

文章编号: 1002-2082(2006)06-0558-05

扫描式法布里-珀罗干涉仪测量高空大气风速

赵正启, 周小珊, 艾 勇

(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

摘 要: 为测量中低纬度地区 250 km 高空大气风速, 采用扫描式法布里-珀罗干涉仪记录 250 km 高度附近的 OI630 nm 气辉辐射谱线的干涉图像。通过对观测图像分析处理, 用高斯函数匹配干涉条纹强度分布以确定干涉条纹强度中心的精确位置, 进而求出谱线的多普勒频移, 反演出经向和纬向风速。经过理论推导, 求出 F-P 腔间距的漂移量对风速的影响, 对反演风速进行修正。由风速随时间变化曲线得到在观测期间, 经向风朝南, 大小在 4~67 m/s 间变化; 纬向风朝东, 大小在 20~100 m/s 间变化, 最小风速误差约为 6 m/s。

关键词: 高空大气风场; 多普勒频移; 法布里-珀罗干涉仪

中图分类号: O436.1; P356

文献标志码: A

Wind-velocity detection in upper atmosphere with scanning Fabry-Perot interferometer

ZHAO Zheng-qi, ZHOU Xiao-shan, AI Yong

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To detect the wind speed in upper atmosphere at 250 km over low and middle latitude area, a scanning Fabry-Perot interferometer was used to collect the interference images of the nightglow radiation spectral line of OI630 nm at the altitude of 250 km. By analyzing and processing the images, Gaussian function was adopted to match the intensity distribution of interference fringes to get the exact position of intensity center, and to derive Doppler shifts of the spectral line. Then the two vectors of wind in the directions of latitude and longitude were deduced, the effect of the drift vector of the space of Fabry-Perot etalons on wind velocity was derived by theoretical derivation, and the deduced wind velocity was amended. The result shows that during the measurement period, the longitude wind is towards south, estimated to be 4~67 m/s, the latitude wind towards east, estimated to be 20~100 m/s, and the error of wind velocity is about 6 m/s.

Key words: upper atmosphere wind; Doppler shift; Fabry-Perot interferometer

引言

80~300 km 高空是探空气球和卫星都无法进入的区域, 探空火箭虽可进入该区域探测, 但火箭留空时间太短, 仅能作短时间和局部空域的有限探测。因此, 该区域是目前人类对大气层认知最少的

区域。受来自下面的内部重力波和大气潮汐波的影响, 该区域高纬度大气风速可超过 300 m/s, 中低纬度风速也可达 100 m/s 以上, 号称大气层中的暴风层, 是航天发射的一个危险区域。随着我国航天活动的增加, 对于高层大气风场的观测和研究显得

收稿日期: 2006-07-06; 修回日期: 2006-08-16

基金项目: 863 计划资助项目

作者简介: 赵正启(1986-), 男, 山西定襄人, 本科生, 主要从事光信息科学与技术方向的学习和研究。

非常必要。该区域大气动力学研究与探测已成为大气科学的研究热点之一。

目前国际上探测该区域风场的常用方法是探测这个区域气辉辐射谱线的多普勒频移。由于太阳光的照射,大气层中存在十分微弱的气辉辐射。气辉光谱有产生高度约为 250 km 的 OI630 nm 和产生高度约为 100 km 的 OI557.7 nm 等谱线。当大气运动时,辐射谱线将产生多普勒频移。谱线频率的变化代表了大气的运动速度,谱线的展宽包含了大气的温度信息。利用高灵敏度法布里-珀罗干涉仪 (Fabry-Perot Interferometer, FPI) 对气辉辐射谱线的多普勒频移和谱线展宽进行精密测量,可以有效获取 80~300 km 高空大气风场和温度参数^[1-7]。

我国的大气风场测量已有几十年历史,但是大多数研究是针对对流层 (~15 km) 以下的风场测量,而对于中高层大气风场的研究则很少,特别是针对 250 km 高度左右的高空大气风场的实质性研究尚未在国内见报道。本文介绍利用扫描式 FPI 测量高空大气风场的原理以及风速反演理论,对实际观测数据进行处理,导出风速,分析数据处理的误差,并对结果进行了讨论。

