

大孔径静态干涉成像光谱仪探测器配准误差标定方法

张周锋^{1,2,3}, 谢永军¹, 胡炳樑¹, 殷勤业², 于涛^{1,3}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 西安交通大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710049; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 大孔径静态干涉成像光谱技术是近年来出现的一种新型干涉成像光谱技术, 具有高通量、多通道等优点, 然而干涉图与探测器之间存在一定配准误差时, 则会对复原光谱产生较大的影响, 甚至影响到仪器的最终应用。针对该问题, 通过对大孔径静态干涉成像光谱仪成像机理的分析, 提出了一种探测器配准误差的标定方法, 经验证该方法可以很好地解决探测器的配准误差, 最终提高了复原光谱的精度, 该研究对大孔径静态干涉成像光谱仪的研制具有重要的指导意义。

关键词: 干涉成像光谱仪; 大孔径; 探测器配准误差; 最小二乘法

中图分类号: O433.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1643-04

Calibration method for large aperture static imaging spectrometer's detector registration error

Zhang Zhoufeng^{1,2,3}, Xie Yongjun¹, Hu Bingliang¹, Yin Qinye², Yu Tao^{1,3}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As a novel type Fourier transform imaging spectrometry, large aperture static imaging spectrometry has come forth in recent years, which has many advantages such as high throughput, multi-channel and so on. However, if there are certain registration error on the detector array and interferogram, it will have a greater impact on the restoring spectrum, and even affect the final application of the instrument. To solve this problem, according to the imaging principle analysis of LASIS, a detector registration error calibration method was given, after verification, this method can well solve the problem of the detector registration error, and the accuracy of recovered spectrum was evidently improved. This study has important guiding significance for the development of large aperture static imaging spectrometer.

Key words: interferemce imaging spectrometer; large aperture; detector registration error;
least square method

收稿日期: 2014-09-07; 修订日期: 2014-10-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2009CB724005)

作者简介: 张周锋(1981-), 男, 博士生, 研究方向为光谱成像技术、光学系统设计与检测。Email: jczf@163.com

导师简介: 胡炳樑(1973-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为光谱成像技术与信息处理。Email: hbl@opt.ac.cn

通讯作者: 于涛(1980-), 男, 博士生, 研究方向为光谱成像技术。Email: yutao@opt.ac.cn

0 引言

大孔径静态干涉成像光谱仪(Large Aperture Static Interference Imaging Spectrometer, LASIS) 是一种基于横向剪切干涉仪的时空混合调制型干涉成像光谱仪,采用面阵探测器,并依靠推扫获得二维空间信息的同时得到一维光谱信息。目前它已成为人们研究和获取目标三维信息(二维空间信息和一维光谱信息)的重要手段和前沿科学,在航空航天遥感中发挥着重要的作用^[1-4]。

由于大孔径静态干涉成像光谱仪获取的数据信息是一个数据立方体,当数据立方体空间方向(或光谱方向)与其探测器行(或列)之间存在配准误差,会使得 LASIS 干涉图光程差发生变化,导致无法准确复原光谱信息。文中从 LASIS 成像原理入手,建立了探测器配准误差的模型,给出了切实可行的探测器配准误差标定方法,并对标定方法进行了误差分析。

1 LASIS 简介

LASIS 光学系统包括前置光学系统、横向剪切干涉仪、傅里叶成像镜及探测器等部分,原理如图 1 所示。

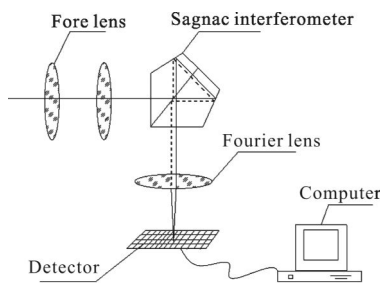


图 1 LASIS 光学系统原理图

Fig.1 Optical principle schematic of LASIS

设被剪切开的两束光之间的距离为 d , θ 为入射光线经过横向剪切干涉仪后与成像透镜光轴的夹角, f' 为傅氏镜的焦距, y 为光线汇聚点到成像中心的距离。那么在探测器上干涉时的光程差为:

$$\delta = d \sin \theta \tag{1}$$

当视场角 θ 很小时,有

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{f'} \tag{2}$$

光程差可表示为:

$$\delta = \frac{dy}{f'} \tag{3}$$

LASIS 在每一次曝光时可获得一帧干涉图像,通过推扫,同一视场的不同目标单元其光程差不同,连续采集可获得同一地物目标不同光程差的干涉信息,推扫完一个视场,才能得到完整的目标干涉图。在推扫过程中,假定与推扫方向相同的一排探测器单元为“一行”,当 LASIS 推扫过整个视场,则“一行”探测器单元就输出某地元的一条干涉图,表示为^[5-7]:

$$I(y) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B_x(\nu) \cos(2\pi\nu \frac{dy}{f'}) d\nu \tag{4}$$

式中: $B_x(\nu)$ 为像面 y 处对应的场景中 x 处地物的光谱分布; ν_1 、 ν_2 分别为最小和最大波数(cm^{-1})。通过对上述采集干涉图进行预处理,再采用快速 Fourier 变换可复原得到目标的光谱图^[7]。

