0254-6124/2011/31(6)-784–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Han Weihua, Lü Jiangong, Wang Yongmei, Du Shusong. Image data processing of spaceborne Fabry-Perot interferometer prototype. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(6): 784-788

Fabry-Perot 测风干涉仪数据处理

韩威华[1,2,3] 吕建工[2] 王咏梅[2] 杜述松[2]

1(中国科学院研究生院 北京 100049)

2(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

3(北京航天飞行控制中心 北京 100094)

摘 要 针对自主研制的星载法布里–珀罗干涉仪 (Fabry-Perot Interferometer, FPI) 样机, 介绍了 Fabry-Perot (F-P) 的测风原理和风速反演算法, 阐述了 F-P 测风干涉数据的自动化处理方法, 包括干涉条纹图像滤波、分割、细化和特征数据的提取. 滤波包括中值滤波和背景补偿, 分割采用区域平均灰度值阈值法, 借助数学形态学计算填充和消除二值化条纹的断裂点和毛刺. 最后, 按照骨架提取思想细化成干涉条纹线条, 提取其特征数据. 应用 VC++ 编程语言开发软件平台, 对上述 F-P 测风仪数据自动化处理方法进行了验证, 结果表明其可行性高、适应性强.

关键词 F-P 测风, 图像分割, 数学形态学计算, 图像细化, 干涉图特征数据

中图法分类号 P 353

Image Data Processing of Spaceborne Fabry-Perot Interferometer Prototype

HAN Weihua[1,2,3] LÜ Jiangong[2] WANG Yongmei[2] DU Shusong[2]

1(*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

2(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

3(*Beijing Aerospace Flight Control Center, Beijing* 100094)

Abstract Fabry-Perot Interferometer (FPI) is one of the best detectors to explore the middle and upper atmosphere wind. A spaceborne FPI prototype with a large diameter telescope was designed and constructed and the image of interference fringe was acquired. This paper introduces the principle of FPI and a feasible inversion algorithm of the wind velocity in the middle and upper atmosphere. A technique for F-P interference fringe auto-processing is developed. The technique includes filtering, segmentation, thinning, and extracting of interferogram characteristic data. Filtering is composed of median filtering and background compensation. Binary fringe is obtained through selecting the area mean gray scale as threshold for segmentation. Mathematical morphology is fitting for restoring rupture and burr. As thinning is essential for the accuracy of inverting middle and upper atmosphere wind, thinning is discussed in details. Skeletonization thinning is put into practice. At last, characteristic data such as center of circle and radius are extracted. Visual C++ is adopted to develop

2010-05-18 收到原稿, 2011-03-30 收到修定稿

E-mail: mengzhe1983@126.com

the FPI interference fringe image process software, and the technique mentioned above has good performance in experimental practice.

Key words FPI prototype, Image inversion, Segmentation, Image thinning, Interferogram characteristic information

1 引言

大气风场是中高层大气的基本参量, 在中高层大气以及上下层之间能量和动量的输运以及大气成分的传输过程中起着巨大作用, 其探测结果可为空间天气研究提供重要数据. 另外, 中高层大气风场影响到各种航天器的再入过程, 对航天器回落点的精度以及飞行器安全等都有很大影响, 也是实现导弹等精确命中目标必不可少的重要参数.

中高层大气探测有两种途径, 一是利用高空气球、火箭和人造卫星等进行直接和遥感测量; 二是依靠地面综合观测台站, 进行长期的系统观测 [1]. 卫星遥感探测范围全球覆盖, 探测数据重复采集、动态监测, 探测过程受地面环境的影响小, 是获得全球中层大气风场的主要手段. 为提高中国各类航天器发射的安全性及准确性, 为空间天气研究提供可靠数据, 需要研制中高层大气风场的星载探测仪器.

中高层大气星载探测技术在国际上已取得极大成功 [2−3], 2001 年 12 月, NASA 开发研制的新一代高分辨率 Fabry-Perot (F-P) 干涉式光谱成像仪 (TIMED Doppler Interferometer, TIDI) 成功搭载于 TIMED 卫星, 是目前在轨运行的主要星载中高层大气测风仪器, 对中高层大气、热层大气的水平风场、温度和微量成分进行全天候的全球测量 [4]. 在中国, 中高层大气星载探测技术不断发展 [5], 中国科学院空间科学与应用研究中心研制的中高层大气星载 F-P 测风干涉仪样机, 由望远镜和干涉系统两部分组成, 采用日本滨松公司 512 pixel × 256 pixel 的面阵 CCD 作为探测器, 在地面实验室完成获取干涉条纹图像工作 [6] (见图 1). 本文针对该样机进行风速反演计算, 即研究干涉条纹图像处理和特征信息提取的技术, 并进行算法验证.