1 测量原理

目前有 2 种 FPI 用于高空大气风场的探测。一种是全天空式 FPI,另一种是扫描式 FPI。全天空式 FPI 在仪器光学接收前端加装有大视场鱼镜头,能对仪器上方近 180° 的视场角空域同时成像,具有探测半径大,可得到大范围风场分布的特点;扫描式 FPI 是在小视场光学前端安装扫描镜,扫描镜对一定天顶角空域不同方向分时进行扫描,得到多点气辉辐射干涉环,通过联合分析这些干涉环可得到观测点上空风速大小及方向。它假设在一个扫描周期内各观测点风速大小及方向都恒定和相等,且垂直风速可忽略不计,这些条件在中低纬度区域基本能得到满足,在极区不适用。找出风速的 2 个相互垂直的分量(如经向和纬向分量),即可确定这 2 个分量上的风速。

本文分析扫描式 FPI 探测中低纬度区域 250 km 高空大气风速情况,其原理如图 1 所示。主要仪器部件有:扫描平面镜、物镜、孔径光阑、准直透镜、F-P 腔、聚焦透镜和 CCD 成像系统。整个系统严格矫正像差。物镜视场角为 9.5°,物镜前与光

轴成 25° 方位角放置一面扫描平面镜。FPI 工作时,扫描镜保持方位角不变,依次沿 N, E, S, W 扫描,在各方向曝光时间为 13.5 m。加上信号处理存储时间和扫描镜的转动时间,一个测量周期为 1 h,即仪器测量时间分辨率为 1 h。故 FPI 可在天顶角为 $50^\circ \pm 4.75^\circ$ 的 N, E, S, W 4 个方向上分别获取气辉辐射干涉环。成像装置为热电冷却 CCD (512 像素 × 512 像素,量化等级为 14 比特),比起液氮冷却 CCD,这种冷却方式可以有效防止 CCD 随温度的漂移。为了提高 CCD 读出速率,使用了 2×2 像素合并技术。聚焦透镜焦距为 470 mm。仪器详细说明见参考文献[5]。

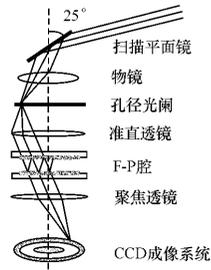


图 1 扫描式法布里-珀罗干涉仪测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of scanning Fabry-Perot interferometer

2 高层大气风速反演理论

考察扫描镜转向正北 N 时得到的干涉图像。对于条纹的干涉级 m ,由多光束干涉条件得

$$m = \frac{2nd}{\lambda_0} \sqrt{1 - (r_N/f)^2} \quad (1)$$

式中: n 为 F-P 腔内介质折射率; d 为 F-P 腔间距; λ_0 为产生干涉条纹的辉光辐射波长; r_N 为干涉圆环半径; f 为聚焦透镜焦距。

由于多普勒频移,辉光辐射波长变为

$$\lambda = \lambda_0 (1 + v_N \sin \theta / c) \quad (2)$$

式中: c 为光速; θ 为天顶角; v_N 为水平风速经向分量(南北向分量,取由南向北为正方向),此时条纹的干涉级 m 满足

$$m = \frac{2nd}{\lambda_0 (1 + v_N \sin \theta / c)} \left(1 - \frac{r_N^2}{f^2} \right) \quad (3)$$

同理,当反射镜转向正南 S 时,对相同的干涉级 m ,有

$$m = \frac{2nd}{\lambda_0 (1 - v_N \sin \theta / c)} \left(1 - \frac{r_S^2}{f^2} \right) \quad (4)$$

由(3)式和(4)式可以推出

$$v_N = \frac{c}{\sin \theta} \frac{r_S^2 - r_N^2}{4f^2 - (r_S^2 + r_N^2)} \quad (5)$$

