

红外傅里叶光谱仪在轨光谱定标算法研究

冯绚^{1,2}, 韩昌佩^{2*}, 邹曜璞², 陈博洋³

¹中国科学院空间应用工程与技术中心太空应用重点实验室, 北京 100094;

²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;

³国家卫星气象中心, 北京 100080

摘要 风云四号 A 星上搭载的干涉式大气垂直探测仪的核心是一台红外傅里叶光谱仪, 为了提高探测仪观测资料的定量化应用水平, 必须对其进行精确的在轨光谱定标。对于傅里叶光谱仪来说, 光谱位置由干涉图的采样点数和参考激光频率共同决定, 因此光谱定标的关键是确保参考激光频率的稳定性。本研究利用逐线积分辐射传输模式得到参考大气吸收谱线, 通过比较探测仪观测光谱与参考光谱的均方根误差来确定激光的有效采样频率, 从而实现探测仪的在轨高精度光谱定标。该方法已应用于风云四号 A 星上搭载的干涉式大气垂直探测仪的在轨光谱定标中, 具有较高的应用价值。

关键词 傅里叶光学; 傅里叶光谱仪; 光谱定标; 激光采样频率; 风云四号 A 星

中图分类号 TP732.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0630002

On-Orbit Spectral Calibration Algorithm of Infrared Fourier Transform Spectrometer

Feng Xuan^{1,2}, Han Changpei^{2*}, Zou Yaopu², Chen Boyang³

¹Key Laboratory of Space Utilization, Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

³National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract The geostationary interferometric infrared sounder (GIIRS) on-board FY-4A satellite is an infrared Fourier transform spectrometer. To improve the quantitative application level of observed data, it is necessary to conduct the on-orbit spectral calibration of the GIIRS accurately. Since the spectral positions are determined by the reference laser frequency and the number of the sampling points collected from interferograms for the Fourier transform spectrometer, the key of the spectral calibration is to ensure the stability of the reference laser frequency. In this study, a line-by-line radiative transfer model (LBLRTM) is used to calculate the reference atmospheric absorption spectra. The effective sampling frequency of the laser is determined empirically by comparing the root-mean-square error between the observed and the reference spectra of the detector, achieving the on-orbit high-precision spectral calibration of the detector. This method is used for the on-orbit spectral calibration of the GIIRS on-board FY-4A satellite, clearly demonstrating its application value.

Key words Fourier optics; Fourier transform spectrometer; spectral calibration; laser sampling frequency; FY-4A satellite

OCIS codes 070.2025; 040.3060; 010.0280

1 引言

基于傅里叶变换光谱技术的干涉式大气垂直探

测仪, 其分光系统采取动镜式时间调制干涉分光方式, 具有高光谱分辨率、高光通量、多通道和高测量准确度等显著优点, 能够满足高精度大气三维探测

收稿日期: 2019-01-25; 修回日期: 2019-02-28; 录用日期: 2019-03-12

基金项目: 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室开放课题基金

* E-mail: changpei_han@mail.sitp.ac.cn

的要求,已被国际上确定为大气垂直探测的主要发展方向^[1]。我国新一代静止轨道气象卫星风云四号(FY-4)A星上搭载的干涉式大气垂直探测仪(GIIRS),实现了我国利用傅里叶变换光谱技术进行三维大气探测的新突破^[2],该探测仪的核心就是一台傅里叶光谱仪。

高光谱分辨率遥感仪器具有通道多、光谱分辨率高,以及对光谱位置的定位精度要求比较严格等特点,因此,必须进行准确的光谱定标^[3-4]。光谱定标就是检测仪器探测通道的波长位置及光谱稳定性,校正波长偏移^[5-7]。对于傅里叶光谱仪来说,光谱定标的关键是确保参考激光的稳定性,这是因为傅里叶光谱仪通常采用激光作为干涉图的取样标准,激光控制干涉仪保证了动镜驱动的线性,从而可以均匀地取样^[8]。傅里叶光谱仪的光谱位置由干涉图的采样点数和参考激光的频率共同决定,参考激光频率的稳定性直接影响着干涉光谱的质量。搭载于欧洲极轨气象卫星(MetOp)上的干涉式红外大气探测仪(IASI)为了控制参考激光的稳定性,利用乙炔吸收线来锁定参考激光频率^[9];美国新一代对地观测卫星Suomi NPP上搭载的跨轨红外探测仪(CrIS)则利用氖灯的发射谱线来监测激光器波长的偏移量^[10]。

