

空间调制干涉成像光谱仪在轨相对定标新方法

常亚运^{1,2} 易维宁¹ 杜丽丽¹ 乔延利¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

²中国科学院大学, 北京 100039

摘要 干涉型成像光谱仪干涉数据会因探测器探元响应不一致产生畸变, 而干涉图的极小偏差会导致复原光谱图有明显变化, 所以对干涉图进行相对定标, 消除探元响应不一致显得尤为重要。提出了一种基于辐射定标场的干涉型成像光谱仪在轨相对定标新方法, 在没有实验室相对定标系数的前提下, 只需要获取地面上垂轨方向覆盖数行 CCD 探元的均匀地物光谱, 每一行地物光谱对应一帧干涉图, 就可以通过这一均匀地物的光谱仿真出干涉图, 与实际所测干涉图进行相位匹配后计算出相对定标系数。验证结果表明使用该方法对干涉图进行相对校正可以取得良好的效果, 校正后的干涉图走势平稳, 在远离零光程差处沿干涉方向呈现明显的干涉条纹, 消除了复原光谱图中的条带。

关键词 光谱学; 光谱复原; 在轨相对定标; 相位匹配; 相对定标系数

中图分类号 TP731

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.083004

A New Method of On-Orbit Relative Calibration for Spatially Modulated Imaging Fourier Transform Spectrometer

Chang Yayun^{1,2} Yi Weining¹ Du Lili¹ Qiao Yanli¹

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Interferograms of the spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer can be distorted with the nonuniformity of array sensors, little deviation will result in notable variation in the recovered spectra, so it is very important to calibrate the interferogram and eliminate the nonuniformity of array sensors before recovery. A new method of on-orbit relative calibration for the spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer based on radiometric calibration field is introduced without the calibration coefficient in laboratory, it only needs the spectra of a uniform field which covers several lines of CCDs across the orbit, each line of spectra corresponds to a frame of interferogram. Simulation and phase matching is carried out to calculate the calibration coefficient. The result shows that the method can get good performance. After calibration, interferogram has a steady tendency and shows significant streaks away from zero point, eliminating the strips in the recovered spectra.

Key words spectroscopy; spectrum recovery; on-orbit relative calibration; phase matching; relative calibration coefficient

OCIS codes 300.6300; 040.1520; 120.4788

1 引言

空间调制干涉型成像光谱仪是 20 世纪 90 年代发展起来的新型成像光谱仪。该仪器的高通量、高分辨率、高成像稳定性等特点使其在各个领域都有巨大的应用前景, 受到世界各国的重视。但是由于其成像原理以及仪器设计的特性, 使得干涉型成像光谱仪的在轨定标问题一直没有得到完善的解决。现在国内外基本上使用实验室的相对定标系数来消除 CCD 探元响应的不一致性, 实现对采集干涉图的相对定标^[1-4], 但是由于卫星在轨运行后 CCD 探元的响应系数会有变化, 这种变化是难以预测的, 所以定标效果难以保证。利用均匀场对光谱仪进行定标在色散型成像光谱仪的数据处理中已经得到很成熟的应用, 但是干涉型成像光

收稿日期: 2014-12-09; 收到修改稿日期: 2015-02-05; 网络出版日期: 2015-07-11

作者简介: 常亚运(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事干涉型成像光谱仪的相对定标方面的研究。

E-mail: chang_yayun@126.com

导师简介: 易维宁(1956—), 女, 研究员, 主要从事遥感图像处理方面的研究。E-mail: yiwn@aiofm.ac.cn

谱仪在采集干涉图的过程中会出现由于干涉条纹的零光程差点与对应 CCD 探元的中心并未对齐而产生的相位偏移问题,所以用均匀场对干涉型成像光谱仪进行相对定标一直没有得到研究和应用。基于此本文提出了通过获取卫星所测均匀地物的光谱,仿真得出该均匀地物的干涉谱与卫星实际采集到的均匀地物的干涉谱进行对比,先计算出相位偏移量,再以加入相位偏移的干涉谱为标准对干涉型成像光谱仪进行相对定标。

