

大孔径静态干涉成像光谱仪径向畸变导致的谱线偏移误差的校正

安玲坪 王爽 张耿 李娟 刘学斌

Corrective method for spectral offset error caused by radial distortion in the large aperture static imaging spectrometer

AN Ling-ping, WANG Shuang, ZHANG Geng, LI Juan, LIU Xue-bin

引用本文:

安玲坪, 王爽, 张耿, 李娟, 刘学斌. 大孔径静态干涉成像光谱仪径向畸变导致的谱线偏移误差的校正[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 382–389. doi: 10.37188/CO.2020–0084

AN Ling-ping, WANG Shuang, ZHANG Geng, LI Juan, LIU Xue-bin. Corrective method for spectral offset error caused by radial distortion in the large aperture static imaging spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 382-389. doi: 10.37188/CO.2020-0084

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0084>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大偏离度非球面检测畸变校正方法

Distortion correcting method when testing large-departure asphere

中国光学. 2017, 10(3): 383 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0383>

基于中阶梯光栅的波长定标方法研究

Spectral calibration based on echelle

中国光学. 2017, 10(3): 376 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0376>

大随机相位误差下条带模式合成孔径激光雷达成像实验

Stripmap mode synthetic aperture ladar imaging under large random phase errors condition

中国光学. 2019, 12(1): 130 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0130>

低阶梯多级微反射镜高度误差分析及制作研究

Error analysis and fabrication of low-stepped mirrors

中国光学. 2019, 12(4): 791 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0791>

Seya-Namioka单色仪中光栅曲率半径误差的影响及补偿

Effect and compensate of grating curvature radius error in Seya-Namioka monochromator

中国光学. 2018, 11(4): 623 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0623>

光谱成像技术在海域目标探测中的应用

Application of spectral imaging technology in maritime target detection

中国光学. 2017, 10(6): 708 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0708>

文章编号 2095-1531(2021)02-0382-08

大孔径静态干涉成像光谱仪径向畸变导致的谱线偏移误差的校正

安玲坪^{1,2}, 王爽^{1*}, 张耿¹, 李娟¹, 刘学斌¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所光谱成像技术重点实验室, 陕西西安 710119;
2. 中国科学院大学北京 100049)

摘要:为提高大孔径静态干涉成像光谱仪在视场增大时的光谱定标精度,减小径向畸变对光谱精度的影响,本文提出一种基于光谱—畸变关联模型的光谱定标系数修正方法,给出了波数和波长修正公式。采用 594.1 nm 和 632.8 nm 气体激光器对成像光谱仪进行了光谱成像实验,并对数据进行了处理和分析。结果表明,当存在 0.3% 的桶形畸变时,边缘视场的反演光谱存在 2 nm 左右的偏移,利用本文方法校正后,谱线偏移减小到 0.1 nm 左右。该方法仅需根据镜头畸变参数即可完成修正,简化了实验室光谱定标流程,提高了工作效率,也可应用于星载干涉光谱数据的在轨参数校正。

关键词:大孔径静态干涉成像光谱仪;光谱定标;误差校正;畸变模拟

中图分类号:TP751.1

文献标志码:A

doi:10.37188/CO.2020-0084

Corrective method for spectral offset error caused by radial distortion in the large aperture static imaging spectrometer

AN Ling-ping^{1,2}, WANG Shuang^{1*}, ZHANG Geng¹, LI Juan¹, LIU Xue-bin¹

(1. *Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail: wangshuang@opt.ac.cn*

Abstract: In order to improve the spectral calibration accuracy of the large aperture static imaging spectrometer when its field of view is increased, and to reduce the influence of radial distortion on its spectral accuracy, we propose a corrective method for spectral calibration coefficients based on a spectral distortion correlation model. To begin the process, the wave number and wavelength correction formulas are given. Using 594.1 nm and 632.8 nm gas lasers, a spectroscopic imaging experiment was performed on the imaging spectrometer, and the data was processed and analyzed. The results show that when there is a barrel distortion of 0.3%, the inversion spectrum at the edge of the field of view shifts approximately 2 nm. After implementing the corrective method of this paper, the line shift is reduced to approximately 0.1 nm. This method only needs to be corrected according to the lens distortion parameters, which simplifies the laboratory spectral calibration process and improves work efficiency. It can also be applied to the orbit parameter correction of space-

收稿日期:2020-05-08; 修订日期:2020-06-15

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2018YFB0504900, No. 2018YFB0504901)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFB0504900, No. 2018YFB0504901)

borne interference spectral data.