风云四号A星上搭载的GIIRS并没有专门的硬件装置用来监测参考激光器的频率变化,而在轨运行期间激光器稳定性的变化无法预测,使得整个系统的光谱定标需要采用一种新的方法。事实上,气体分子吸收谱线位置的唯一性为仪器光谱定标提供了基础,根据观测的大气状态参数,利用辐射传输计算可以模拟大气光谱,再与探测仪实际观测的光谱曲线进行比对,就可以确定正确的光谱位置^[11]。

本文选取合适的气体吸收带,利用逐线积分辐射传输模式(LBLRTM)^[12-13]开展模拟计算,将吸收气体精确的特征谱线位置传递到GIIRS的观测光谱,通过确定激光有效采样频率来实现傅里叶光谱仪在轨高精度光谱定标。

2 基本原理

2.1 傅里叶光谱仪的分光原理

典型的傅里叶光谱仪,即迈克耳孙干涉仪,如图1所示。入射辐射经过分束片分成两束,经定镜和动镜反射后再次通过分束片而互相干涉,干涉光会聚在红外探测器上,动镜的运动会造成两束相干光的光程差发生变化,继而探测器上会给出干涉强度

和光程差之间的关系,这就是干涉图。通过对获得的干涉图进行傅里叶变换,就可以得到入射辐射的光谱图^[14-15]。

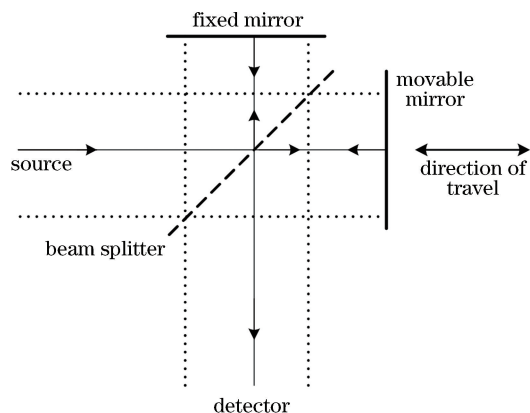


图1 迈克耳孙干涉仪的原理图

Fig. 1 Principle diagram of Michelson interferometer

对于入射光强为 $B(\nu_0)$ 的单色光源,探测器上测得的强度 $I(x)$ 为

$$I(x) = B(\nu_0) \cos(2\pi\nu_0 x), \quad (1)$$

式中: ν_0 、 x 分别为相干单色光的频率和光程差。

对于复色光源,若其光谱强度分布为 $B(\nu)$,则所有谱元的辐射均以同样的方式输出,其结果是各个谱元信号的总和加在探测器上。于是,探测器上测得的总强度 $I(x)$ 和光源函数 $B(\nu)$ 分别为

$$\begin{cases} I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\nu) \cos(2\pi\nu x) d\nu \\ B(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x) \cos(2\pi\nu x) dx \end{cases}, \quad (2)$$

式中: ν 为入射光频率。由(2)式可知,光源函数 $B(\nu)$ 与干涉图函数 $I(x)$ 为傅里叶余弦变换对。

事实上,由于光学、电子或采样的影响,得到的干涉图并不是理想的,而是有相位偏差的。因此,入射辐射与测量的干涉图之间实际上为复数傅里叶变换关系:

$$\begin{cases} I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\nu) \exp(i2\pi\nu x) d\nu \\ B(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x) \exp(-i2\pi\nu x) dx \end{cases}. \quad (3)$$