2 空间干涉型成像光谱仪光谱复原

图 1(a)为原始干涉图,图 1(b)是由干涉图复原得到的光谱图。干涉图的每一帧干涉面与光谱图中的一行地面影像的光谱对应,干涉图的水平方向对应卫星沿轨方向。

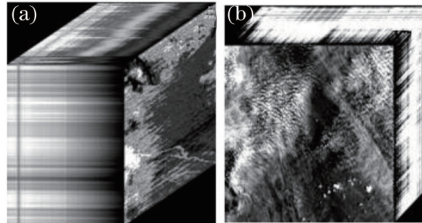


图 1 光谱复原。(a) 复原前干涉图; (b) 复原后光谱图

Fig.1 Spectrum recovery. (a) Interferogram before recovery; (b) spectra after recovery

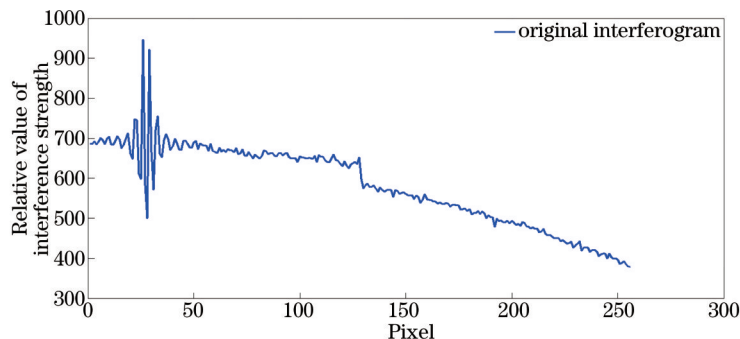


图 2 卫星采集的干涉图

Fig.2 Interferogram collected by satellite

干涉图的复原过程是先对干涉图进行不均匀性校正(即相对定标),然后进行光谱复原(包括干涉图去除趋势项、切趾、相位校正、傅里叶变换),最后进行光谱绝对定标。具体流程如图 3 所示。

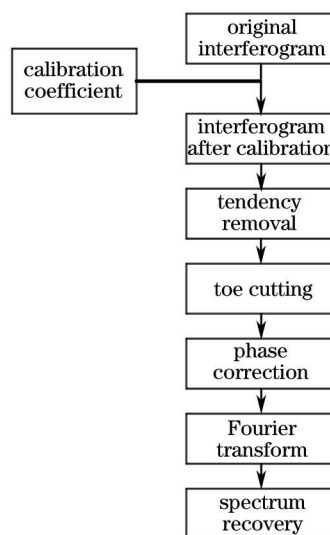


图 3 实验室定标系数复原光谱流程

Fig.3 Flow of spectrum recovery using calibration coefficient in laboratory

当前的复原流程中用实验室获取的定标系数对干涉图进行相对校正,但是卫星在进入轨道后,CCD 探元的响应系数会随着温度、压强等一系列因素的变化而变化,所以校正效果难以保证。

3 相对定标

3.1 数据处理原理

空间干涉成像光谱仪的成像原理如图4所示。主要是通过 Sagnac 棱镜将一束入射光分为两束,两束相干光在探测面上形成干涉图。

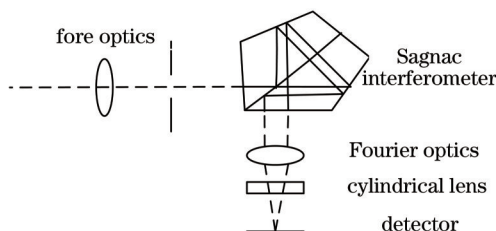


图4 空间干涉型成像光谱仪成像原理

Fig.4 Imaging principle of the spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer

所以根据双缝干涉原理能够仿真出干涉成像光谱仪采集到的干涉图。公式如下:

$$I(x) = \int_{b_1}^{b_2} g(b) \cos(2\pi L/b) db, \quad (1)$$

式中 $I(x)$ 为探测面上 x 处的干涉强度, b_1, b_2 为波长范围, $g(b)$ 为波长为 b 时的光谱强度, L 为光程差。

在实际计算中探测面上的采样点是不连续的, 光谱被分为一系列零散的波段, 所以有

$$I_i = \sum_{j=1}^{j=n} [g_j \times \cos(2\pi L/b_j) + g_j], \quad (2)$$

式中 I_i 为 CCD 面阵上 i 点处的干涉强度, 光谱共分 n 个波段, b_j 为第 j 波段的波长, g_j 是波长为 b_j 时的光谱强度, L 表示 i 点的光程差。

