**文章编号**:1002-2082(2011)05-0926-05

# 大气风场和温度场星载探测光谱仪的星上定标技术

石大莲[1,2],白清兰[1],冯玉涛[1],汶德胜[1]

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西　西安　710119;
2. 中国科学院 研究生院,北京　100049)

摘　要:大气风场和温度场是重要的大气基本参数,由于应用领域广泛,其探测技术在很多国家已发展成熟,中国对该探测技术的需求也日趋强烈。大气风场和温度场测量是利用高精度的光谱仪,通过测量大气中特征谱线的多普勒频移和展宽,来确定大气的温度分布场和风向风速场。星上定标技术是大气风场和温度场星载探测光谱仪进行高精度测量的基本保障。文中就几种重要的大气风场和温度场探测光谱仪的星上定标技术进行分析和总结,为大气风场和温度场探测技术发展提供参考,打下基础。

关键词:大气风场;大气温度场;星上定标;多普勒频移;气辉谱线

**中图分类号**:TN206;P353　　**文献标志码**:A

# In-flight calibration of atmospheric wind and temperature measurement spectrometer

SHI Da-lian[1,2], BAI Qing-lan[1], FENG Yu-tao[1], WEN De-sheng[1]

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract**: The atmospheric wind fields and temperature fields are important atmospherical parameters. The atmospheric wind and temperature measurement technology was already developed in many nations for years, and there is increasingly demanded in China now. Atmospheric wind and temperature are measured by the spectrometers of high spectral resolution, which detects the Doppler line shift and expanding of the special spectrum line in the atmosphere. The in-flight calibration technology is critical for high resolution measurement of the atmospheric wind. Several typical atmospheric wind measurement spectrometers are reviewed, analyzed and summarized. The in-flight calibration technology used in these spectrometers is given.

**Key words**: atmospheric wind field; atmospheric temperature field; in-flight calibration; Doppler line shift; airglow spectrum line

## 引言

大气风场和温度场星载探测光谱仪主要通过观测大气中气辉谱线的多普勒频移和展宽来确定风速、风向及温度,同时还可以探测某些原子或者分子的浓度,用于分析大气能量转换和动力过程以及大气的组成,因而在军事、国家安全、环境保护、航空航天等方面有着广泛的应用前景[1]。

大气风场和温度场星载探测光谱仪要得到量

**收稿日期**:2010-10-25;　**修回日期**:2010-11-26
**基金项目**:中国科学院空间科学预先研究项目(Y029H51213)
**作者简介**:石大莲(1982－),女,贵州思南人,助理研究员,在读博士,主要从事干涉光谱仪定标及数据处理工作。
E-mail:lotus@opt.ac.cn

化应用,必须对其进行定标,建立仪器输出数据与仪器入瞳处的输入之间的关系。由于发射过程的超重力作用、环境的变化、仪器故障或者老化等,光谱仪进入轨道后需要对其进行星上定标,定期监测仪器性能参数的变化情况。本文主要就几种重要的大气风场和温度场星载探测光谱仪的星上定标进行分析和总结,为我国的大气风场和温度场星载探测技术的发展奠定基础。

## 1 大气风场和温度场星载探测光谱仪的星上定标

在中间层大气,水平方向 10 m/s 的风速引起的多普勒频移仅为 $10^{-5}$ nm[2],因此大气风场星载探测要求探测系统具有极高的光谱分辨能力,干涉光谱仪由于其多通道、高通量、高光谱分辨率而成为目前探测大气风场和温度场的重要手段,主要有 Michelson 干涉和 Fabry-Perot 干涉两种基础模型。其中 Fabry-Perot 干涉由于是多光束干涉,干涉条纹精细度大大高于前者,因此在精细光谱研究上占有优势。但其缺点是视场小,对温度控制要求较高,装调难度也相对较大[1]。

由于探测目的不同,大气风场和温度场星载探测光谱仪的星上定标与普通的光谱仪在定标方法上也有一些不同之处:

1) 不需要绝对定标,但相对定标很重要;

2) 由于谱线位置的微小变化都影响到风速的计算结果,光谱定标对其而言尤为重要。

1991 年,加拿大、法国与 NASA 联合研制的风成像干涉仪(wind imaging interferometer, WINDII)[3]是一款利用迈克尔逊干涉原理进行大气风场星载探测的光谱仪,搭载于上层大气研究卫星 UARS 上,到目前已传回了大量的风场资料图片,并初步反演出了高层大气的温度与多普勒风速。WINDII 的星上定标装置主要包括[4-5]:

a) 响应度参考源 钨灯是一种宽谱光源,对钨灯的响应变化可以反映系统在整个钨灯谱段范围内的响应度变化。为了消除钨灯本身的变化的影响,用一个光电二极管来对其进行监测。

