

## 光学学报

## FY-3F/HIRAS-II的发射前光谱定标

邵春沅<sup>1\*</sup>, 顾明剑<sup>1\*\*</sup>, 漆成莉<sup>2</sup>, 李路<sup>2</sup>, 杨天杭<sup>1</sup>, 陈星<sup>1</sup><sup>1</sup>中国科学院上海技术物理研究所红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;<sup>2</sup>中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

**摘要** 基于仪器的光学视场特性进行有限视场和离轴效应的光谱模拟,研究针对面阵傅里叶光谱仪光谱校正的方法。首先,开展仪器线型函数(ILS)影响分析,确定不同影响因素(有限光程差、有限视场、离轴效应等)的分析方法;其次,以面阵型圆形探测器为例,结合仪器自身光学特性,构建仪器线型函数模型;然后,利用气体吸收光谱模拟离轴效应产生的光谱定标误差和光谱敏感性;最后,基于FY-3F/HIRAS-II发射前光谱定标数据,进行光谱校正和定标精度验证。实验结果表明:有限视场和离轴效应使得光谱存在展宽,并向低波数方向偏移。经过光谱定标和校正,中心最差像元光谱定标精度由 $-24.69 \times 10^{-6}$ 减小到 $0.54 \times 10^{-6}$ ,边缘最差像元由 $-513.38 \times 10^{-6}$ 减小到 $-0.15 \times 10^{-6}$ ,且3个波段内所有像元均满足小于 $7 \times 10^{-6}$ 的指标要求。

**关键词** 光谱学; 光谱定标; 仪器线型函数; 离轴效应; 红外高光谱大气探测仪

**中图分类号** P412.27 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS231522

## 1 引言

红外傅里叶光谱仪基于迈克耳孙干涉仪,通过傅里叶变换将干涉仪产生的干涉图与入射光谱联系起来,与传统的滤光片式分光、光栅分光技术相比,具有高探测灵敏度、高光谱分辨率和高波数准确度等优点,因此在大气探测领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。目前,国内外最具有代表性的大气探测光谱探测装置有欧洲Metop上装载的IASI、美国的S-NPP和NOAA-20上的CrIS以及我国风云三号的HIRAS和风云四号的GIIRS。它们均为傅里叶干涉式光谱仪,采用多像元设计,用于大气温湿度廓线和气体成分探测。由于这些高光谱仪器的光谱分辨率非常高( $0.5 \sim 0.625 \text{ cm}^{-1}$ ),因此其光谱定标精度要求均在 $10 \times 10^{-6}$ 以内<sup>[2-4]</sup>,这对光谱定标提出了更高的要求。根据傅里叶光谱仪的光学机理,视场尺寸和离轴参数等因素会导致实际仪器线型函数发生谱线展宽和频谱偏移<sup>[5]</sup>,另外采样激光波长的变化也会引起光谱尺度的变化,因此需要对干涉图傅里叶变换获得的测量光谱精确标定。相比于传统的直接拟合光谱定标方法<sup>[6-7]</sup>,IASI通过构建仪器光谱响应函数(ISRF)来校正各种光谱效应<sup>[2]</sup>,CrIS计算包含仪器线型函数(ILS)在内的自切趾矩阵来进行光谱校正<sup>[8]</sup>。本文结合仪器光学特性,定量化构建仪器ILS模型,模拟边缘像元的光谱定标偏

差。结合FY-3F/HIRAS-II发射前真空光谱定标实验数据进行光谱校正,验证了该方法的有效性。该方法针对大部分傅里叶光谱仪都有较强的适用性。

## 2 FY-3F/HIRAS-II 仪器简介

风云三号(03)批上午轨道卫星FY-3F已于2023年8月3日成功发射。红外高光谱大气探测仪II型(HIRAS-II)作为FY-3F卫星的主要载荷,主要通过测量大气红外辐射光谱获取全球的大气温湿度廓线和主要气体成分等气象要素。FY-3F/HIRAS-II入轨后会经历两个月左右的去污加热以排除残留在仪器内部的污染气体,随后将开启在轨测试。发射前在地面热真空(TVAC)环境中的光谱定标实验及性能评估是进行在轨光谱定标精度测试的基础。

HIRAS-II采用跨轨二维扫描+干涉仪子系统+主光学中继光学+小面阵探测器+辐冷和冷光学的技术方案,如图1所示。

HIRAS-II的性能指标如表1所示,光谱分为3个波段,光谱分辨率分别为 $0.625$ 、 $1.25$ 、 $2.5 \text{ cm}^{-1}$ ,光谱定标精度要求为 $7 \times 10^{-6}$ 。

## 3 仪器线型函数

仪器线型函数通常表示光谱仪对单色光谱测量的影响,可认为是光谱仪在光谱域对单色光的脉冲响应。

收稿日期: 2023-09-05; 修回日期: 2023-10-17; 录用日期: 2023-11-03; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3902901)