实验中主要思路是利用获取的均匀地物的光谱仿真出干涉谱, 与卫星所采集的这一均匀地物的干涉谱进行对比, 确定定标系数实现相对定标。然而, 实验不能简单地仿真出干涉谱就和卫星实际采集的干涉谱进行对比, 因为实际获取的干涉谱是有相位偏移的, 所以必须在仿真的过程中加入相位偏移, 保证实测干涉谱和仿真干涉谱相位同步, 才能进行比对。相位偏移一般有两类, 一类是由于光学元件(如分束器、透镜等)具有不同的折射率和光学厚度导致入射光的相位偏移, 以及电子学器件(如放大器、滤波器)等导致频率的变化; 另外一类则主要是由于主极大位置定位不精确引入的相位偏移^[4]。相位误差在国内外已有很多学者进行了分析研究^[5-9], 处理相位偏移也是工作的重点。研究中只考虑由于主极大位置定位不精确引入的相位偏移^[10]。令仿真出的干涉谱和实际干涉谱相位一致, 再以加入相位偏移量的干涉谱作为标准对实际干涉谱进行校正, 所以实验过程分两步, 即相位匹配和相对定标系数计算。

3.1.1 相位匹配

仪器有一个预先设定的零光程差处, 然而实际的零光程差点可能出现在设定零光程差点的左侧或是右侧。可以通过加入正负光程差来模拟实际零光程差点的右偏或是左偏。用加入相位误差后的干涉谱与实际干涉谱比较, 计算相对误差。以相对误差最小的干涉谱的相位偏移为实际干涉谱的相位偏移。所以实验中仿真公式为

$$I_i = \sum_{j=1}^{j=n} \{g_j \times \cos[2\pi \times [(i-p) \times l + d]/b_j] + g_j\}, \quad (3)$$

式中 I_i 为仿真出的干涉谱的 i 点处的强度, g_j 是光谱 j 通道的光谱强度, 光谱共有 n 个波段, p 是仪器设定的 CCD 面阵上零光程差处, l 为实验测得的单位像元对应的光程差, d 是在仿真干涉谱中加入的相对于零光程差处的光程差偏移量, b_j 是光谱 j 通道的波长。

通过(3)式计算出一行干涉谱中每一点的干涉强度值, 与实际采集到的干涉图对应位置的一行干涉谱进行对比, 计算相对误差以确定相位偏移。加入计算出的相位偏移形成一行仿真干涉谱, 利用同样的过程得到每一行的仿真干涉谱, 最终形成一个仿真干涉面。

3.1.2 相对定标系数计算

相位匹配之后, 进行相对定标系数计算, 即以仿真得到的加入相位偏移的仿真干涉面作为标准对实际

干涉面进行逐点校正。为了使校正结果更精确,实验采用两点式定标,即测量两组均匀地物——暗场和亮场,确定校正系数 K 和 B , K 和 B 分别为 CCD 面阵每一个探元对应的增益和偏移量。

$$Y_i = Ky_i + B, \quad (4)$$

$$Y_h = Ky_h + B, \quad (5)$$

式中 Y_i, Y_h 分别为加入相位偏移的均匀暗场和均匀亮场光谱的仿真干涉面, y_i, y_h 分别为对应暗场和亮场实际 CCD 探元采集的干涉面,因为实际卫星采集到的数行均匀亮场(或暗场)对应的干涉面是不同的, y_i, y_h 是对这些干涉面求平均的结果。

3.2 数据处理流程

提出的新方法是获取垂直轨道方向数行均匀地物的光谱,仿真得出干涉图,即一帧 CCD 干涉面。通过仿真出的干涉面与这一行地物对应的光谱仪所采集的干涉面进行比较,实现空间干涉型成像光谱仪的在轨相对定标。具体的处理过程如图 5 所示。