(2)~(3)式为傅里叶变换光谱学的基本方程。

2.2 在轨光谱定标方法

在轨光谱定标与地面光谱定标的基本原理类似,均是通过比较观测光谱与理论光谱得到实际光谱位置的偏差值,但是对于具体的光谱比较方法却有着根本的差别。

地面光谱定标用于确定发射前的光谱定标系数。在真空环境下,黑体辐射通过装有低浓度 NH_3

的气体池之后进入傅里叶光谱仪,经干涉分光后获得 NH₃ 气体的实测光谱,选择具有明显吸收峰的一组波数,与 NH₃ 理论谱线的位置进行对比,利用最小二乘法拟合出线性光谱校正系数^[16]。由于气体吸收池中的气体比较单一,在标准大气压下,特征谱线位置明显,通过比较特征谱线的位置就可以确定实际光谱位置的偏差。

风云四号 A 星上搭载的 GIIRS 的工作波数为 700~1130 cm⁻¹ (长波)和 1650~2250 cm⁻¹ (中波),图 2 所示为 GIIRS 的长波及中波在轨观测光谱。水汽吸收线基本上覆盖了整个红外光谱区,此外,谱线碰撞展宽、谱线重叠效应等使得准确识别单一气体的特征谱线位置相对比较困难,因此,地面光谱定标使用的光谱比较方法不再适用。

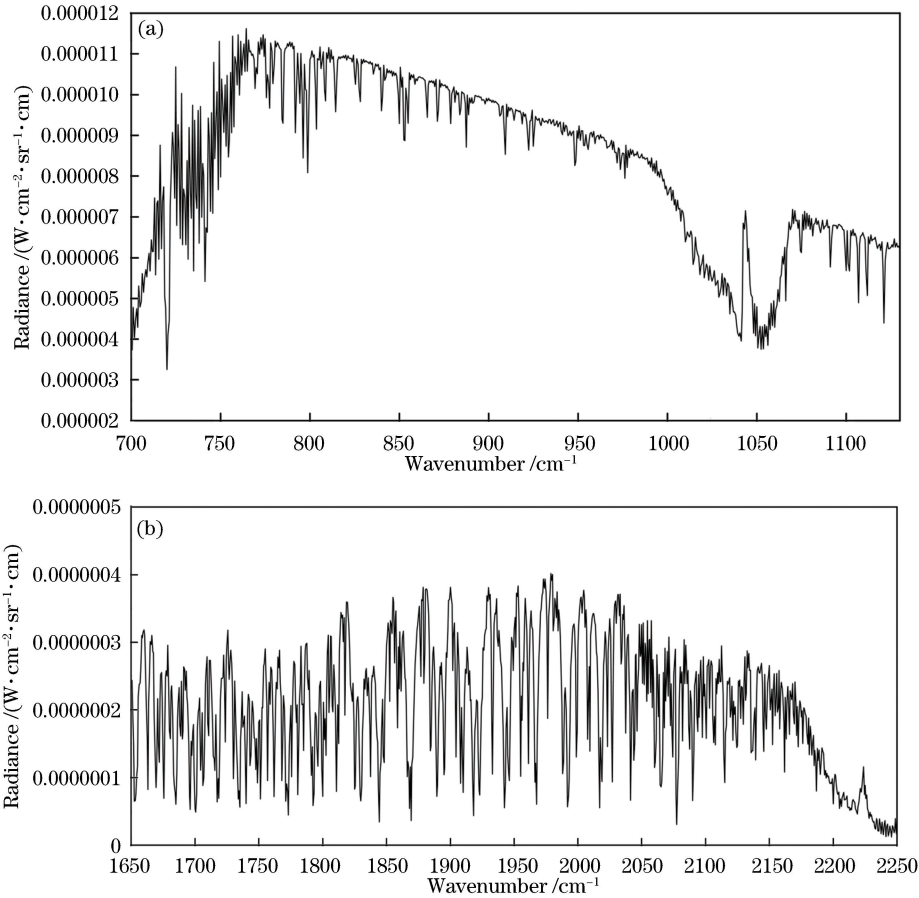


图 2 GIIRS 探测光谱范围示意图(UTC2017-02-20T10:00)。(a)长波 700~1130 cm⁻¹; (b)中波 1650~2250 cm⁻¹

Fig. 2 Spectral coverage of GIIRS (February 20, 2017 at 10:00 UTC). (a) Long-wave spectral region from 700 to 1130 cm⁻¹; (b) mid-wave spectral region from 1650 to 2250 cm⁻¹