通信作者: \*scyshuier@163.com; \*\*MingjianGu@sina.com

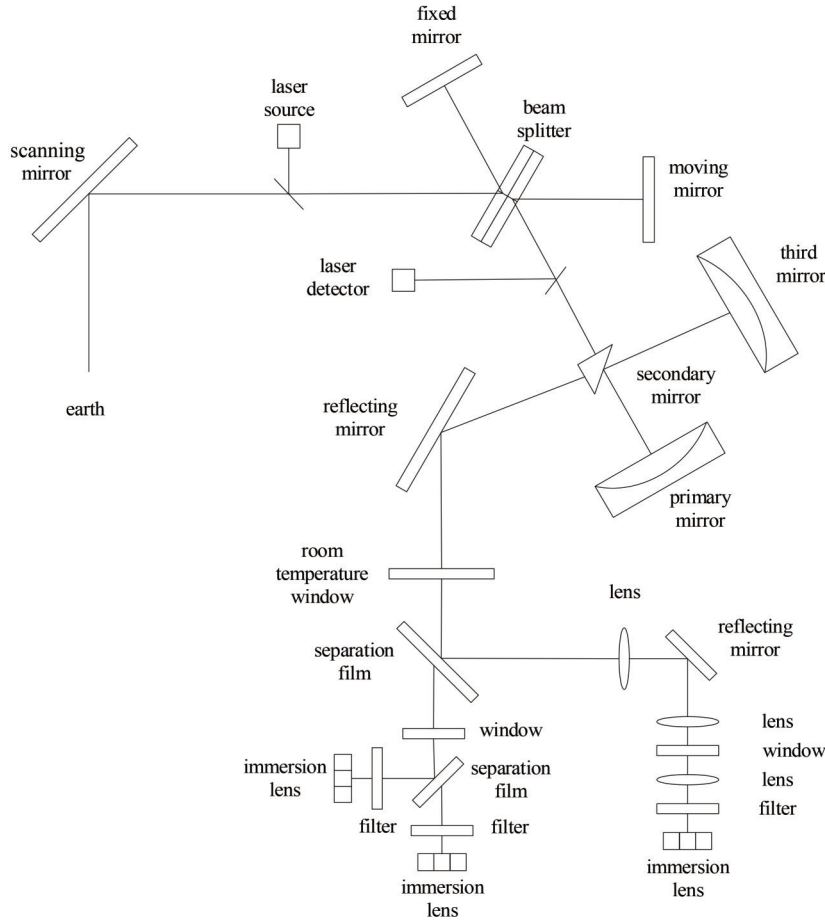


图 1 HIRAS-II 光学系统原理图

Fig. 1 Schematic of HIRAS-II optical system

表 1 HIRAS-II 光谱性能指标

Table 1 HIRAS-II spectral performance requirement

Band	Spectral range /cm <sup>-1</sup>	Spectral resolution /cm <sup>-1</sup>	Spectral accuracy /10 <sup>-6</sup>
Long wave	650-1168.125 (15.38-8.56 μm)	0.625	
Middle wave I	1168.75-1920 (8.55-5.20 μm)	1.25	7
Middle wave II	1920.625-2600 (5.20-3.48 μm)	2.5	

干涉仪动镜的行程总是有限的,因此实际的干涉信号是理想光谱与矩形窗函数的乘积,在光谱域则表现为理想光谱与矩形窗函数傅里叶变换的卷积。

由于探测对象通常是面源目标,像元视场范围内不同光线与仪器中心光轴存在不同的视场角,探测器像元接收到的是整个像元视场内不同视场角所有光线的积分。对于非单元的面阵型探测器,通常像元都不在仪器光轴中心,例如:IASI是2×2像元,没有中心像元;CrIS是3×3像元,只有5像元在光轴中心;FY-3D的HIRAS是2×2像元,后续FY-3E和FY-3F的HIRAS-II增加为3×3像元,以增加地面覆盖。

如图2所示,对于半径为R、y轴离轴量为r<sub>c</sub>的像

元,像元某一细分区域dA与光轴中心的距离为r,则dA位置用极坐标形式表示为(r,φ)。当轴外光线与光轴Z的夹角为θ时,波数ν向低频方向的偏移为νcosθ,因此dA的位置和波数关系可表示为

$$r = f \tan \theta, \tag{1}$$

$$\nu' = \nu \cos \theta, \tag{2}$$

$$r = f(\nu^2/\nu'^2 - 1)^{1/2}, \tag{3}$$

$$\nu' = \frac{\nu}{(1 + r^2/f^2)^{1/2}}, \tag{4}$$

式中:f为系统焦距。距离光轴中心为r的圆环上的波数均相等,所以像元内所有距离光轴中心为r的光谱强度与整个圆环光谱强度的比例为像元所截的圆环弧

$2\phi$  与  $2\pi$  的比值, 即: 当  $r > r_{\max}$  时, 圆环在像元之外, 此时  $I = 0$ ; 当  $r < |r_{\min}|$  且  $r_{\min} < 0$  时, 光轴在像元内,  $\phi$  等