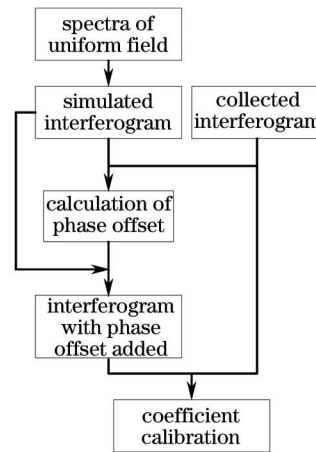


图 5 新方法复原光谱流程图

Fig.5 Flow of spectrum recovery by the new method

4 实验验证与分析

4.1 计算定标系数

实验分别以戈壁和海洋作为均匀亮场和均匀暗场。

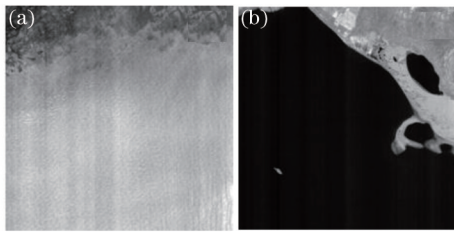


图 6 均匀场。(a) 均匀亮场; (b) 均匀暗场

Fig.6 Uniform field. (a) Uniformly bright field; (b) uniformly dark field

计算干涉图零光程差点的偏移量,相位偏移最多为 0.5 pixel,在实验中以 10 nm(大约 0.05 pixel 大小对应的的光程差)为步长加入正负光程差。

$$I_i = \sum_{j=1}^{j=115} \{g_j \times \cos[2\pi \times [(i-26) \times 220 + 10 \times (k-1)]/b_j] + g_j\}. \quad (6)$$

光谱共有 115 个波段,26 是仪器设定的 CCD 面阵零光程差处, k 取 -9~11 达到在仿真干涉谱中加入相对于零光程差点 -100~100 nm 的光程差。220 为实验测得的单位像元对应的光程差^[11]。

如图 7 所示,图中蓝色的谱线为实际的干涉谱,偏绿色的是在仿真过程中加入负的光程差(表现为实际零光程差点在设定零光程差点的左侧),偏红的为加入正的光程差(表现为实际零光程差点在设定零光程差点的右侧)。针对实验数据,当 $k=2$ 时,实际干涉谱和仿真干涉谱的相对误差最小,实验结果表明实际零光程

差点相对于设定零光程差会有 10 nm 的光程差偏移量。

将计算得出 k 的取值代入(6)式得到仿真干涉图。由(4)、(5)式计算出定标系数 K, B , 定标系数 K 和 B 都是大小为 512×256 的矩阵。

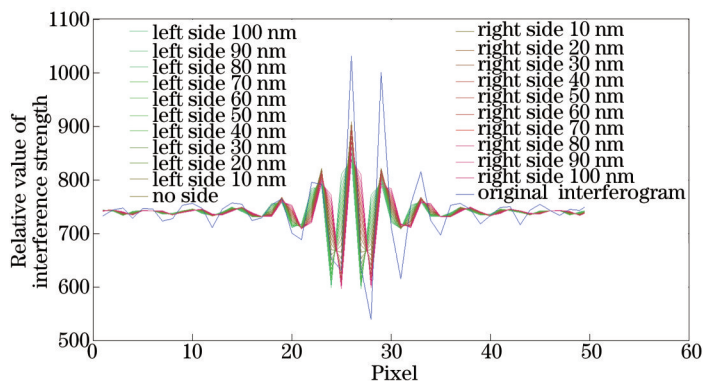


图7 相位匹配过程

Fig.7 Process of phase matching

4.2 复原图像效果验证

利用实验所得的 K 和 B 对另一幅实际测得的干涉图像进行相对定标,

$$Y_{\text{new}}(m) = K \times Y_{\text{pre}}(m) + B, \quad (7)$$

式中 $Y_{\text{pre}}(m)$ 对应于未进行相对定标干涉图的第 m 帧干涉面, 图像共 512 个干涉面, 每一个干涉面大小为 512×256 。

从图8可以看出, 定标后干涉图有明显的改善。相对定标前均匀亮场的干涉谱每一行会呈现较大区别, 与干涉图前半部分相比, 后半部分干涉强度值有明显下降。相对定标后均匀亮场的干涉谱每一行基本一致, 干涉图趋势平稳。

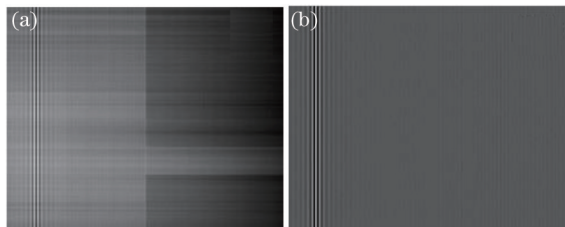


图8 校正前后干涉图。(a) 校正前; (b) 校正后

Fig.8 Interferograms before and after correction. (a) Before correction; (b) after correction