b) 分辨率参考源 He-Ne 激光器。其稳定性达到 $10^{-8}$,半高宽为 WINDII 自由光谱范围(9 pm)的千分之一级。

c) 相位参考源 光谱灯 3 个,分别是 Kr 灯、Ne 灯及 Ar 灯。选择这 3 个惰性气体是因为它们的特征峰与待测的谱线接近。这样有利于相位计算。

HRDI(high resolution Doppler imager)是与 WINDII 搭载在同一颗卫星 UARS 上的另外一台大气风场和温度场星载探测光谱仪。HRDI 采用的是 Fabry-Perot 干涉原理,采样了 31 个波长,每个波长点的光谱宽度仅为 0.001 nm[6-7]。在此之前的另外一台同样基于 Fabry-Perot 干涉原理的大气星载探测光谱仪 DE-FPI[8]为 HRDI 的研发打下了坚实的基础。HRDI 由 DE-FPI 的单标准具发展为 3 个标准具,提高了条纹对比度和分辨率。

HRDI 的星上定标光源是通过一个转镜进入仪器视场的,实现了全口径的星上定标。HRDI 的星上定标成功地对仪器发射以来的性能进行了实时的监控,并表明仪器发射后一直保持着较好的稳定性。虽然存在 30 m/s/C 的热漂移和长期时间漂移 80 m/s,但是这些影响都可以通过数据处理消除,剩余 2 m/s 仪器稳定性的不确定度。星上定标还显示仪器的灵敏度变化很小,探测器响应没有降低,光学系统的透过率没有变化[9]。

HRDI 的星上定标设备主要包括 4 个灯:一个 Neon 灯、一个混合了氦、氩、氪 3 种惰性气体的灯 HAK 及两个白光灯。气体受到激发会发射谱线。HAK 灯是为大气风场和温度场探测光谱仪特别设计的光谱定标灯,它发出的参考谱线的位置非常接近大气中的特征谱线。这些谱线经过滤光片轮后,只剩下一根谱线通过光学系统。这种灯在 TIDI 的光谱定标中也得到了应用。

在 DE-FPI 和 HRDI 成功应用的基础上,美国进一步开发研制了新一代的高分辨率 F-P 干涉式光谱成像仪 TIMED Doppler interferometer(TIDI),并于 2001 年 12 月成功搭载于 TIMED 卫星上[11]。TIDI 的目的是测量中间层和低热层水平矢量风场和成分。TIDI 的定标是与 4 个望远镜同时通过光纤束进入系统视场成像在探测器上的,定标视场在最靠近中心的地方,其他 4 个望远镜视场分别成环形环绕在定标视场外,5 个视场之间有 50 μm 的间隔,如图 1 所示[12]。最后经过一个如

图 2 所示的环转线锥形镜,得到如图 3 所示的干涉条纹图像。TIDI 通过光纤连接的设计避免了部件运动,提高了系统的稳定性,但无法实现全口径定标。

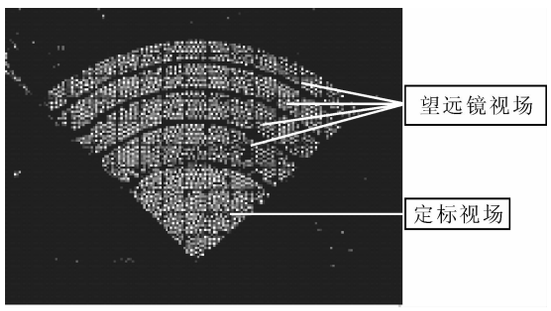


**图 1 经过光纤束输出的视场示意图**

**Fig. 1 Fields output of the fiber bundle**

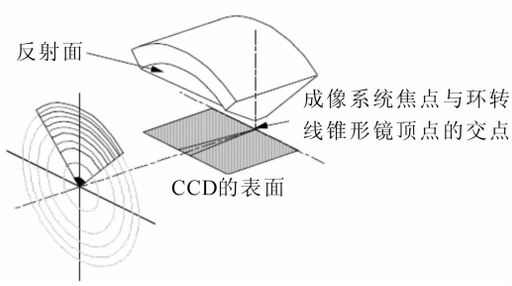


**图 2 环转线镜原理示意图**

**Fig. 2 Schematic diagram of the circle-to-line imaging optics**

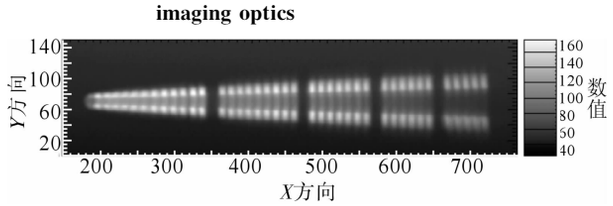


**图 3 TIDI 探测器得到的 5 个视场的干涉条纹,X 方向最左边的是定标视场**

**Fig. 3 Fringe pattern of the five fields of TIDI, left on the x direction is the calibration field**

TIDI 的星上定标遵循的原则[13]:

每次定标不超过 5 分钟;

定标将在黎明或傍晚进行,耗时少的定标任务安排在黎明进行;

定标流程每天重复进行。

TIDI 的星上定标基本沿用了 HRDI 的装置,主要包括:一个钨灯作为辐射定标光源;一个氖灯;一个 HAK 灯;两个 8 片式滤光片轮,滤光片的位置情况如图 4 所示。

TIDI 的滤光片轮上有一个带通滤光片,如图 5 所示,它使处于仪器响应范围内(500 nm～900 nm)的白光通过。其他的 7 片滤光片为窄带滤光片,用于只让 $O_2$(0－0)谱线通过的窄带滤光片,如图 6 所示。这些滤光片与光轴成 1°角,这样就可以把反射光引出光路。所有滤光片都由金属氧化物架构,抗震性和耐热性非常好,TIDI 的滤光片的热漂移要比 DE-FPI 和 HRDI 中的滤光片要小 10%,大大减少了对仪器热控的要求。TIDI 的温控要求为工作温度 20℃±5℃[12]。

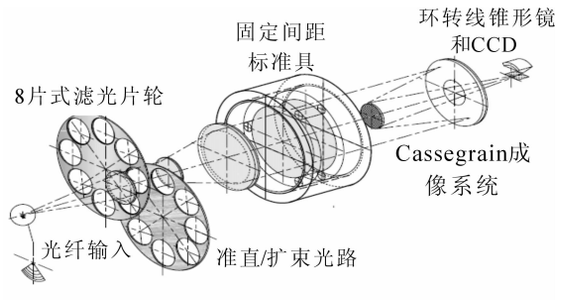


**图 4 TIDI 的系统组成示意图**

**Fig. 4 System layout of TIDI**

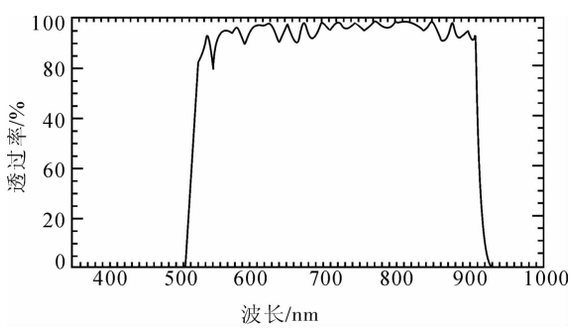


**图 5 带通滤光片的透过率曲线**

**Fig. 5 Transmission curve of the wideband blocker**

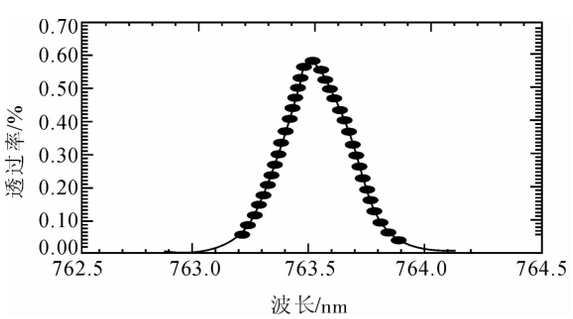


**图 6 窄带滤光片的透过率曲线**

**Fig. 6 Transmission curve of the narrow band filter**

在 TIDI 的运行过程中,发现系统透过率严重下降,然后通过星上定标确定了系统透过率下降的原因。采用的方法是对比用同一个氖灯,同一个 630 nm 滤光片,2001 年 11 月 14 日卫星刚刚发射的图像及 2002 年 7 月 21 日发射 8 个月后的图