于  $\pi$ , 此时  $I = 1$ ; 当  $r < |r_{\min}|$  且  $r_{\min} > 0$  时, 像元对该半径为  $r$  的圆环没有截取量, 因此  $I = 0^{[9]}$ 。

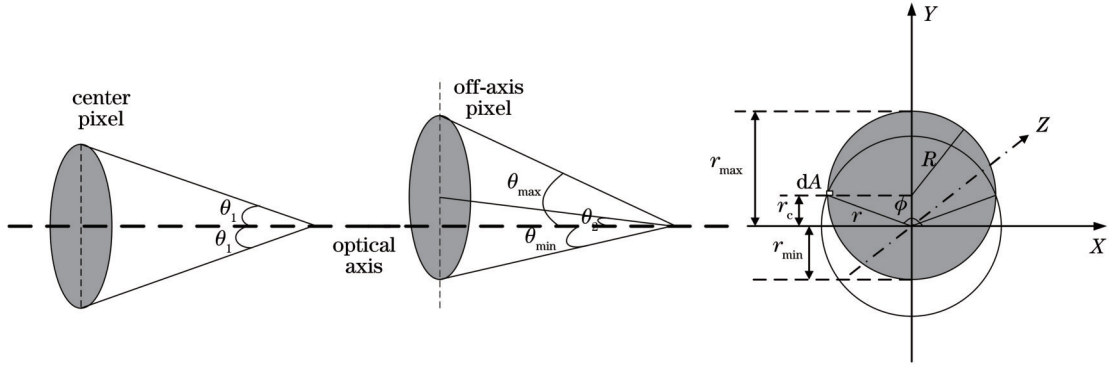


图 2 离轴效应示意图  
Fig. 2 Off-axis effect diagram

当  $|r_{\min}| < r < r_{\max}$  时,

$$I = \frac{2\phi}{2\pi} = \frac{2\arccos(y/r)}{2\pi}, \quad (5)$$

又因为

$$x^2 + (y - r_c)^2 = R^2, \quad (6)$$

$$x^2 + y^2 = r^2, \quad (7)$$

解得

$$y = \frac{r_c^2 + r^2 - R^2}{2r_c}, \quad (8)$$

最终可以得到

$$I = \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{r_c^2 + r^2 - R^2}{2r_c r}\right), \quad (9)$$

$$I = \frac{1}{\pi} \arccos\left[\frac{r_c^2 + f^2(v/v'^2 - 1) - R^2}{2r_c f(v^2/v'^2 - 1)^{1/2}}\right]. \quad (10)$$

因此对于圆形探测器, 离轴对线型函数的影响可表示为

$$f_{\text{ILS}} = \begin{cases} 1, & r_c < R, v \cos \theta_{\min} < v' < v \\ \frac{1}{\pi} \arccos\left[\frac{r_c^2 + f^2(v^2/v'^2 - 1) - R^2}{2r_c f(v^2/v'^2 - 1)^{1/2}}\right], & v \cos \theta_{\min} < v' < v \cos \theta_{\max} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

像元的尺寸大小和离轴位置决定了单色光展宽的宽度和展宽后的线型。该线型函数还要与 sinc 函数卷积, 最大光程差也是展宽的宽度和线型的影响因素。

在连续光谱范围内, 各个光谱通道的原始光谱和实测光谱的关系<sup>[8,10]</sup>如下:

$$L[k'] = \sum_{k=0}^{N-1} \left[ \int_0^{v_s} dv \int_0^{v_s} dv' 2M \text{sinc}[2M(v_{k'} - v')] f_{\text{ILS}}(v', v) \text{sinc}[2M(v_k - v)] \right] L[k], \quad (12)$$

式中:  $L[k']$  为实测光谱;  $L[k]$  为理想光谱;  $k', k$  为光谱通道标号;  $M$  为最大光程差;  $N$  为连续光谱范围内的光谱通道数;  $v_s$  为采样激光波数。

把式(12)中前面部分写成矩阵的形式, 则有

$$L' = S \cdot L, \quad (13)$$

其中  $S$  矩阵第  $k'$  行、第  $k$  列的元素  $S_{k'k}$  可表示为

$$S_{k'k} = \int_0^{v_s} dv \int_0^{v_s} dv' 2M \text{sinc}[2M(v_{k'} - v')] f_{\text{ILS}}(v', v) \text{sinc}[2M(v_k - v)], \quad (14)$$

$$2M \text{sinc}[2M(v_k - v)] \approx \delta(v_k - v), \quad (15)$$

式中:  $\delta$  为狄拉克函数。最终可用式(16)计算  $S$  矩阵:

$$S_{k'k} \approx \int_0^{v_s} dv' \text{sinc}[2M(v_{k'} - v')] f_{\text{ILS}}(v', v). \quad (16)$$

得到  $S$  之后, 计算其逆矩阵  $S^{-1}$ , 将测量光谱与  $S^{-1}$  相乘, 得到移除离轴效应的光谱, 经过 ILS 校正之后再与标准光谱的波数位置比较, 计算偏差。  $S$  矩阵计算所需的光学特性参数通过地面真空定标时光学视场测试结果获得。