相对定标前, 光程差较大时会有噪声, 干涉图零光程差点两侧差异很大, 干涉条纹后半段会有尖锐下降。经过相对定标之后的干涉图去除了这些噪声, 零光程差两侧只有由零光程点偏移导致的较小差异, 干涉图走势平稳。

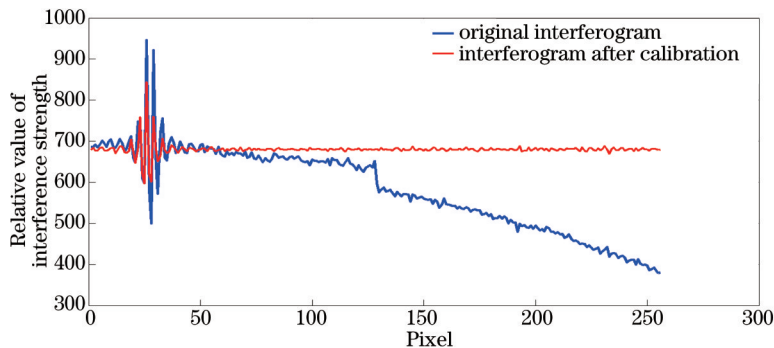


图9 校正前后的干涉谱

Fig.9 Interference spectra before and after correction

实验将经过上述相对定标处理的干涉数据和用实验室定标系数处理的相同干涉数据进行相同的去直

流处理、切趾处理、Mertz相位校正处理、傅里叶复原处理^[12-16],将得到的复原结果进行比较,结果表明,复原效果得到明显改善,消除了光谱图中的条带噪声,复原结果如图10~15所示。

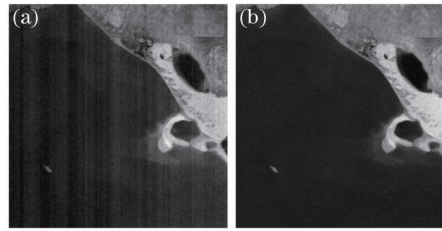


图10 复原光谱图第20波段。(a) 实验室定标系数; (b) 新方法

Fig.10 20th wavelength band of recovered spectra. (a) Using calibration coefficient in laboratory; (b) using new method

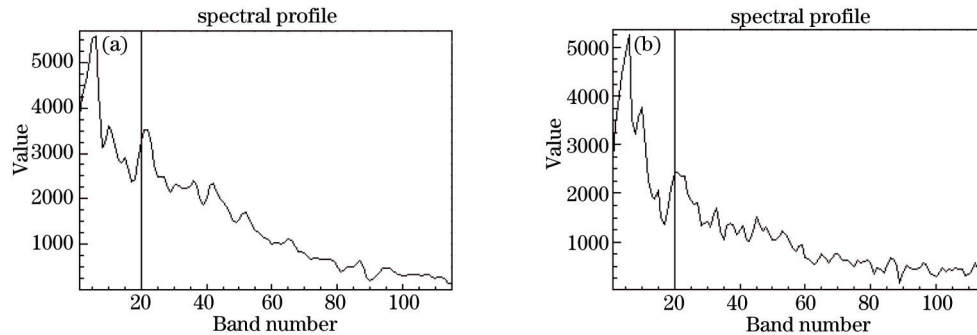


图11 光谱对比。(a) 实验室定标系数复原的光谱; (b) 新方法复原的光谱

Fig.11 Spectrum comparison. (a) Spectrum recovered using calibration coefficient in laboratory;

(b) spectrum recovered with new method

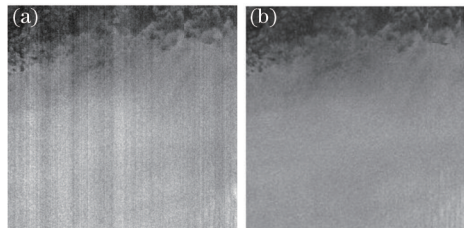


图12 复原光谱图第20波段。(a) 实验室定标系数; (b) 新方法

Fig.12 20th wavelength band of recovered spectra. (a) Using calibration coefficient in laboratory; (b) using new method