2 探测器配准误差标定方法

2.1 探测器配准误差

理想条件下, LASIS 干涉图空间方向、光谱方向分别对应于探测器的行方向及列方向,然而在实际中探测器阵列往往与干涉图之间存在一定的夹角,如图 2 所示。

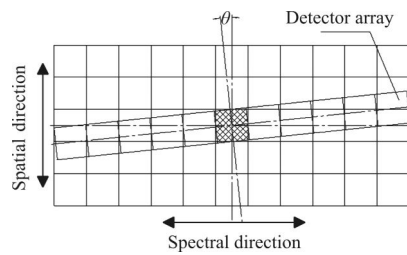


图 2 探测器配准误差示意图

Fig.2 Schematic diagram of detector registration error

设探测器阵列与干涉图之间的夹角为 θ , 像元大小为 s , 干涉图光谱方向光程偏差为 Δy , 当 LASIS 推扫过整个视场, 则“一行”探测器单元输出的干涉图表示为:

$$I'(\Delta) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B_x(\nu) \cos(2\pi\nu\delta') d\nu \tag{5}$$

式中: $\delta' = y + \Delta y$, δ' 为附加有探测器匹配误差的光程差, 从公式(5)可以看出, 探测器输出的干涉图会出现失真现象, 因此复原出的光谱就跟真实光谱存在

一定的偏差^[8-9],如图 3 所示,其中实线是该地物点的真实光谱曲线,虚线为存在探测器配准误差时得到的畸变光谱曲线。

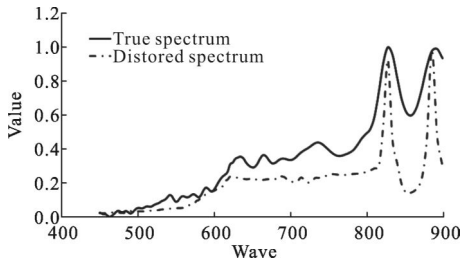


图 3 复原光谱

Fig.3 Recovered spectrum

2.2 标定坐标系的建立

为了统一系统安装基准,一般 LASIS 研制中均设计有基准棱镜,方便进行基准的转换,如图 4 所示。定义基准棱镜坐标系为 $o'-x'y'z'$,探测器坐标系为 $o-xyz$,其中基准棱镜坐标系中 z' 向对应于探测器坐标系中的 z 向,代表光轴方向; x' 向对应于探测器坐标系中的 x 向,代表空间方向; y' 向对应于探测器坐标系中的 y 向,代表光谱方向。

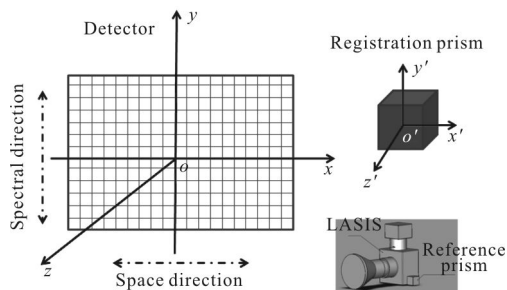


图 4 LASIS 及基准棱镜坐标系定义(右下角为基准镜与 LASIS 的装配图)

Fig.4 Definition of coordinate system for LASIS and reference prism
(The bottom right corner inset of the Fig.4 shows an assembly diagram for LASIS and reference prism)

2.3 标定原理

用两台经纬仪、转台及平行光管构成一套标定系统,标定原理如图 5 所示。首先在平行光管像面安装星点目标,将两台自准直经纬仪调整水平,保证经纬仪(a)、经纬仪(b)的俯仰角为 90° ,再调整 LASIS 使基准棱镜 x' 方向与经纬仪(b)自准, z' 方向与经纬仪(a)自准,最后旋转转台使星点目标在 LASIS 光谱方向上移动,转台转动过程中经纬仪始终处于与基

准棱镜自准状态,计算机采集星点图像,通过公式(6),(7)计算星点图像质心位置,采用最小二乘法对数据进行拟合,最后通过计算拟合曲线的斜率求出探测器配准误差。

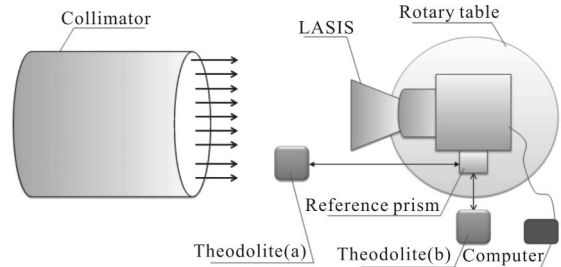


图 5 探测器配准误差测试原理

Fig.5 Detector registration error test principle

带阈值的质心计算方法:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(x_i, y_j) - T] \cdot x}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(x_i, y_j) - T]} \quad (6)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(x_i, y_j) - T] \cdot y}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(x_i, y_j) - T]} \quad (7)$$