## 4 光谱模拟与敏感性分析

### 4.1 有限视场与离轴效应 ILS 模拟

有限视场将会导致仪器线型函数向低频方向展宽, 如图 3 所示, 从而导致光谱分辨率下降和光谱频

偏。面阵型傅里叶光谱仪的非中心像元上会同时出现有限视场和离轴效应, ILS 形状由标准的矩形变成不规则的形状, 向低波数方向发生偏移和变形, 如图 4 所示。

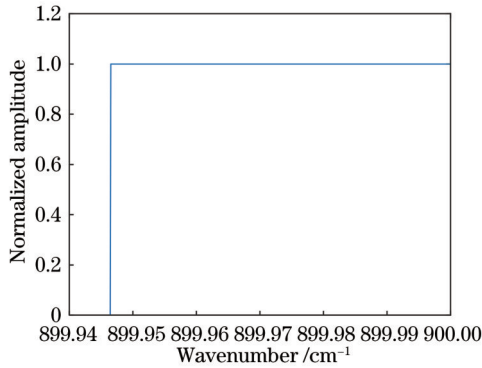


图 3 中心像元仪器线型函数

Fig. 3 Instrument line shape function of center pixel

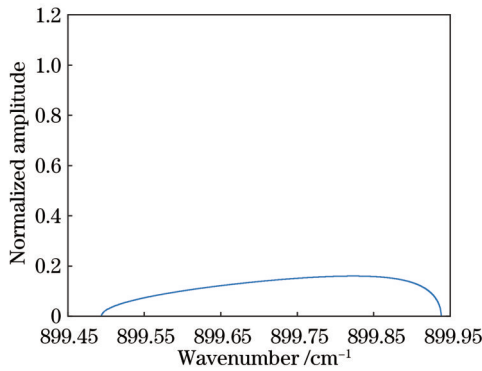


图 4 离轴像元仪器线型函数

Fig. 4 Instrument line shape function of off-axis pixel

#### 4.2 光谱定标偏差的模拟与敏感性分析

红外高光谱仪器地面光谱定标一般采用高温黑体+气体吸收池产生气体吸收谱线作为光谱标准源<sup>[11-12]</sup>, 因此利用 HITRAN 计算气体吸收谱线作为标准谱线输入。仪器模拟模型有助于仪器系统性能分析, 提供用于算法和软件开发的模拟真实数据<sup>[13]</sup>。通过建立 HIRAS-II 模拟观测模型, 模拟仪器的有限视场和离轴效应, 输出干涉信号, 再对干涉信号进行预处理并反演得到模拟光谱, 与输入的标准谱线进行对比, 评估其对光谱定标精度的影响。

根据像元已知的离轴参数对模拟光谱进行光谱定位校正, 再计算其光谱定标精度。风云三号红外高光谱大气探测仪的每个波段包含 3×3 个像元, 每个像元的视场为 1°, 像元之间的间隔为 1.2°, 如图 5 所示。

假设像元 5 的中心位置为仪器光轴中心, 则像元 1 中心位置的离轴参数为 (-72', 72'), 瞬时视场为 60'。以仪器光学理论设计值为基础, 考虑几种离轴角度和像元尺寸, 对比了不同条件下光谱辐射的差异, 并利用敏感性分析方法评估了光谱定标精度。由于获取光谱

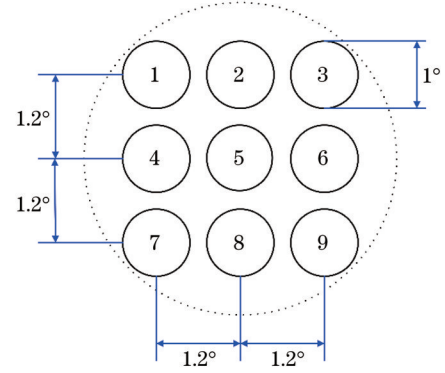


图 5 HIRAS-II 像元配置

Fig. 5 HIRAS-II pixel configuration

的分辨率是基于仪器的光谱分辨率, 而红外高光谱仪器光谱定标精度需求是 10<sup>-6</sup> 量级, 因此对理论模拟光谱和观测模拟光谱进行光谱偏差分析时, 要提高观测模拟光谱和理论模拟光谱的采样分辨率。基于傅里叶插值方法对 0.625 cm<sup>-1</sup> 的观测模拟光谱和理论模拟光谱进行提高采样分辨率的处理 (采样分辨率提高至 0.0001 cm<sup>-1</sup>)。图 6 所示为根据像元 1 的离轴参数模拟的长波波段 NH<sub>3</sub> 透过率反演光谱和标准输入光谱。