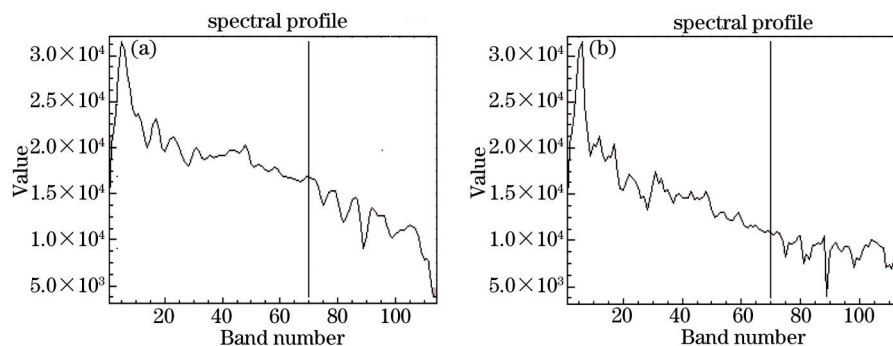


图13 光谱对比。(a) 实验室定标系数复原的光谱; (b) 新方法复原的光谱

Fig.13 Spectrum comparison. (a) Spectrum recovered using calibration coefficient in laboratory;

(b) spectrum recovered with new method

从图13可以看出,定标后干涉图有明显的改善。相对定标前均匀亮场的干涉谱每一行会呈现较大区别,与干涉图前半部分相比,后半部分干涉强度值有明显下降。相对定标后均匀亮场的干涉谱每一行基本一致,干涉图趋势平稳。

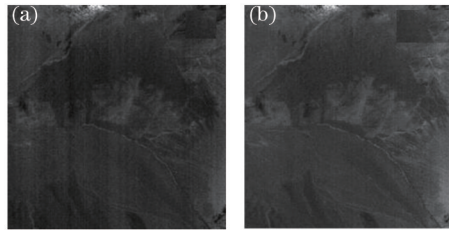


图14 复原光谱图第20波段。(a) 实验室定标系数;(b) 新方法

Fig.14 20th wavelength band of recovered spectra. (a) Using calibration coefficient in laboratory; (b) using new method

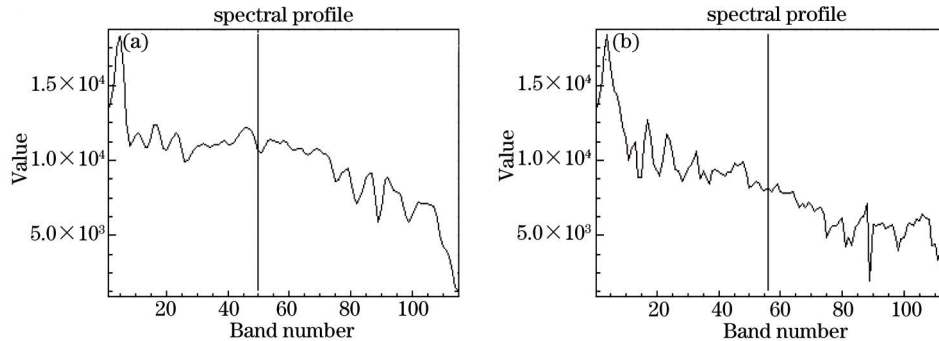


图15 光谱对比。(a) 实验室定标系数复原的光谱;(b) 新方法复原的光谱

Fig.15 Spectrum comparison. (a) Spectrum recovered using calibration coefficient in laboratory;
(b) spectrum recovered with new method

5 结 论

通过获取地面均匀地物的光谱,仿真得出干涉图并与卫星实际测得该均匀地物的干涉图进行比对,实现对干涉图像的相对定标。实验表明这种方法能够取得较好的效果,填补了空间调制型成像光谱仪在轨相对定标的空缺,使得空间调制型成像光谱仪的相对定标更加完善,为空间调制型成像光谱仪数据能更有效地实现量化应用提供帮助。