图 1 FPI 样机获取的干涉条纹图像

Fig. 1 Interferogram from FPI prototype

2 风速反演原理

被动式探测大气风场的光源为气辉, 气辉的两条主要谱线 O (^{1}S) 和 O (^{1}D) 来源于亚稳态原子氧的跃迁, 包括从 O (^{1}S) 态跃迁到 O (^{1}D) 态产生的 577 nm 光子谱线和从 O (^{1}D) 态跃迁到基态产生的 630 nm 谱线. 亚稳态原子氧在辐射前与周围粒子多次碰撞, 处于热平衡状态, 有一个整体的运动速度, 即为要测量的中高层大气风场的速度 (简称风速)[7].

应用 Fabry-Perot 干涉仪 (FPI) 测量气辉, 获取气辉的干涉图, 应用多普勒频移, 则可以反演出风速. 考察原理样机扫描镜转向正北 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到 [8]

$$m = \frac{2nd}{\lambda}\sqrt{1-(r_{\rm n}/f)^2}. \tag{1}$$

其中, n 为 FPI 腔内介质反射率, d 为 FPI 腔间距, λ 为产生干涉条纹的气辉光辐射波长, $r_{\rm n}$ 为干涉圆环半径, f 为聚焦透镜焦距.

由于多普勒频移, 气辉光辐射波长变为

$$\lambda = \lambda_0(1+v_{\rm n}\sin\theta/c). \tag{2}$$

式 (2) 中, λ_0 为没有发生 Doppler 频移的波长值, λ 为发生 Doppler 频移后的波长值, c 为光速, θ 为天顶角, $v_{\rm n}$ 为水平风速的经向分量 (南北向分量, 由南向北设为正方向).

$v_{\rm n}\sin\theta \ll c$, 波长的变化量微小, 相应产生的干涉曲线漂移也微小. 由于 $r_{\rm n}/f \ll 1$, 运用 Taylor 公式, 此时式 (1) 可转化为

$$m = \frac{2nd}{\lambda_0(1+v_{\rm n}\sin\theta/c)}\Big(1-\frac{r_{\rm n}^2}{2f^2}\Big). \tag{3}$$

式 (3) 中搭建 F-P 测风干涉仪样机的标准具间距即腔间距 d 为 22 mm, 反射率 n 为 0.85, 波长 λ_0

为 630 nm, 系统焦距 f 为 595 mm[6]. 式 (3) 说明中高层大气风速反演只需从图像中提取 r_n 和相应 m 的值即可. 处理图 1 所示的 F-P 干涉条纹图像的目标是提取其半径.

3 干涉条纹图像处理

3.1 滤波

图 1 的干涉条纹图像主要存在两种噪声的影响, 一种是随机的, 例如 CCD 噪声、量化噪声、镜头污点等; 另一种是背景噪声, 例如产生干涉的两束光光强分布不均匀、干涉图像背景亮度不均匀等. 本文通过中值滤波滤除随机噪声, 采用 3 pixel × 3 pixel 模板进行中值滤波后的结果如图 2 所示.

背景噪声采用背景补偿处理, 这里将图像分成大小相同的子图像 (3 pixel × 3 pixel), 取每个区域灰度的最小值作为其背景值, 从原始子图像灰度中减去该最小值. 这种非线性确定背景值的方法可抑制背景亮度不均匀对图像成像过程的影响, 提高图像对比度, 还尽可能保留了图像本身细节. 背景补偿结果如图 3 所示.

3.2 图像分割

图 3 目标条纹比较明显, 但还不能完全识别哪些像素是目标条纹点, 哪些是背景点. 图像分割常用方法是确定阈值, 进行分割.

本文采用基于区域 (3 pixel × 3 pixel) 的阈值分割方法, 将图像分成多个区域, 每个区域分别进行分割处理, 得到整体分割效果. 对比度比较好的干涉条纹图像取图像灰度均值就能将条纹分割出来, 称为平均灰度值阈值法图像分割 [9]. 图 3 的区域平均灰度值阈值分割结果见图 4.