式中: T 为采用的背景阈值; $f(x_i, y_j)$ 为所采集的图像灰度值; (x_i, y_j) 为采集图像坐标位置。

3 标定结果及误差分析

3.1 标定结果

标定结果如图 6 所示,其中实线为由星点质心位置构成的曲线,虚线为采用最小二乘法拟合的曲线,拟合方程为:

$$y = 0.0003x + 3.9636 \quad (5)$$

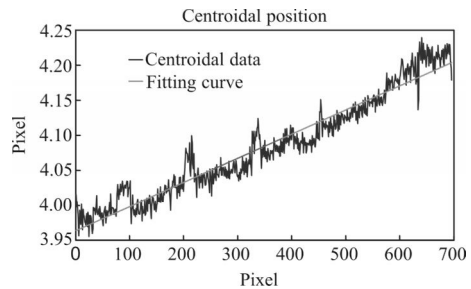


图 6 探测器配准误差检测结果

Fig.6 Measurement result for detector registration error

可以得出 LASIS 干涉图光谱方向与探测器列方

向之间的匹配误差为 $1.03'$, 由于 LASIS 空间方向与光谱方向垂直, 探测器行方向与列方向垂直, 因此没有必要再对干涉图空间方向与探测器行方向之间的匹配误差进行标定。

对探测器配准误差进行修正后干涉图数据进行光谱复原, 得到修正后的光谱数据, 如图 7 所示。根据计算, 探测器配准误差修正前全波段范围内复原光谱相对真实光谱平均偏差 11.4% , 探测器配准误差修正后全波段范围内复原光谱相对真实光谱平均偏差 2.9% , 可以看出, 探测器配准误差修正后, 复原光谱精度大幅提高。

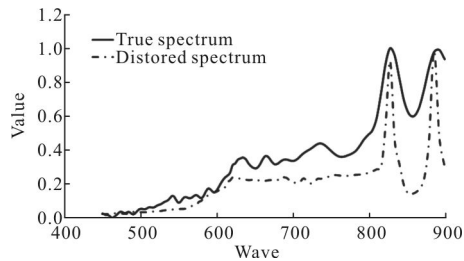


图 7 探测器配准误差修正后的复原光谱

Fig.7 Recovered spectrum after correcting detector registration error

3.2 标定误差分析

该标定方法中所采用的转台在测试中只起到驱动 LASIS 推扫视场的作用, 不进行实际测量, 转动过程中的监测数据完全依靠经纬仪进行实时测量, 因此, 转台的误差不计入修正误差。扣除该因素外, 该方法中的误差源主要归结为经纬仪的调平误差、经纬仪自准直测量误差、图像判读误差、最小二乘法曲线拟合误差 4 项^[10]。

经纬仪的调平误差(σ_1): $1''$;

经纬仪自准直测量误差(σ_2): $1.5''$;

判读误差(σ_3): 0.5 个像元($8.5''$);

最小二乘法曲线拟合误差(σ_4): $7.8''$;

$$\sigma = \sqrt{2\sigma_1^2 + 2\sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} = 11.8''$$

所以, 该方法的最终误差为 $11.8''$ 。

4 结论

文中从 LASIS 成像原理入手, 分析了 LASIS 探测器阵列与干涉图之间匹配误差测试的重要性, 建立

了匹配误差的模型, 并给出了具体的标定原理及标定结果, 最后对标定的误差进行了分析。该方法的有效性已经在工程实践中得到验证, 为 LASIS 配准误差的校正提供了方便, 最终提高了复原光谱的精度。

参考文献:

- [1] Mu Tingkui, Zhang Chunmin, Ren Wenyi, et al. Static polarization-difference interference imaging spectrometer [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3507-3509.
- [2] Wu Haiying, Zhang Sanxi, Wang Weiqiang, et al. Interference visibility of wide-field-of-view polarization interference imaging spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 202-203. (in Chinese)
- [3] Li Xiangbin. Research on the correction algorithm for LASIS image sequence [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese)
- [4] Cheng Xin, Zhang Bao, Hong Yongfeng, et al. Optical design of an airborne dual-wavelength imaging spectrometer with high throughput [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 691-692. (in Chinese)
- [5] Meng Hemin, Gao Jiaobo, Xiao Xiangguo, et al. design and validation of infrared interferential imaging spectrometer with high flux [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 2904-2905. (in Chinese)
- [6] Wadsworth W, Dybwad J-P. A very fast imaging FT spectrometer for on line process monitoring and control [C]// SPIE, 1998, 3537: 54-61.
- [7] Liu Yangyang, Lu Qunbo, Zeng Xiaoru, et al. Critical data processing technology for spectral image inversion in a static computational spectral imager [J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(6). (in Chinese)
- [8] Xiang Libin, Lu QunBo, Yuan Yan, et al. Modeling and correction of the effect of detector lateral fringe error in the large aperture static imaging spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(4): 1137-1141. (in Chinese)
- [9] Tang Yi, Tang Qiuyan, Wang Xiaoyan, et al. Simulation and analysis of interference imaging spectrometer influenced by satellite vibration [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(11): 3149-3153. (in Chinese)
- [10] Fei Yetai. Error Theory and Data Processing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 5. (in Chinese)