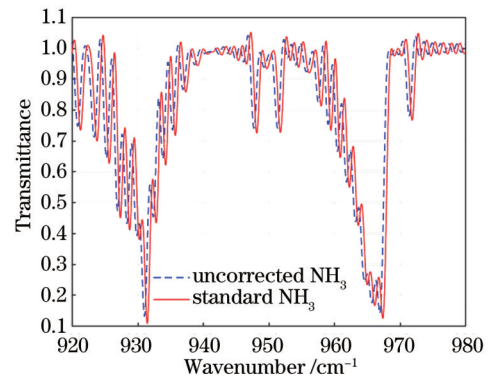


图 6 校正前 NH<sub>3</sub> 观测模拟光谱与理论模拟谱线

Fig. 6 Uncorrected NH<sub>3</sub> observation simulation and theoretical simulation spectra

以理论模拟谱线为基准, 对理论模拟谱线和观测模拟光谱进行交叉相关系数计算, 并将其作为评价函数。按照 0.0001 cm<sup>-1</sup> 的光谱间隔移动模拟光谱, 使得标准谱线与模拟光谱之间的相关系数最大, 并作为光谱频率偏差。光谱定标精度的计算公式为

$$dv = \frac{\Delta v}{v_R}, \quad (17)$$

式中:  $\Delta v$  为迭代停止的光谱移动量;  $v_R$  为选定的光谱范围均值。

离轴角度  $\theta_c$  和像元视场角  $\theta_R$  与光谱定标精度存在二次项关系 (图 7 和图 8), 且离轴角度更为敏感, 其对光谱定标精度的贡献远大于像元尺寸, 由此导致中心像元的光谱定标精度为  $-18.84 \times 10^{-6}$ , 最边缘像元的光谱定标精度为  $-451 \times 10^{-6}$ 。

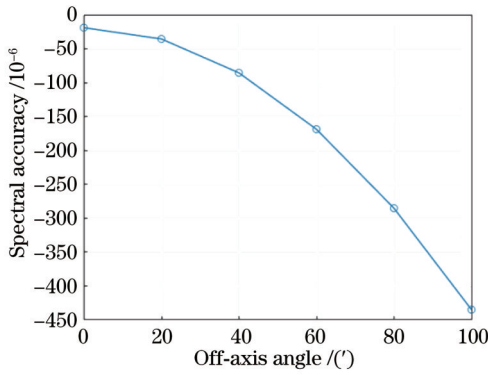


图 7 离轴角度  $\theta_{rc}$  和光谱定标精度的关系 ( $\theta_R = 60'$ )

Fig. 7 Relationship between off-axis angle  $\theta_{rc}$  and spectral calibration accuracy ( $\theta_R = 60'$ )

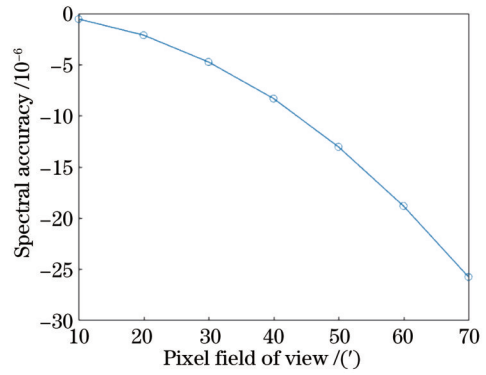


图 8 像元视场角  $\theta_R$  和光谱定标精度的关系 ( $\theta_{rc} = 0'$ )

Fig. 8 Relationship between pixel field of view angle  $\theta_R$  and spectral calibration accuracy ( $\theta_{rc} = 0'$ )

## 5 测量实验与结果

### 5.1 光学视场参数的测量

由上述分析可知,实测光谱是理想光谱与 S 矩阵的乘积。通过实测光谱乘以 S 的逆矩阵进行校

正<sup>[14]</sup>。构建 S 矩阵,需要探测像元的离轴参数:中心离轴角度  $\theta_{rc}$  和像元视场角  $\theta_R$ 。在红外高光谱地面定标实验中,利用狭缝扫描(图 9)获取低温光学状态下仪器各个像元的实际光学视场,为光谱校正算法提供初始输入。