并且可以得到 F-P 腔间距

$$d = \frac{m\lambda_0}{n} \frac{2f^2}{4f^2 - (r_S^2 + r_N^2)} \quad (6)$$

以上公式均没有考虑 F-P 腔间距由于温度变化导致的漂移量。而实际上,由于温度的改变,F-P 腔间距会随时间变化,对反演风速影响较大,必须予以补偿。利用(6)式对(5)式进行修正后,得到补偿 F-P 腔间距温漂后的经向风速为

$$v_N = \frac{c}{\sin \theta} \frac{r_S^2 - r_N^2}{4f^2 - (r_S^2 + r_N^2)} + \frac{c}{\sin \theta} \frac{(r_S'^2 + r_N'^2) - (r_S^2 + r_N^2)}{16f^2} \quad (7)$$

式中 r_N' 和 r_S' 分别为下一个周期对正北方向和正南方向天空成像时的圆环半径。

显然,(7)式中第一项为不考虑 F-P 腔间距的温漂求出的速度 v_{N0} ,第二项则是 F-P 腔间距的温漂导致的风速偏差 dv_N 。

同理可求出纬向风速,由经向和纬向 2 个分量可确定水平风场的风速。

3 实际观测及数据处理

由(7)式可知,反演风速需精确确定干涉圆环半径,本文只分析靠近干涉图像中心的 2 个干涉环。基本思路为:先对图像进行去噪处理;找出圆环中心位置,将截面强度分布沿圆周积分,提高信噪比,以减少随机误差;再对内外两环进行函数匹配,确定峰值位置,圆环半径即为峰值位置到圆环中心的距离;将半径代入(7)式,可得风速。

3.1 图像去噪处理

图2 为扫描式 FPI 接收到的辉光辐射在 CCD 上的干涉条纹。观测时间为 2001 年 3 月 26 日 10:20:00~10:33:30 UT (世界时),观测地点为日本信乐(Shigaraki, 34.8°N, 136.1°E),方向为正北(天顶角:50°±4.75°),曝光时间为 13.5 min,辉光波长为 630 nm。由于气辉辐射十分微弱,实际测量图像的条纹对比度很低,这里为了显示清晰,增强了图像的对比度。图中的白色斑点由宇宙射线引起。

宇宙射线的干扰使实际测量的图像带有噪声,仪器本身和周围环境的扰动也会给图像带来噪声,表现为局部光强发生突变。噪声会直接影响条纹强度峰值位置的确定。使用软件进行均平过滤和自适应

应过滤,去噪前后图像强度三维图对比如图 3 所示(强度量化等级为 14,无量纲)。

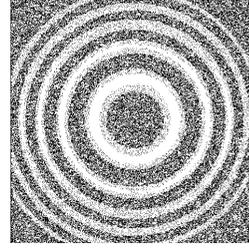
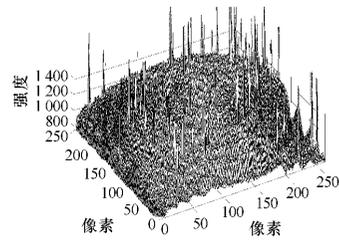
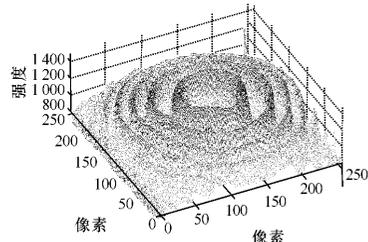


图 2 CCD 记录的辉光辐射干涉条纹

Fig. 2 Nightglow interference collected by CCD



(a) 原始图像



(b) 去噪后图像

图 3 处理前后图像强度三维图对比

Fig. 3 3-D image of intensity before and after noise subtraction

3.2 图像圆周积分

去噪后干涉圆环截面强度分布仍然部分不均匀。为消除这种不均匀性,以圆心为轴心,对各级圆环光强圆周积分后取均值,即得光强平滑分布。实现圆周积分必须精确确定圆环中心点坐标,本文采用迭代方式获取^[8],积分后结果如图 4 所示。