根据迈克耳孙干涉仪的分光原理,为了得到等光程差采样的干涉图,通常在光路中插入稳定的参考激光器,激光干涉条纹产生等光程差采样触发信号,从而获得等光程差间隔上的干涉图,傅里叶光谱仪的光谱刻度由干涉图的采样点数和参考激光频率共同决定^[17]。

设参考激光频率为 ν_{Laser} ,则参考激光波长 $\lambda_{\text{Laser}} = 1/\nu_{\text{Laser}}$,干涉图采样间隔为 $\Delta x = \lambda_{\text{Laser}} = 1/\nu_{\text{Laser}}$ 。

动镜运动的最大行程为 X ,由于 GIIRS 得到的是双边干涉图,则干涉图采样点数为

$$N = \frac{2X}{\Delta x}, \quad (4)$$

离散的光程差位置为

$$x = (i - 1)\Delta x, \quad i = 1, 2, \dots, N/2, \quad (5)$$

转化成波数刻度为

$$\Delta \nu = \frac{1}{2X} = \frac{1}{N\Delta x} = \frac{\nu_{\text{Laser}}}{N}, \quad (6)$$

则离散的频率位置为

$$\nu = (i - 1)\Delta \nu = (i - 1) \frac{\nu_{\text{Laser}}}{N}, \quad i = 1, 2, \dots, N/2. \quad (7)$$

可以看到,光谱波数位置依赖于参考激光的频率,二者线性相关,光谱位置的漂移等于激光频率的漂移,即^[18]

$$\frac{d\nu}{\nu} = \frac{d\nu_{\text{Laser}}}{\nu_{\text{Laser}}}. \quad (8)$$

因此,对于傅里叶光谱仪来说,实际光谱位置的偏差可以通过求取激光采样频率的偏差来确定。改变激光的采样频率,然后比较观测光谱与模拟光谱之间的均方根误差,误差最小时所对应的采样频率即为激光的有效采样频率。这种方法已在美国地基和机载干涉仪上得到了检验和验证,如大气发射辐射干涉仪 AERI、扫描式高光谱分辨率干涉式探测仪 S-HIS 等^[17,19-20]。本研究将这种方法应用于风云四号 A 星上搭载的 GIIRS 的在轨光谱定标,选取合适的可用于光谱定标的波段,确定在轨光谱的定标精度。

3 分析与讨论

为了提高光谱定标的精度,用于定标的光谱曲线的选取非常重要。大气中主要的吸收气体,如 H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 N_2O 、 CH_4 、 CO ,在大气垂直探测仪的工作波段内 ($600 \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$) 都有着强烈而复杂的吸收光谱,如水汽的 $6.3 \mu\text{m}$ 带、 CO_2 的 $15 \mu\text{m}$

带、 N_2O 的 3 个基带、 CH_4 的 4 个基带等等^[21]。原则上,用于定标的光谱曲线要尽量选取光谱特征明显且相对较强的吸收带,同时要保证吸收不能饱和。另外,吸收带内应包含尽可能多的谱线^[22]。根据文献^[11]的分析可知,长波选取 CO_2 吸收带 $700 \sim 718 \text{ cm}^{-1}$,中波选取 N_2O 吸收带 $2207 \sim 2220 \text{ cm}^{-1}$,用于 GIIRS 的在轨光谱定标。

GIIRS 长波和中波各对应一个 128 pixel 的探测器,图 3 为长波第 48 pixel 及中波第 48 pixel 光谱辐射均方根误差随激光采样频率的变化。如图 3 所示,改变傅里叶光谱仪的激光采样频率,然后比较观测光谱与模拟光谱之间的均方根误差,可以看到曲线有一个最小值,此时对应的采样频率即为实际的采样频率,即激光的有效采样频率。图中横坐标为采样频率与实际频率的比值(无量纲),纵坐标为观测光谱与模拟光谱的均方根误差。激光采样频率与实际频率的比值从 0.9996 变化到 1.0004,变化增量为 0.0001,通过这种方法确定的激光采样频率偏差,即在轨光谱定标精度 ($\Delta\nu/\nu$),可以达到 10×10^{-6} 。