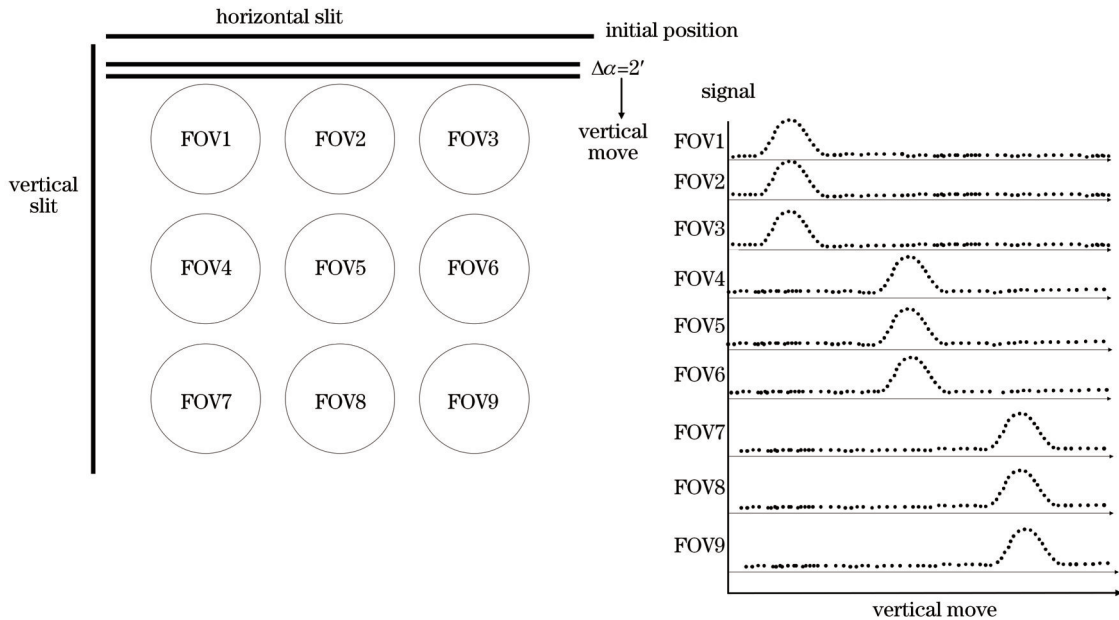


图 9 狭缝扫描示意图

Fig. 9 Schematic of slit scanning

### 5.2 光学视场参数的调整与光谱校正

由于光学视场参数的测量精度是  $2'$ , 根据第 4 节的敏感性分析:当  $\theta_R = 60'$  时,测量精度引起的误差约为  $1.3 \times 10^{-6}$ ; 当  $\theta_{rc} = 101.82' (-72', 72')$ , 某一方向  $2'$  的测量精度引起的误差约为  $12 \times 10^{-6}$ 。同时,测试光轴与仪器光轴存在整体性偏移,因此光学视场参数测量值作为初始输入,先进行整体粗调,每次调整后计算光谱效应引起的 S 矩阵,并对实测光谱进行校正,与标准光谱对比计算光谱频率偏差,直到光谱频率偏差最小;再对每个像元在  $\pm 2'$  的测试误差内进行精细调

整,直到光谱频率偏差最小,即为最终的光学视场参数和光谱定标精度,算法流程如图 10 所示。

基于 FY-3F/HIRAS-II 地面真空定标实验气体吸收池测试数据,利用光谱校正技术对测量谱线进行校正。光谱校正前后的定标精度如表 2~4 所示。经过光谱校正后,3 个波段内所有探元的光谱精度均满足  $7 \times 10^{-6}$  的指标要求。

## 6 结 论

针对风云三号 F 星红外高光谱大气探测仪的设计

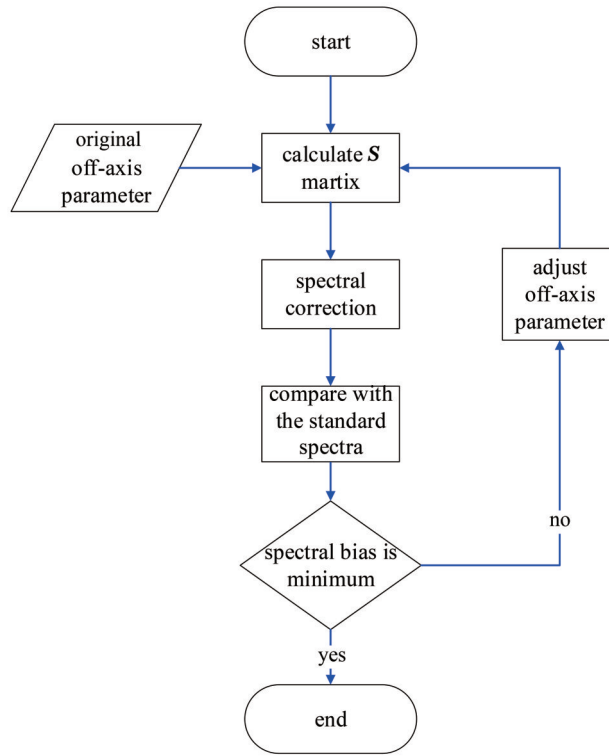


图 10 光谱校正算法流程

Fig. 10 Process of spectral correction

表 2 长波光谱定标精度

Table 2 Spectral calibration accuracy of long wave

FOV	FOV1	FOV2	FOV3	FOV4	FOV5	FOV6	FOV7	FOV8	FOV9
Spectral accuracy before correction / $10^{-6}$	-388.11	-255.89	-526.32	-149.68	-23.16	-304.32	-350.84	-219.05	-490.63
Spectral accuracy after correction / $10^{-6}$	0.32	0.21	0.42	-1.05	0.32	0.11	0.95	-0.42	0.42

表 3 中波 1 光谱定标精度

Table 3 Spectral calibration accuracy of middle wave I

FOV	FOV1	FOV2	FOV3	FOV4	FOV5	FOV6	FOV7	FOV8	FOV9
Spectral accuracy before correction / $10^{-6}$	-395.46	-256.62	-539.62	-162.38	-24.69	-310.92	-367.62	-229.31	-513.38
Spectral accuracy after correction / $10^{-6}$	1.46	0.62	-1.69	-0.15	0.54	0.77	2.23	1.08	-0.15