像,如图 7 与图 8 所示。

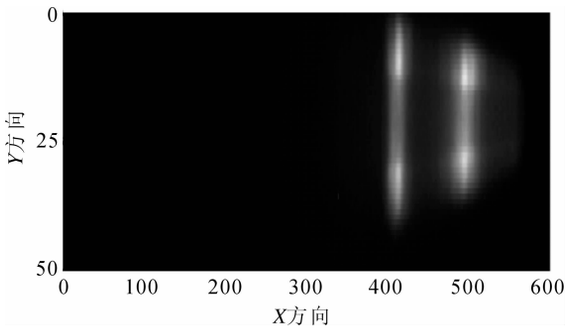


**图 7 刚发射后氖灯定标图像**

**Fig. 7 Calibration image obtained shortly after launch using the neon lamp and the 630 nm filter**

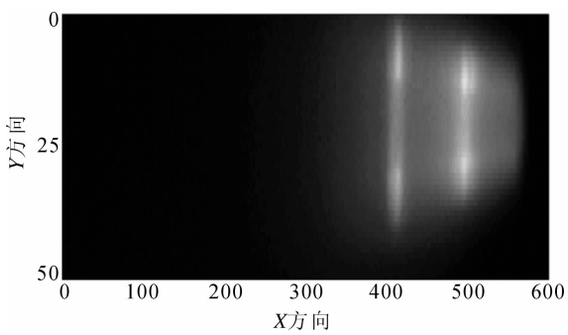


**图 8 发射 8 个月后的氖灯定标图像**

**Fig. 8 Calibration image obtained 8 months after launch using the same lamp and filter**

对比图 7 和图 8,可以看出发射 8 个月后的氖灯定标图像中信号峰值变弱,谱线变宽,图像变得模糊,但是通过数据分析发现曲线积分值没变。这表示系统的响应和入射部分没有问题,而是前向散射污染造成的,很可能是由于在某个光学零件上有霜。这一问题最终通过加热除霜后得以解决[14]。

## 2 总结

事实证明,星上定标能够对在轨时的仪器性能指标进行实时观测,对分析一些突发状况的原因起到至关重要的作用,并有助于找到解决方案。对于大气风场和温度场星载探测光谱仪这样一种精密仪器,星上定标更是必不可少。

大气风场和温度场探测要求探测系统具有极高的光谱分辨能力,因此无论是基于 Michelson 干涉原理还是 Fabry-Perot 干涉原理,都对光谱定标有很高的要求。对于辐射定标,由于大气风场和温度场探测不是通过光谱的绝对形状,而是通过光谱的相对变化来计算风速和温度,从而相对定标的意义和重要性都比绝对定标要大。因此,我国的大气风场和温度场星载探测光谱仪的定标也应该基于这个基本思路,借鉴国外先进技术,研究具有高稳定度、具有与目标谱线相近参考谱线的光谱定标光源,设计尽可能全光路的定标光路,通过高精度的相对定标方法,为仪器的正常运行和使用提供保障。

**参考文献:**

[1] 王咏梅,付利平,杜述松,等. 中高层大气风场和温度场星探测技术研究进展[J]. 空间科学学报,2009,29(1):1-5.
WANG Yong-mei, FU Li-ping, DU Shu-song, et al. Development for detecting upper atmospheric wind and temperature from satellite[J]. Chin. J. Space Sci., 2009, 29(1):1-5. (in Chinese with an English abstract)

[2] SKINNER W R, HAYS P B, GRASSL H J, et al. High-Resolution doppler imager on the upper atmosphere research satellite [J]. SPIE, 1994, 2266: 281-293.

[3] SHEPHERD G, THUILLIER G, GAULT W A, et al. WINDII, the imaging interferometer On the UARS[J]. J. Geophys. Res., 1993, 98:10725-10750.

[4] THUILLIER G, GAULT W, BRUN J, et al. In-flight calibration of the wind imaging interferometer (WINDII) on board the upper atmosphere research satellite[J]. Applied Optics, 1998, 37(8):1356-1369.

[5] HERSOM C H, SHEPHERD G G. Characterization of the wind imaging interferometer[J]. Applied Optics, 1995, 34(16):2871-2879.

[6] SCHOEBERL M R, DOUGLASS A R, JACKMAN C H. Overview and highlights of the UARS mission [J]. SPIE, 1994, 2266: 254-265.

[7] HAYS P B. High-resolution optical measurements of atmospheric winds from space. 1: Lower atmosphere molecular absorption[J]. Applied Optics, 1982, 21: 1136-1141.

[8] HAYS P B, KILLEEN T L, KENNEDY B C. The Fabry-Perot interferometer on dynamics explorer[J]. Space Science Instrumentation, 1981, 5:395-416.

[9] HAYS P B, ABREU V J, DOBBS M E, et al. The high resolution doppler imager on the upper atmosphere research satellite[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98: 10713-10723.

[10] GRASSL H J, SKINNER W R, HAYS P B, et al. Atmospheric wind measurements with the high resolution doppler imager (HRDI) [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1995, 32(1):169-176.

[11] YEE J H, CAMERON G E, KUSNIERKIEWICZ D Y. Overview of TIMED[J]. SPIE, 1999, 3756: 244-254.

[12] KILLEEN T L, SKINNER W R, JOHNSON R M, et al. TIMED doppler interferometer (TIDI)[J]. SPIE, 1999, 3756:289-301.

[13] SKINNER W R. Tidi felight calibration sequence [EB/OL]. US:University of Michigan Space Physics Research Laboratory, 2002. [2010-11-01]. http://tidi.engin.umich.edu/scripts/info/docs.pl.

[14] SKINNER W R, NICIEJEWSKIR J, KILLEEN T L, et al. Operational performance of the Timed doppler interferometer (TIDI) [J]. SPIE, 2003, 5157:47-57.