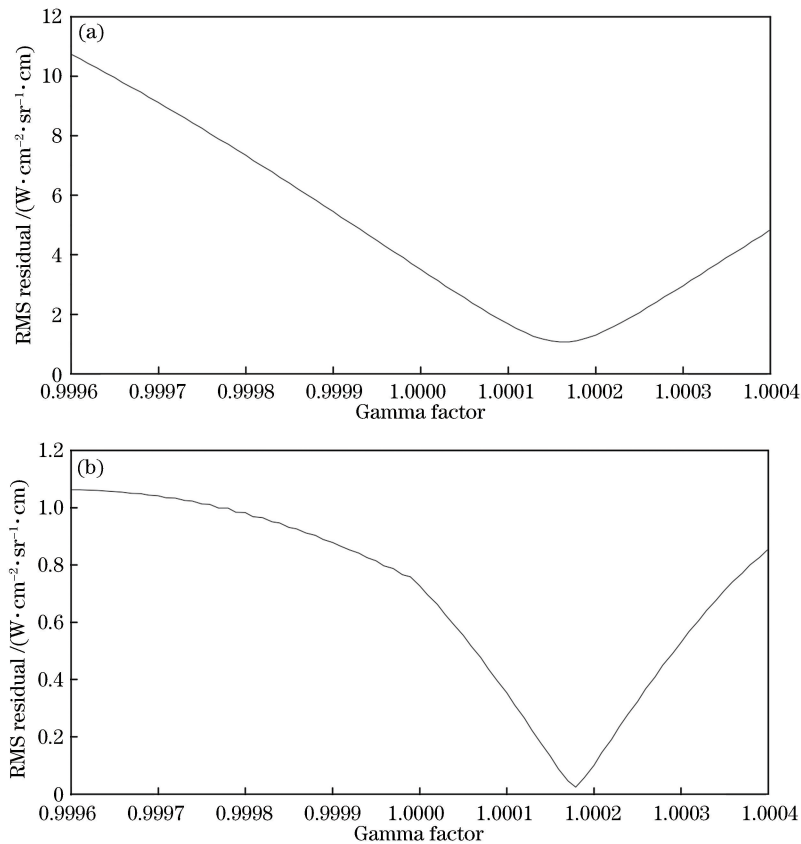


图 3 GIIRS 光谱辐射均方根误差随激光采样频率的变化(UTC 2017-06-16T06:15)。(a)长波 $700 \sim 718 \text{ cm}^{-1}$;
(b)中波 $2207 \sim 2220 \text{ cm}^{-1}$

Fig. 3 Root-mean-square error of spectral radiance of GIIRS as function of laser sampling frequency (June 16, 2017 at 06:15 UTC). (a) Long-wave spectral region from 700 to 718 cm^{-1} ; (b) mid-wave spectral region from 2207 to 2220 cm^{-1}

图 4 为风云四号 A 星上搭载的 GIIRS 的观测光谱与模拟光谱的对比图。图中虚线为 LBLRTM 的计算结果,使用的大气参数为相同观测时刻、相同地理位置的 T639L60 全球中期数值预报模式产品,大气参数不确定引起的光谱辐射值的偏差在激光有效采样频率确定方法中的影响很小,可以忽略不计。实线和点线均为 GIIRS 的观测光谱,其中实线使用的光谱定标系数为发射前实验室定标系数,点线使用的是经过在轨光谱定标后的光谱定标系数。左上角为经过放大的 711~718 cm^{-1} 光谱对比图。从图

中可以清楚地看到点线相对于实线有一个向右的偏移量,使得观测光谱位置与理论光谱位置基本一致。

风云四号 A 星上搭载的 GIIRS 的动镜的运动方式为直线往复运动,动镜正向和反向运动时会各得到一幅干涉图,需要对正向和反向干涉图分别进行在轨光谱定标。根据图 3 采用的方法,可以得到 GIIRS 长波和中波各 128 pixel 上的正向及反向在轨光谱定标系数。如图 5 所示,实线为发射前的实验室光谱定标系数,虚线为在轨光谱定标系数,可以看到,仪器上天之后,光谱位置发生了明显变化。