表 4 中波 2 光谱定标精度

Table 4 Spectral calibration accuracy of middle wave II

FOV	FOV1	FOV2	FOV3	FOV4	FOV5	FOV6	FOV7	FOV8	FOV9
Spectral accuracy before correction / $10^{-6}$	-368.63	-231.42	-494.93	-153.93	-17.08	-279.13	-360.68	-219.09	-477.85
Spectral accuracy after correction / $10^{-6}$	1.10	-0.14	1.83	0.46	1.92	-0.87	1.19	-0.09	-0.05

特点,构建了仪器线型函数和光谱综合效应矩阵,对光谱定标精度进行了敏感性分析。利用 HITRAN 的模拟结果作为标准谱线,研究了不同离轴角度和像元视场角条件下长波  $\text{NH}_3$  吸收谱线的光谱定标精度。光谱定标精度与离轴角度和像元视场角均存在二次函数关系,且光谱定标精度对离轴角度的敏感性远高于像元视场角。中心像元的光谱定标精度为  $-18.84 \times 10^{-6}$ ,最边缘像元的光谱定标精度为  $-451 \times 10^{-6}$ 。同时,现有光学视场测试条件下由位置误差和像元尺寸误差引起的光谱定标精度分别为  $1.3 \times 10^{-6}$  和  $12 \times 10^{-6}$ 。研

究了基于仪器光学特性的发射前光谱定标和校正方法,完成了对 FY-3F/HIRAS-II 的发射前光谱性能评估。经过光谱校正,3 个波段各个像元的最高光谱定标精度为  $2.23 \times 10^{-6}$ ,满足  $7 \times 10^{-6}$  的光谱定标指标要求。本研究对未来红外高光谱仪器光学视场参数设计和测试、光谱定标精度的提升具有指导意义。

参 考 文 献

[1] Persky M J. A review of spaceborne infrared Fourier transform spectrometers for remote sensing[J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(10): 4763-4797.

- [2] Blumstein D, Chalon G, Carlier T, et al. IASI instrument: technical overview and measured performances[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5543: 196-207.
- [3] Strow L L, Motteler H, Tobin D, et al. Spectral calibration and validation of the cross-track infrared sounder on the Suomi NPP satellite[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(22): 486-496.
- [4] 李路, 倪卓娅, 漆成莉, 等. 风云四号 B 星干涉式红外探测仪发射前辐射定标[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0630001.  
Li L, Ni Z Y, Qi C L, et al. Pre-launch radiometric calibration of geostationary interferometric infrared sounder on FengYun-4B satellite[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0630001.
- [5] Genest J, Tremblay P. Instrument line shape of Fourier transform spectrometers: analytic solutions for nonuniformly illuminated off-axis detectors[J]. Applied Optics, 1999, 38(25): 5438-5446.
- [6] 石晶晶, 李孟凡, 胡亚东, 等. 紫外可见偏振成像光谱仪的光谱定标与匹配方法[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0930002.  
Shi J J, Li M F, Hu Y D, et al. Spectral calibration and matching method for ultraviolet-visible polarization imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0930002.
- [7] 冯绚, 韩昌佩, 邹曜璞, 等. 红外傅里叶光谱仪在轨光谱定标算法研究[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0630002.  
Feng X, Han C P, Zou Y P, et al. On-orbit spectral calibration algorithm of infrared Fourier transform spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0630002.
- [8] NASA Goddard Space Flight Center. Joint Polar Satellite System (JPSS) Cross Track Infrared Sounder (CrIS) Sensor Data Records (SDR) algorithm theoretical basis document (ATBD)[EB/OL]. (2018-06-14)[2023-06-05]. [https://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/documents/ATBD/D0001-M01-S01-002\\_JPSS\\_ATBD\\_CRIS-SDR\\_nsr\\_20180614.pdf](https://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/documents/ATBD/D0001-M01-S01-002_JPSS_ATBD_CRIS-SDR_nsr_20180614.pdf).
- [9] 邹曜璞. 星载傅里叶光谱仪星上数据处理研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016: 41-42.  
Zou Y P. Research on on-board data processing of on-board Fourier spectrometer[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016: 41-42.
- [10] Desbiens R, Tremblay P, Genest J, et al. Matrix form for the instrument line shape of Fourier-transform spectrometers yielding a fast integration algorithm to theoretical spectra[J]. Applied Optics, 2006, 45(3): 546-557.
- [11] 刘鹏, 王培纲, 华建文, 等. 大气垂直探测仪光谱定标[J]. 光电工程, 2008, 35(2): 109-113.  
Liu P, Wang P G, Hua J W, et al. Spectral calibration of the space-borne Fourier transform spectrometer[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(2): 109-113.
- [12] Williams F L, Johnston R A. Spatial and spectral characterization of the Crosstrack Infrared Sounder (CrIS): test development[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4818: 157-171.
- [13] Perron G P, Moreau L M, Miras D, et al. IASI simulation model[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4881: 584-593.
- [14] 漆成莉, 周方, 吴春强, 等. 风云三号红外高光谱探测仪的光谱定标[J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 747-755.  
Qi C L, Zhou F, Wu C Q, et al. Spectral calibration of Fengyun-3 satellite high-spectral resolution infrared sounder[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(4): 747-755.