3.3 确定干涉圆环半径

积分后采用高斯函数匹配的方式,获取各级条纹的强度中心^[9]。由于强度值越小,受背景噪声的干扰相对越大,所以在用于匹配的点数目足够多的条件下,采用强度靠近峰值的区域进行匹配。对于

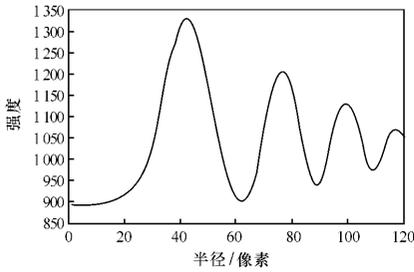


图4 圆周积分后的截面强度分布图

Fig. 4 The section intensity distribution after circular integration

内环条纹,由于强度较大,匹配点较多,可用强度峰

值一半范围内的点进行匹配;对于外环条纹,由于强度较小,匹配点较少,匹配时可视情况扩展范围。

3.4 确定风速

图5给出了2001年3月26日10-19 UT(世界时)期间250 km高空风速的计算结果,观测地点为日本乐。其中图5(a)和(d)分别是不考虑F-P腔的温漂时得到的风速值 v_{N0} 和 v_{E0} ; (b)和(e)分别是F-P腔的温漂导致的风速偏差 dv_N 和 dv_E ; (c)和(f)分别是补偿F-P腔温漂后的经向和纬向风速 v_N 和 v_E 。为区分同一时刻两环所得风速值及其误差范围,在图中对外环的观测时间轴进行了小量向右平移。

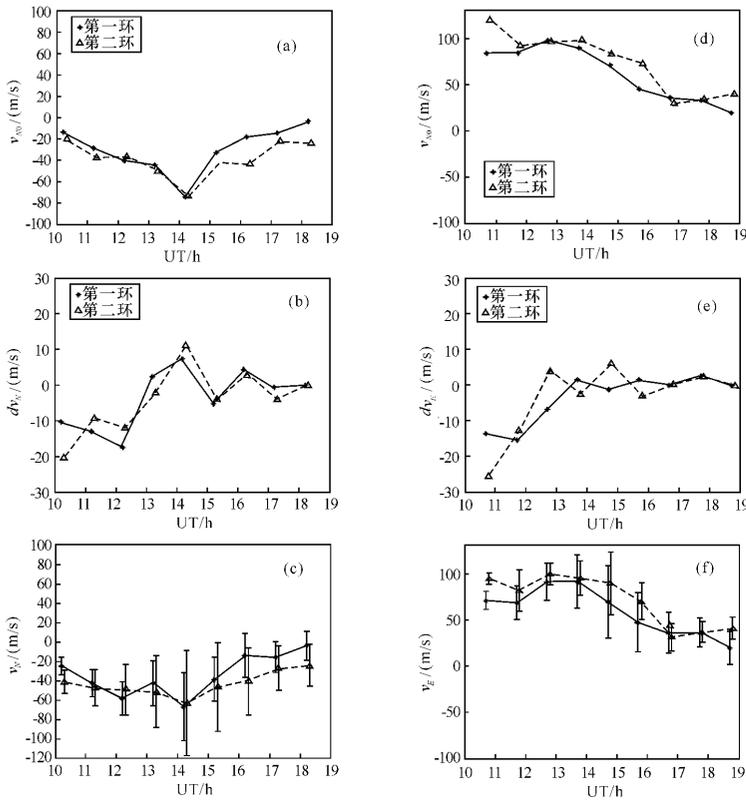


图5 经向风速和纬向风速

Fig. 5 Vectors of wind in directions of latitude and longitude

3.5 误差分析

设 v_N 的标准差为 σ_{v_N} , r_S 的标准差为 σ_{r_S} , r_N 的标准差为 σ_{r_N} ,由误差传递定律^[10]得

$$\sigma_{v_N} = \sqrt{\left(\frac{cr_S}{2f^2 \sin \theta}\right)^2 \sigma_{r_S}^2 + \left(-\frac{cr_N}{2f^2 \sin \theta}\right)^2 \sigma_{r_N}^2} \quad (8)$$