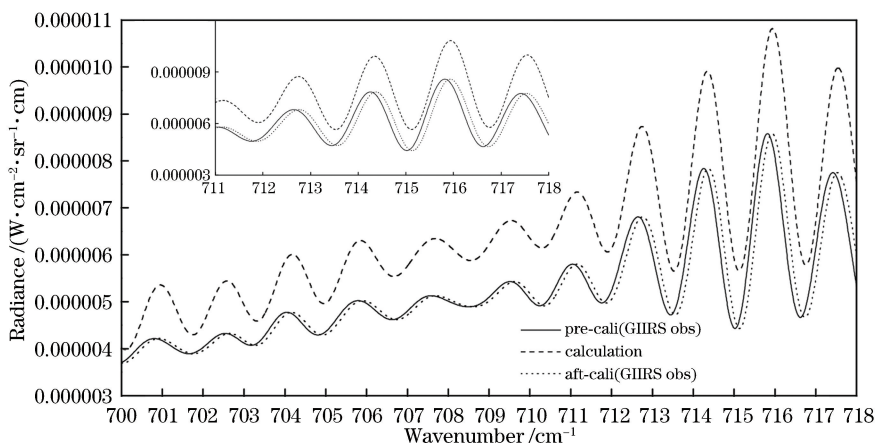


图 4 GIIRS 观测光谱与 LBLRTM 模拟光谱的对比(UTC 2017-06-16T06:15)

Fig. 4 Comparison between observed spectra of GIIRS and simulated spectra of LBLRTM (June 16, 2017 at 06:15 UTC)

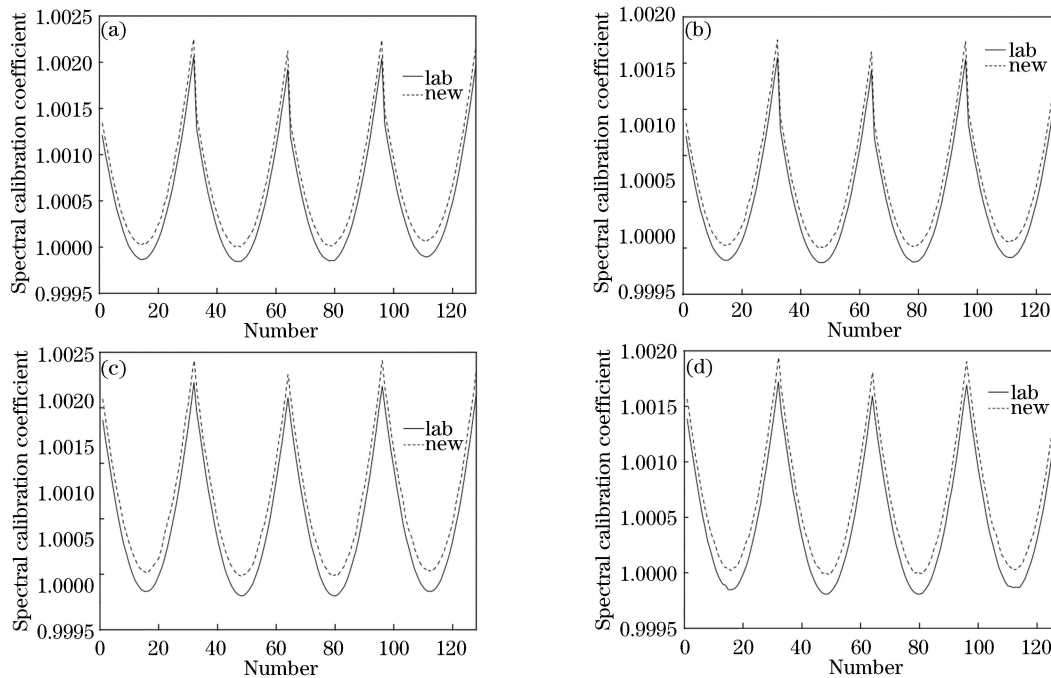


图 5 风云四号 A 星上搭载的 GIIRS 的在轨光谱定标系数(UTC 2017-10-20T02:30)。(a)长波正向;(b)长波反向;(c)中波正向;(d)中波反向