## Pre-Launch Spectral Calibration of FY-3F/HIRAS- II

Shao Chunyuan<sup>1\*</sup>, Gu Mingjian<sup>1\*\*</sup>, Qi Chengli<sup>2</sup>, Li Lu<sup>2</sup>, Yang Tianhang<sup>1</sup>, Chen Xing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2</sup>National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

### Abstract

**Objective** The infrared Fourier spectrometer is based on interferometric spectroscopy, which features high spectral resolution and high sensitivity. Due to the ultra-fine spectral resolution of infrared hyperspectral atmospheric detection instruments, minor errors in spectral calibration can cause radiation measurement errors. High precision spectral calibration is an important prerequisite for quantitative inversion and the application of infrared remote sensing. The spectral calibration accuracy is affected by the limited field of view and off-axis effect. The traditional method is to obtain the spectral calibration coefficient by fitting multiple spectral lines. However, for issues such as ultra-high spectral resolution and wide observation spectral bands, most spaceborne infrared hyperspectral instruments employ forward modeling methods to build instrument spectral response models and remove various spectral effects.

**Methods** Based on the optical field of view characteristics, we conduct spectral simulations of limited field of view and off-axis effect, and study spectral correction methods for the plane array Fourier spectrometer. Firstly, the influence of instrument line shape function (ILS) is analyzed to determine the analysis methods for different influencing factors (such as finite optical path difference, finite field of view, and off-axis effect). Next, by taking a planar circular detector as an example, the ILS function is constructed by combining the optical characteristics of the instrument itself. Then, the spectral calibration error and spectral sensitivity caused by the off-axis effect are simulated by gas absorption spectroscopy. Finally, test data of the optical field of view is obtained via slit scanning. Based on the pre-launch spectral calibration data of FY-3F/HIRAS- II, spectral correction and calibration accuracy verification are carried out.

**Results and Discussions** The experimental results indicate that the limited field of view and off-axis effect cause the

spectrum to broaden and shift to a low wavenumber direction. There is a quadratic relationship between the off-axis angle  $\theta_{rc}$  and the pixel field of view angle  $\theta_r$  and the spectral calibration accuracy. The off-axis angle is more sensitive, and its contribution to the spectral calibration accuracy is much greater than that to the pixel field of view angle. When  $\theta_r = 60'$ , the error caused by measurement accuracy of  $2'$  is approximately  $1.3 \times 10^{-6}$ . When  $\theta_{rc} = 101.82' (-72', 72')$ , the error caused by the measurement accuracy of  $2'$  in a certain direction is about  $12 \times 10^{-6}$ . After spectral calibration and correction, the spectral calibration accuracy of the center worst pixel decreases from  $-24.69 \times 10^{-6}$  to  $0.54 \times 10^{-6}$ , and the edge worst pixel reduces from  $-513.38 \times 10^{-6}$  to  $-0.15 \times 10^{-6}$ . All pixels in the three bands meet the indicator requirement of less than  $7 \times 10^{-6}$ .

**Conclusions** Based on the characteristics of the infrared hyperspectral atmospheric detector for the FY-3F satellite, the ILS function and spectral comprehensive effect matrix are constructed. The sensitivity analysis is conducted on the spectral calibration accuracy. By adopting the simulated results of HITRAN as the standard spectral line, the spectral calibration accuracy of long-wave  $\text{NH}_3$  absorption spectral lines under different off-axis angles and pixel field of view angles is studied. There is a quadratic function relationship between the spectral calibration accuracy and the angles. The sensitivity to off-axis angles is much higher than that to the pixel field of view angles, the spectral calibration accuracy of the central pixel is  $-18.84 \times 10^{-6}$ , and the spectral calibration accuracy of the outermost pixel is  $-451 \times 10^{-6}$ . Meanwhile, the spectral calibration accuracy caused by position error and pixel size error under the existing optical field of view testing conditions is  $1.3 \times 10^{-6}$  and  $12 \times 10^{-6}$  respectively. We have studied pre-launch spectral calibration and calibration methods based on instrument optical characteristics and completed the pre-launch spectral performance evaluation of FY-3F/HIRAS-II. After spectral correction, the maximum spectral calibration accuracy of each pixel in the three bands is  $2.23 \times 10^{-6}$ , which meets the spectral calibration index requirement of  $7 \times 10^{-6}$ . Additionally, our study also has guiding significance for designing and testing optical field parameters in the future and improving spectral calibration accuracy.

**Key words** spectroscopy; spectral calibration; instrument line shape function; off-axis effect; high-spectral resolution infrared atmospheric sounder