所得误差见图5(c)和(f)的误差范围,风速误差约为6~55 m/s。在成像良好的情况下,最小风速误差约为6 m/s,已接近目前的国际最高水平。

使用FPI测量大气风速的误差主要取决于干涉条纹的对比度,故应降低背景噪声,增大光通量。

可考虑在原有CCD的基础上,增加像增强管。使用同样的方法可处理557.7 nm的辉光干涉图像。由于其辐射高度较低,衰减较小,故条纹对比度较高,误差相对较小。

4 结论

本文介绍了采用扫描式FPI测量中低纬度地区250 km高空大气水平风速的一种方法,FPI测风技术有2个关键点,一是干涉环半径的精确测定,二是F-P腔的高稳定性。虽然FPI的F-P腔带有精密温控系统,但F-P腔间距在长时间工作中仍存在漂移现象,它引起的测量误差可达25 m/s。由于漂移量很难直接精确测定,本文推导出了F-P腔间距与干涉环半径的关系,求出各个时间的漂移量,从而对风速进行了修正。

本文计算出的风速变化曲线和风速误差结果与日本Shiokawa博士计算出的结果非常一致,与日本MU雷达同时进行的风速测量结果也大致相同,这证明了本文的数据分析及处理方法的正确性。高空大气风场的测量对于我国航天事业有重要的意义,本文为国内首次对高空气辉辐射干涉条纹进行的独立分析与求解,为我国发展高精度高空大气风场观测提供了有益参考。

致谢:感谢日本名古屋大学Shiokawa博士提供的原始观测图像,以及对本文的完成进行的有益讨论。

参考文献:

[1] HIRSCHBERG J G, PLATZ P. A multichannel Fabry-Perot Interferometer[J]. *Applied Optics*, 1965, 4(11):1375-1381.

[2] NAKAJIMA H, OKANO S, FUKUNISHI H, et al. Observations of thermospheric wind velocities and temperatures by the use of a Fabry-Perot Doppler imaging system at Syowa Station, Antarctica [J].

Applied Optics, 1995, 34(36): 8382-8395.

- [3] FISHER G M, KILLEEN T L, WU Q, et al. Polar cap mesosphere wind observations: comparisons of simultaneous measurements with a Fabry-Perot interferometer and a field-widened Michelson interferometer[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(24): 4284-4291.
- [4] BIONDI M A, SAZYKIN S Y, FEJER B G, et al. Equatorial and low latitude thermospheric winds: measured quiet time variations with season and solar flux from 1980 to 1990[J]. *J Geophys Res*, 1999, 104(A8): 17091-17106.
- [5] SHIOKAWA K, KADOTA T, OTSUKA Y, et al. A two-channel Fabry-Perot interferometer with thermoelectric-cooled CCD detectors for neutral wind measurement in the upper atmosphere [J]. *Earth Planets Space*, 2003, 55(5): 271-275.
- [6] SHIOKAWA K, KADOTA T, EJIRI M K, et al. Three-channel imaging Fabry-Perot interferometer for midlatitude airglow measurement [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(24): 4286-4296.
- [7] 余亮英, 陆继东, 陈文, 等. 用激光感生击穿光谱对大气进行定量分析[J]. *应用光学*, 2006, 27(2): 147-151.
- YU Liang-ying, LU Ji-dong, CHEN Wen, et al. Quantitative analysis of atmosphere by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(2): 147-151. (in Chinese)
- [8] KUBOTA M. A Study on middle-scale variations of thermospheric neutral winds associated with auroral activity over Syowa station, Antarctica [D]. Japan: Tohoku University, 1996.
- [9] KILLEEN T L, HAYS P B. Doppler line profile analysis for a multichannel Fabry-Perot interferometer[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(4):612-620.
- [10] 王武杰, 徐定杰, 陈健翼. 误差原理与数据处理 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.
- WANG Wu-jie, XU Ding-jie, CHEN Jian-yi. Error principle and data processing [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001. (in Chinese)