Fig. 5 On-orbit spectral calibration coefficient of GIIRS on-board FY-4A satellite (October 20, 2017 at 02:30 UTC). (a) Long-wave, forward sweep; (b) long-wave, reverse sweep; (c) mid-wave, forward sweep; (d) mid-wave, reverse sweep

为进一步检验在轨光谱定标的效果,采用全球天基交叉定标系统(GSICS)交叉定标方法^[23],选取GSICS推荐的基准参考仪器干涉式红外大气探测仪IASI和风云四号A星上搭载的GIIRS的有效交叉观测区域进行数据的时空匹配,将IASI与GIIRS的匹配样本数据进行直接比对。图6所示为GIIRS中波第47 pixel与IASI匹配样本的亮温比较结果。图中,虚线是IASI的观测光谱,实线是GIIRS的观

测光谱。从两张图的对比结果可以清楚地看到,经过在轨光谱定标,GIIRS的观测光谱与基准参考仪器IASI的谱线位置基本重合。相对于长波,探测仪中波为水汽吸收波段,谱线变化比较剧烈,很难通过选取特征谱线位置进行在轨光谱定标。本研究通过确定激光的有效采样频率,间接确定了在轨光谱位置的偏差,实现了傅里叶光谱仪在轨高精度光谱定标。

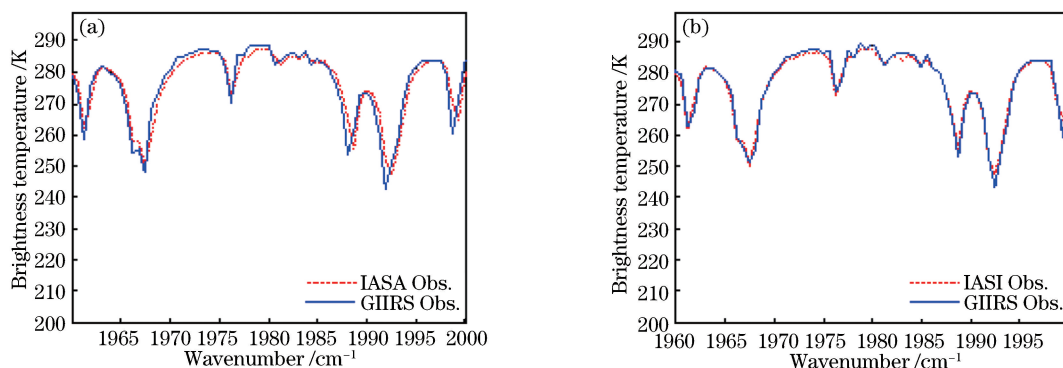


图6 GIIRS中波第47 pixel与IASI匹配样本的亮温比较结果(UTC2017-08-20T14:30)。

(a)发射前的光谱定标系数;(b)在轨光谱定标系数

Fig. 6 Comparison of brightness temperature between 47th pixel in mid-wave region of GIIRS and matching sample of IASI (August 20, 2017 at 14:30 UTC). (a) Spectral calibration coefficient in laboratory; (b) on-orbit spectral calibration coefficient

4 结 论

傅里叶光谱仪的光谱刻度由干涉图的采样点数和参考激光频率共同决定,故而本课题组利用逐线积分辐射传输模拟计算,通过确定激光采样频率的偏差,实现了傅里叶光谱仪的在轨高精度光谱定标,光谱定标精度可达 10×10^{-6} 。该方法已应用于风云四号A星上搭载的GIIRS的在轨光谱定标中,具有较高的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Xu B M. Payload technology of meteorological satellite[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005: 213-215.
徐博明. 气象卫星有效载荷技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 213-215.
- [2] Feng X, Guo Q, Han C P, *et al.* Correction method of zero path difference position [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(6): 795-798, 804.
冯绚, 郭强, 韩昌佩, 等. 干涉图零光程差位置的确定方法[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(6): 795-798, 804.
- [3] Chen H Y, Zhang L M, Li X, *et al.* Hyperspectral

sensor in flight spectral calibration based on characteristic spectra of atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0528003.