3.3 数学形态学计算

图 4 与初始的图 1 相比, 连通性发生的变化需要修复. 修复方法为填充图 4 的断裂点和去掉毛刺, 借助数学形态学计算来达到这一目标. 数学形态学定义了两个基本运算以及两个组合运算, 即开运算和闭运算, 腐蚀和膨胀 [10]. 腐蚀是一种使边界向内部收缩的过程, 膨胀是腐蚀运算的对偶. 开运算可以消除毛刺、切断细长粘连而达到分离作用, 闭运算填充孔洞、连接小的间隙而达到连通作用. 图 5 所示为进行闭运算的结果. 在图 5 基础上进行开运算的结果示于图 6.

3.4 细化

图 6 的干涉条纹粗、宽而且边缘弥散, 不细化成线状则无法精确取干涉圆环半径进行风速反演计算. 本文采用一种比较实用的重复剥离二值图像边界元素骨架提取的细化算法, 处理结果如图 7 所示.



图 2 中值滤波结果

Fig. 2 Median filtered interferogram



图 3 背景补偿结果

Fig. 3 Background compensated interferogram

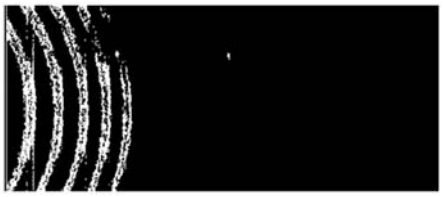


图 4 区域平均灰度值阈值分割结果

Fig. 4 Threshold segmented interferogram by area mean gray scale



图 5 闭运算操作结果

Fig. 5 Close operated interferogram

4 干涉条纹特征数据提取

4.1 条纹修整

图 7 干涉圆环存在着分叉和桥连等缺陷, 需要进行条纹修整. 采用数学形态学开运算消除线条分叉和桥连. 因条纹成垂直走向, 消除的则是水平方向的分叉和桥连, 进行垂直方向的开运算. 条纹修整结果如图 8 所示.

4.2 提取半径

如图 8 所示, F-P 干涉条纹图像经过处理和细化, 成为一个像素宽度的骨架. 进行风速反演, 只需要在图 8 上提取干涉圆环半径. 提取半径, 首先需得到干涉条纹的圆心.

针对图 8 干涉条纹的非闭合性, 本文提出其圆心确定方法为, 在圆环上等间隔选取一些点, 分别作其法线, 则法线两两相交的交点会分布在一个范围内, 该范围的中心点即为干涉条纹的圆心. 理论上, F-P 干涉条纹是一系列同心圆, 如图 9 所示.



图 6 开运算操作结果

Fig. 6 Open operated interferogram

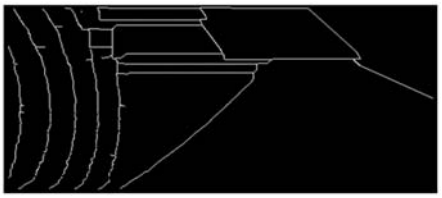


图 7 图像细化结果

Fig. 7 Thinned interferogram



图 8 条纹修整结果

Fig. 8 Repaired interferogram

图 9 圆心的确定方法为, 在图上先选择一个近似的中心点, 用一条过该点的水平直线将图像分为两半, 假设水平直线与干涉条纹 (最靠近中心的两组干涉环) 的 4 个交点坐标为 A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}, 圆心横坐标为

$$C_x = \frac{A_{11} + A_{12} + A_{21} + A_{22}}{4}. \tag{4}$$

再过横坐标 C_x 作一条垂直线, 采用上面相同的方法可以得到垂直直线与干涉条纹 (最靠近中心的两组干涉环) 的 4 个交点坐标为 B_{11}, B_{12}, B_{21}, B_{22}, 圆心纵坐标为

$$C_y = \frac{B_{11} + B_{12} + B_{21} + B_{22}}{4}. \tag{5}$$

再过纵坐标 C_y 作一水平直线, 用同样的方式重新确定 C_x, 重复该过程, 直至每相邻两次 C_x, C_y 的变化达到设置的条件范围内, 则相邻两次确定的圆心都非常接近理论圆心, 此时迭代结束, (C_x, C_y) 即为干涉条纹圆心坐标. 确定了圆心, 然后确定干涉条纹的半径. 实际测量中存在着诸多使干涉图变形的因素, 本文设计的方法是, 从圆周上取多个点分别计算出各自半径, 确定干涉条纹半径为各所得半径的均值.

理论上, 闭合干涉条纹的半径提取比非闭合的精度高, 进一步的分析有待于在对多幅样本图像处理后进行.