参 考 文 献

- 1 Xiang Libin, Yuan Yan. Aspects of the data processing of the single sided interferogram[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(12): 1869-1874.
相里斌,袁 艳. 单边干涉图的数据处理方法研究[J]. 光子学报, 2006, 35(12): 1869-1874.
- 2 Huang Min, Xiang Libin, Lü Qunbo, *et al.*. Research on spatially modulated Fourier transform imaging spectrometer data processing method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(3): 855-858.
黄 旻,相里斌,吕群波,等. 空间调制型干涉光谱成像仪数据处理方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(3): 855-858.
- 3 M L Forman, W H Steel, G A Vanasse. Correction of asymmetric interferograms obtained in Fourier spectroscopy[J]. JOSA, 1966, 56(1): 59-63.
- 4 M L Forman. Fast Fourier-transform technique and its application to Fourier spectroscopy[J]. JOSA, 1966, 56(7): 978-979.
- 5 Guo Yuan, Mao Qi, Chen Xiaotian, *et al.*. Study of a fast windowed Fourier filtering method for interference fringes[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0612008.
郭 媛,毛 琦,陈小天,等. 干涉条纹快速加窗傅里叶滤波方法的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0612008.
- 6 Zhong Libo, Tian Yu, Rao Changhui. Influence of static aberrations on the accuracy of cross spectrum phase reconstruction and the compensated method[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0701002.
钟立波,田 雨,饶长辉. 静态像差对交叉谱相位复原精度的影响及补偿方法[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0701002.
- 7 Lü Jinguang, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, *et al.*. Analysis of wedge error of beam sputter in spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1030001.
吕金光,梁静秋,梁中翥,等. 空间调制傅里叶变换红外光谱仪分束器楔形误差分析[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1030001.
- 8 Shi Hailiang, Xiong Wei, Li Zhiwei, *et al.*. Phase error correction of spatial heterodyne spectrometer[J]. Acta Optica

- Sinica, 2013, 33(3): 0330003.
施海亮, 熊伟, 李志伟, 等. 空间外差光谱仪相位误差修正[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0330003.
- 9 Zhang Xianling, Gao Wanrong, Chen Chaoliang, *et al.*. Extraction and compensation for depth-resolved phase error in spectral domain optical coherence tomography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0204002.
张仙玲, 高万荣, 陈朝良, 等. 谱域光学相干层析成像中深度分辨相位误差提取及补偿[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0204002.
- 10 Zhao Baochang, Yang Jianfeng, Xue Bin, *et al.*. Calibration of Chang 'E1 satellite interference imaging spectrometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(5): 769-775.
赵葆常, 杨建锋, 薛彬, 等. 嫦娥一号干涉成像光谱仪的定标[J]. 光子学报, 2010, 39(5): 769-775.
- 11 Yin Shimin, Ji Zhongying, Cui Yan, *et al.*. Research on pixel response nonuniformity correction of CCD in interferential imaging spectrometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(4): 880-884.
殷世民, 计忠瑛, 崔燕, 等. 干涉成像光谱仪 CCD 像元响应非均匀性校正研究[J]. 光子学报, 2009, 38(4): 880-884.
- 12 Xiang Libin, Ji Zhongying, Huang Min, *et al.*. On the calibration of the spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(7): 850-853.
相里斌, 计忠瑛, 黄旻, 等. 空间调制干涉光谱成像仪定标技术研究[J]. 光子学报, 2004, 33(7): 850-853.
- 13 Ji Zhongying, Xiang Libin, Wang Zhonghou, *et al.*. Research of calibration technology of interference hyperspectral imager on secondary planet[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(4): 208-283.
计忠瑛, 相里斌, 王忠厚, 等. 干涉型超光谱成像仪的星上定标技术研究[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(4): 208-283.
- 14 Gao Jing, Ji Zhongying, Cui Yan, *et al.*. Onboard calibration system of spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(5): 902-906.
高静, 计忠瑛, 崔燕, 等. 空间调制干涉光谱成像仪的星上定标系统[J]. 光子学报, 2010, 39(5): 902-906.
- 15 Cui Yan, Ji Zhongying, Gao Jing, *et al.*. Study on the spectral radiometric calibration method of the spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(12): 1718-1721.
崔燕, 计忠瑛, 高静, 等. 空间调制干涉光谱成像仪光谱辐射度定标方法研究[J]. 光学学报, 2005, 25(12): 1718-1721.
- 16 Yao Lele, Zhao Wei, Fan Shiming, *et al.*. Study on on-orbit data relative radiometric calibration of hyper spectral imager on HJ-1A satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2009, 18(2): 42-47.
姚乐乐, 赵卫, 范士明, 等. 环境-1A 超光谱成像仪相对辐射定标方法应用研究[J]. 航天器工程, 2009, 18(2): 42-47.

栏目编辑: 吴秀娟