Key words: Large Aperture Static Imaging Spectrometer (LASIS); spectral calibration; error correction; distortion simulation

1 引言

成像光谱仪可同时获取目标的二维空间信息和一维光谱信息, 具有“图谱合一”的特点, 在目标特性检测、空间遥感以及气象探测等领域有重要应用^[1-5]。20世纪80年代后期出现的无动镜干涉成像光谱技术^[6-7], 为实现轻小型、高稳定性干涉成像光谱仪打下了基础。大孔径静态干涉成像光谱仪 (Large Aperture Static Imaging Spectrometry, LASIS) 出现于90年代末^[8], 无狭缝和运动部件, 高通量和高稳定性的优势并存, 是实现高光谱成像的重要途径^[9], 有着广阔的应用前景。为获得高质量的光学信息, 光学系统通常只在近轴区域, 即小视场角成像。随着遥感仪器的进一步发展及数据实时性要求的不断提高, 增大光谱仪器的视场角已成为一种趋势。

LASIS 面阵探测器包含多个探测单元, 当视场角增大时, 单次成像包含更多目标信息, 可有效减少扫描次数, 提高工作效率的同时还可以减少目标随时间变化导致的误差。但是图像边缘的畸变效应也会更加明显, 探测单元的离轴角会使光程差改变^[10], 此时干涉图像存在径向畸变导致的误差, 使得最终复原后光谱图两边相对于中间谱线位置发生偏移, 有研究表明这种现象会影响辐射定标精度^[11]。谱线偏移后需要对光谱定标系数进行修正, 且光谱定标对辐射定标影响很大。因此, 校正径向畸变导致谱线偏移产生的误差非常有必要。

在实验室光谱定标过程中采用小视场多次定标的方法可实现精准定标, 但是该方法大幅度降低了定标的工作效率, 且随着成像光谱仪视场的增大, 该方法很难满足实际工作要求。现有的畸变校正方法多为直接校正探测器采集到的信号^[12-14], 这些方法并不适用于 LASIS 探测器接收到的干涉图, 但是通过校正反演光谱可以实现间接校正。本文在分析 LASIS 的工作原理及光谱反演过程的基础上, 提出了通过探测器畸变数据获得反演光谱偏移率, 进而修正光谱定标系数的

方法。最后结合实验室定标数据证明了本方法能够有效校正 LASIS 光谱定标误差, 改善数据质量。

2 误差校正方法的理论分析

LASIS 主要有前置光学系统, 干涉系统, 傅立叶成像系统和探测器 4 个部分^[8,15], 结构如图 1 所示。LASIS 光学系统是普通照相系统的前置镜, 没有狭缝限制, 能够实现高光通量, 能量利用率高, 具有大孔径优势。利用 Sagnac 横向剪切干涉仪产生光程差, 不需要运动部件, 系统简单, 稳定性高。面阵探测器可获得一维空间的干涉信息强度, 再通过主动或被动推扫即可获得另一维空间信息。

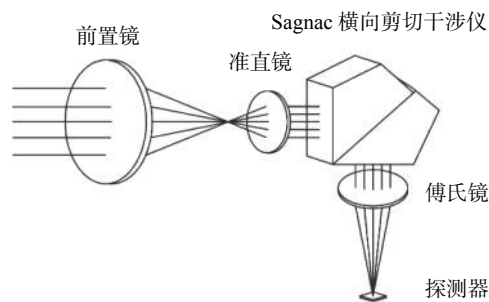


图 1 LASIS 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LASIS structure

LASIS 干涉系统原理如图 2 所示。傅氏镜焦距为 f_f , 某一像点 S 被 Sagnac 干涉仪剪切成在垂直于光轴方向相距 d 的 2 个虚像 S_1 、 S_2 , 视场角为 α 的两束平行光通过傅氏镜后, 在成像面处汇聚到与光轴相距 y 的一点, 此时存在光程差 x , 从而发生干涉^[16]。

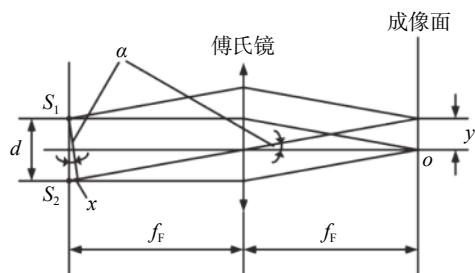


图 2 LASIS 干涉原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of LASIS interference

$$x = d \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

$$\sin \alpha \approx \tan \alpha = \frac{y}{f_F}, \quad (2)$$

$$x = \frac{dy}{f_F}. \quad (3)$$

LASIS 测量目标光谱辐射的干涉信息, 可通过数学计算方法利用变换的方式反演出目标光谱。光谱强度与干涉强度是傅立叶变换对, 关系式如下:

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\nu) \exp(2\pi i \nu x) d\nu, \quad (4)$$

$$B(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x) \exp(-2\pi i \nu x) dx, \quad (5)$$