4.3 精度分析

像素是组成图像的基本单位, 即图像的分辨率, r_{n} 理论值为条纹中心线的像素半径. 滤波、局部区域阈值分割以及细化算法均未产生 r_{n} 的误差. 本文提出的干涉条纹自动化处理方法计算的 r_{n} 误差在 1 pixel 以内, 半径数据提取精度的分析有待在今后工作中进行.

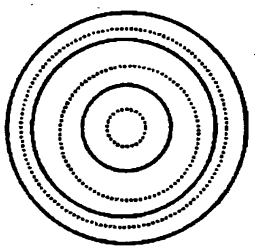


图 9 FPI 干涉条纹

Fig. 9 FPI interferogram

F-P 测风干涉仪投入卫星遥感工程应用, 还需要考虑高空温度变化带来腔间距 d 的变化量, 该变化量对风速反演计算影响较大, 其变化规律研究有待进一步展开.

5 结束语

针对中国第一台自行设计中高层大气星载 F-P 测风干涉仪样机获取的干涉图像, 介绍了样机的风速反演原理, 研究了干涉条纹图像处理算法, 给出确定其圆心和半径的方法. 应用 VC++ 编程语言开发软件平台, 验证了 F-P 测风仪数据自动化处理方法可行性高、适应性强, 该方法的系统提出是中国自主开展中高层大气风场卫星遥感探测的有益尝试.

FPI 测风技术有两个关键点: 一是干涉条纹半径的确定, 二是 F-P 腔间距随温度变化的规律. 在进一步工作中, 这两个关键点还需要分别展开着重研究.

参考文献

[1] Liu Zhenxing, *et al.* Space Physics [J]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005. In Chinese (刘振兴, 等. 太空物理学 [J]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005)

[2] Shepherd G G, *et al.* WINDII, the imaging interferometer on the upper atmosphere research satellite [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:10 725-10 750

[3] Hays P B. Abreu V J, *et al.* The high resolution Doppler imager on the upper atmosphere research satellite [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:10 713-10 723

[4] Timothy L. Killeen, Wilbert R, *et al.* Kafkalidis. TIMED Doppler Interferometer (TIDI) [R]. SPIE99, 1999

[5] Wang Yongmei, Fu Liping, Du Shusong, Wang Yingjian. Development for detecting upper atmospheric wind and temperature from satellite [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(1):1-5. In Chinese (王咏梅, 付利平, 杜述松, 王英鉴. 中高层大气风场和温度场星载探测技术研究进展 [J]. 空间科学学报, 2009, **29**(1):1-5)

[6] Du Shusong, Wang Yongmei, Wang Yingjian. Research on measurement technology of middle and upper atmosphere velocity [G]//The 22nd Annual Meeting TECHNOLOGY of Space Exploration Committee, Chinese Society of Space Research, 2009. 57-61. In Chinese (杜述松, 王咏梅, 王英鉴. 中高层大气风场测量技术的研究 [G]//中国空间科学学会空间探测专业委员会第二十二次学术会议论文集, 2009. 57-61)

[7] Zhang Chunmin, Xiang Libin, Zhan Baochang. Velocity and temperature measurement of upper atmosphere wind field using Fabry-Perot Interferometer [J]. *J. Xi'an Jiaotong Univ.*, 2000, **34**(4): 97-99. In Chinese (张淳民, 相里斌, 赵葆常. 用 Fabry-Perot 干涉仪测量上层大气风场的速度和温度 [J]. 西安交通大学学报, 2000, **34**(4):97-99)

[8] Zhao Zhengqi, Zhou Xiaoshan, Ai Yong. Wind-velocity detection in upper atmosphere with scanning Fabry-Perot interferometer [J]. *J. Appl. Opt.*, 2006, **27**(6):558-562. In Chinese (赵正启, 周小珊, 艾勇. 扫描式法布里 - 珀罗干涉仪测量高空大气风速 [J]. 应用光学, 2006, **27**(6):558-562)

[9] Yan Jingzhou, Lei Fan, Zhou Bifang. A method for automatic extracting of characteristic information in interferogram analysis [J]. *Opt. Tech.*, 2000, **26**(1):71-75. In Chinese (鄢静舟, 雷凡, 周必方. 干涉图特征信息自动采集方法 [J]. 光学技术, 2000, **26**(1):71-75)

[10] Liu Libo. On Mathematical Morphology of Binary Image Processing and Analysis [D]. Xi'an: Northwest University, 2002. In Chinese (刘立波. 数学形态学在二值图像处理与分析中的研究及应用 [D]. 西安: 西北大学, 2002)