陈洪耀, 张黎明, 李鑫, 等. 高光谱遥感器飞行中基于大气特征谱线的光谱定标技术[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0528003.

- [4] Li Z W, Xiong W, Shi H L, *et al.* Study on laboratory calibration of spatial heterodyne spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0430002.
李志伟, 熊伟, 施海亮, 等. 空间外差光谱仪实验室定标技术研究[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0430002.
- [5] Aumann H H, Gregorich D, Gaiser S, *et al.* AIRS algorithm theoretical basis document: level 1B part 1: infrared spectrometer[R]. [S.l.: s.n.], 2000: 12-14.
- [6] Tong Q X, Zhang B, Zheng F L. Hyperspectral remote sensing[J]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 68-70.
童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 68-70.
- [7] Liu P, Wang P G, Hua J W, *et al.* Spectral calibration and ILS measurement of Fourier transform spectrometer [J]. Science Technology and

- Engineering, 2007, 7(17): 4408-4411.
- 刘鹏, 王培纲, 华建文, 等. 傅里叶光谱仪光谱定标及仪器线性函数测定[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(17): 4408-4411.
- [8] Wang W G. Interferometer spectrometer [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1988: 197-200.
- 王文桂. 干涉光谱仪[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1988: 197-200.
- [9] Blumstein D, Chalon G, Carlier T, *et al.* IASI instrument: technical overview and measured performances[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5543: 196-207.
- [10] Tsugawa R, Xia L M, De G G, *et al.* Joint polar satellite system (JPSS) cross track infrared sounder (CrIS) sensor data records (SDR) algorithm theoretical basis document (ATBD) for normal spectral resolution[R]. Washington D. C.: NOAA, 2009: 42-45.
- [11] Knuteson R. Algorithm theoretical basis document for the geostationary imaging Fourier transform spectrometer (GIFTS) Level 0-1 ground data processing[M]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2006: 37-40.
- [12] Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, *et al.* Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2005, 91(2): 233-244.
- [13] Feng X, Zhao F S, Gao W H. Effect of the improvement of the HITRAN database on the radiative transfer calculation[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2007, 108(2): 308-318.
- [14] Zhou S C. Introduction to advanced infrared optical-electronics engineering[M]. Beijing: Science Press, 2014: 309-317.
- 周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 309-317.
- [15] Griffiths P R, de Haseth J A. Fourier transform infrared spectrometry[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007: 19-27.
- [16] Zou Y P, Zhang L, Han C P, *et al.* Study of high accuracy spectral calibration of Fourier transform spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(4): 1268-1275.
- 邹曜璞, 张磊, 韩昌佩, 等. 傅里叶光谱仪高精度光谱定标研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(4): 1268-1275.
- [17] Knuteson R O, Revercomb H E, Best F A, *et al.* Atmospheric emitted radiance interferometer: part II: instrument performance[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21(12): 1777-1789.
- [18] Liu P. Spectral calibration of Fourier transform spectrometer[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2007: 30-31.
- 刘鹏. 干涉式大气垂直探测仪光谱定标方案研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 2007: 30-31.
- [19] Best F A, Revercomb H E, Bingham G E, *et al.* Calibration of the geostationary imaging Fourier transform spectrometer (GIFTS) [J]. 2001, 4151: 21-30.
- [20] Tobin D C, Revercomb H E, Knuteson R O. On-orbit spectral calibration of the geosynchronous imaging Fourier transform spectrometer (GIFTS) [R]. [S.l.]: CALCON, 2003.
- [21] Goody R M, Yung Y L. Atmospheric radiation: theoretical basis [M]. Oxford: Oxford University Press, 1989: 6-11.
- [22] Worden H M, Bowman K W. Tropospheric emission spectrometer (TES) level 1B algorithm theoretical basis document[R]. [S.l.: s.n.], 1999.
- [23] Wu X Q, Hewison T, Tahara Y. GSICS GEO-LEO intercalibration: baseline algorithm and early results [J]. Proceeding of SPIE, 2009, 7456: 745604.