式中, x 为光程差, ν 为波数, I 为干涉强度, B 为光谱强度。理想情况下光程差 x 可以取到无穷大来反演完整的目标光谱 B , 但是受光学系统和探测器尺寸限制, 在干涉图采样过程中无法将光程差取到无穷大, 令截止频率为 L , 得到的干涉图为:

$$I_L(x) = \int_{-L}^{+L} B(\nu) \exp(2\pi i \nu x) d\nu = I(x) \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{2L}\right), \quad (6)$$

式中, $I_L(x)$ 相当于理想干涉图 $I(x)$ 与矩形函数 $\text{rect}\left(\frac{x}{2L}\right)$ 相乘, 此时得到的反演光谱相当于理想反演光谱卷积了一个 sinc 函数, 出现了展宽^[17]。

$$B'(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x) \text{rect}\left(\frac{x}{2L}\right) \exp(-2\pi i \nu x) dx = B(\nu) \cdot [2L \cdot \text{sinc}(2\pi \nu L)]. \quad (7)$$

对于每个探测器像元, 得到的信号强度是一定范围的积分, 探测器像元 (i, j) 采集到的待测目标像元 i 的第 j 个光谱通道的辐射信号为:

$$I(i) = \int_{\nu_{j1}}^{\nu_{j2}} B'(\nu) \exp(2\pi i \nu x) d\nu, \quad (8)$$

式中, ν_{j1} 和 ν_{j2} 表示探测器像元 (i, j) 包含的最小和最大波数。

当视场角增大时, 垂轴放大率会随之改变, 成像面干涉图的径向畸变无法忽略, 且畸变程度与像元位置到畸变中心的距离的平方成正比。对于图像来说, 径向畸变不会改变清晰度, 但是会改变图像的几何位置^[18], 图 2 中两束相干光的汇聚点变为:

$$y' = y(1 + kr^2) = yK(r), \quad (9)$$

式中, k 为径向畸变二次项系数, $k = 0$ 时无畸变,

$k > 0$ 时为正畸变, 即桶形畸变, $k < 0$ 时为负畸变, 即枕形畸变, 畸变效果如图 3 所示。

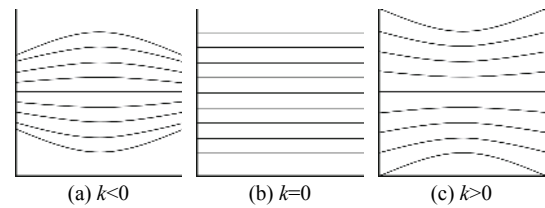


图 3 径向畸变效果图

Fig. 3 Diagram of the radial distortion effects

此时, 两束光线的光程差为:

$$x' = \frac{dy'}{f_F} = \frac{dy(1 + kr^2)}{f_F} = x(1 + kr^2) = xK(r). \quad (10)$$

光谱强度与干涉强度是傅立叶变换对, 根据傅立叶变换的尺度变换性质, 发生径向畸变后的干涉图对应的反演光谱谱线位置会发生偏移, 且偏移程度与畸变程度和像元位置有关:

$$I(x) \leftrightarrow B(\nu), \quad I(xK(r)) \leftrightarrow \frac{1}{|K(r)|} B\left(\frac{\nu}{K(r)}\right). \quad (11)$$

若在进行光谱定标时, 将谱线偏移产生的影响包含在定标系数之中, 便可以减弱畸变导致的误差, 修正谱线位置, 改善数据质量。谱线偏移带来的影响可用偏移率表示, 将每一条反演光谱原本的定标系数除以该条谱线的偏移率便可校正径向畸变所导致的光谱定标误差。

3 仿真分析与校正模型

选取脉冲谱作为目标光谱, 验证本文误差模型的正确性。脉冲信号 $\delta(\nu)$ 与常数 1 是傅立叶变换对, 根据傅立叶变换频移性质, 中心波数为 ν_0 的脉冲谱 $\delta(\nu - \nu_0)$ 的干涉曲线为 $e^{-j\nu\nu_0}$ 的实数部分, 即脉冲信号的干涉图为余弦曲线。

$$\delta(\nu) \leftrightarrow 1, \quad \delta(\nu - \nu_0) \leftrightarrow e^{-j\nu\nu_0}. \quad (12)$$

