 的测量误差范围内和 1000 个累计脉冲下, 可以探测到垂直 2 km 的高度范围。由于该系统是基于气溶胶散射, 而在低对流层的大气气溶胶散射较强, 所以该系统适合于边界层或低对流层的大气风场测量(图中在 2 km 附近出现的不平滑点, 是由于气溶胶模型数据所致, 因该点处于边界层模型和对流层模型数据的交点)。

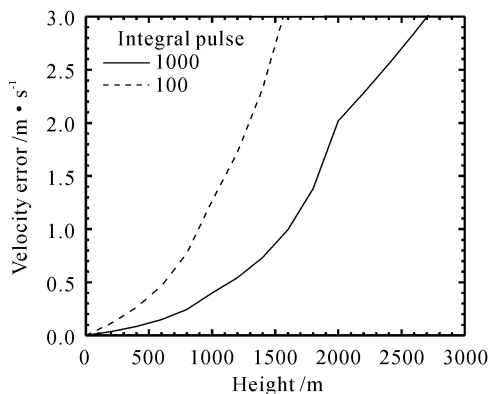


图 4 速度误差随测量高度的变化

Fig. 4 Velocity error vs height for different integral pulses

4 结 论

本文介绍了基于 Fizeau 干涉仪的测风激光雷达系统的原理。它是在 Fabry-Perot 干涉仪成像条纹方法基础上的改进, 直接通过 Fizeau 线状干涉条纹的重心位置决定散射信号 Doppler 频移量。文中着重对其测量结果的精确度进行了分析模拟, 根据利用 Monte-Carlo 方法的模拟结果可以看出, 如果采用 12 元 CCD 探测器和设计每个通道的探测频谱宽度为 37.6 MHz (对应于速度 10 m/s), 则当风

速为 0 m/s 时, 误差为 1 m/s 的光子数探测几率约为 88%; 相同误差情况下的光子数探测几率约为 74%。经过大量的模拟计算, 发现在探测几率为 90% 时, 速率测量误差约为单个探测通道频谱宽度的 10%。

激光雷达系统的计算表明, 测量精度在 2 m/s 时, 可以探测垂直高度为 2 km 的风速; 在增加累计脉冲或探测时间的基础上, 有可能进一步提高探测高度。

参 考 文 献

- 1 V. J. Abreu, J. E. Barnes, P. B. Hays. Observations of winds with an incoherent lidar detector [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(22):4509~4514
- 2 C. L. Korb, B. M. Gentry, C. Y. Weng. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(21):4202~4213
- 3 D. Sun, S. Kawato, T. Kobayashi. Ultraviolet Rayleigh lidar for wind and temperature measurements [J]. *Opt. Rev.*, 2000, **7**(6):555~560
- 4 R. T. Menzies, R. M. Hardesty. Coherent Doppler lidar for measurements of wind fields [J]. *Proc. IEEE*, 1989, **77**(3):449~462
- 5 K. F. Fischer, V. J. Abreu, W. R. Skinner *et al.*. Visible wavelength Doppler lidar for measurement of wind and aerosol profiles during day and night [J]. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(2):499~511
- 6 M. J. McGill, M. Marzouk, V. S. Scott III *et al.*. Holographic circle-to-point converter with particular applications for lidar work [J]. *Opt. Eng.*, 1997, **36**(8):2171~2175
- 7 J. J. Snyder. Fizeau Wavelength Meters [M]. in *Laser Spectroscopy III*, J. L. Hall, J. L. Carlsten, Eds., Springer, New York, 1977. 419
- 8 M. B. Morris, T. J. McIlrath, J. J. Snyder. Fizeau wavemeter for pulsed laser wavelength measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(21):3862~3868
- 9 B. V. Dorrio, J. Blanco-Garcia, C. López *et al.*. Phase error calculation in a Fizeau interferometer by Fourier expansion of the intensity profile [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(1):61~64
- 10 B. M. Gentry, C. L. Korb. Edge technique for high-accuracy Doppler velocimetry [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **33**(24):5770~5777