本文首先利用 Matlab 软件对探测器采集信号的过程进行仿真, 然后编写程序对数据进行处理, 即将干涉数据反演为光谱数据, 具体流程如图 4 所示。

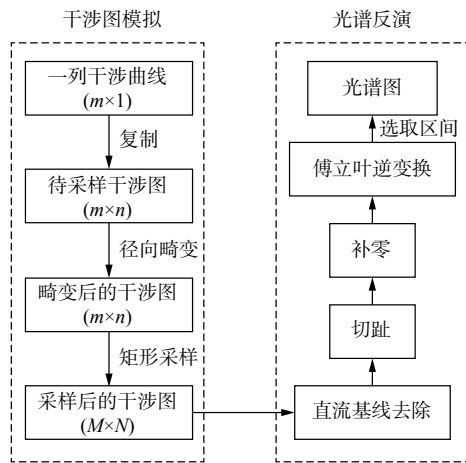


图 4 仿真试验流程图

Fig. 4 Flow chart of the simulation experiment

余弦曲线由 Matlab 软件生成, 面阵探测器可同时采集多个目标的干涉曲线, 将余弦曲线进行复制, 并代入式(9)模拟径向畸变过程, 得到待采样干涉图。由于 Matlab 的数据是由离散的点组成的, 因此 m 与 n 的取值要尽可能大才能更接近实际的连续信号。接着, 将图像分割成整齐分布的矩形区域, 并根据式(8)对矩形区域进行积分, 获得待处理干涉数据, 为与下文实际的探测器像元数目一致, M 取 256, N 取 2048。根据干涉曲线光谱反演的过程^[9]编写数据处理程序, 遍历所有干涉曲线得到最终的光谱图。

由于 LASIS 的有效波段为可见—近红外范围, 同时为了与实验室光谱定标过程相匹配, 本文选用了中心波长分别为 400、543、632、694 和 900 nm 的 5 种脉冲信号模拟目标光源。一般成像光谱仪的畸变都在 4% 以内^[10], 本文分别模拟了无畸变以及畸变率 K 为 1%、2% 和 3% 的桶形畸变与枕形畸变, 最终得到每一列谱线峰值波数相对于中心列谱线(无畸变)峰值波数的偏移率 P , 如图 5(彩图见期刊电子版)所示, 6 种线型分别代表 6 种脉冲信号, 不同的畸变率用不同颜色表示。

可以看出, 偏移率 P 随畸变率 K 和像元位置的变化而改变, 同种颜色的曲线近似重合在一起, 偏移率 P 与波长相关性较小, 可认为与波长无关。理论上, 偏移率为连续曲线, 但是经过矩形采样后, 采集到的信号为离散信号, 加之 Matlab 程序计算偏移率的精度为 0.001, 因此出现了跳变。仿真实验结果显示, 径向畸变对反演谱线的影响可以用谱线偏移率表征, 偏移率是与波长无关, 与像

元位置有关的二次曲线, 5 种脉冲信号在畸变率相同时, 偏移率变化趋势基本一致, 通过拟合可得:

$$P(i) = K \times 10^{-8} \times R(i)^2 - K \times 10^{-8} \times R(i) + 1 \quad (13)$$

式中, K 表示畸变程度, $K\%$ 为畸变率, $R(i)$ 为探测器像元 i 与畸变中心 O 之间的距离, $R(i) = |O - i|$ 。

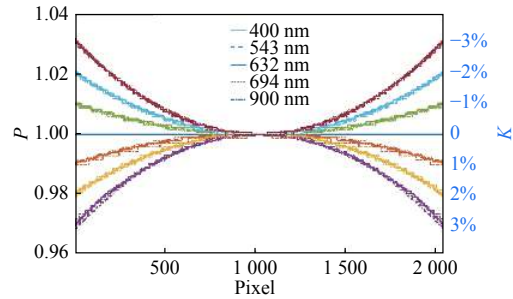


图 5 Matlab 模拟结果

Fig. 5 Matlab simulation results

根据所得畸变模型, 任意目标点 i 的第 j 个波段中心波数 $\nu(i, j)$ 以及中心波长 $\lambda(i, j)$ 的径向畸变误差可通过如下方法进行校正:

$$\begin{aligned} \nu'(i, j) &= \nu(i, j) \div P(i) \\ \lambda'(i, j) &= \lambda(i, j) \times P(i) \end{aligned} \quad (14)$$

4 验证实验与结果分析

为了验证本文所提误差校正方法的性能, 本文进行了实验室光谱定标实验, 采集了 LASIS 探测器的干涉信息, 通过进一步的光谱反演处理, 确定了不同像元的光谱定标参数(单位光程差和最大光程差), 为谱线校正提供了初始光谱定标依据。

图 6 为实验室光谱定标实验原理图, 定标光源为标准激光器, 利用激光器获得特定中心波长的光束, 单色光经过扩束整形后照亮平行光管靶面处的毛玻璃, 通过平行光管转换成光谱定标所需的平行光。平行光进入 LASIS 光学系统后最终在探测器上形成干涉图, 利用数据采集软件实现图像采集



图 6 光谱定标实验示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the spectral calibration experiment

和存储。最后使用数据处理软件根据图 4 中光谱反演部分的流程对干涉图进行数据处理并分析。

LASIS 探测器面阵大小为 256(光谱维)×2048(空间维),标准激光器发出的光束无法覆盖探测器空间维整个视场,所以分 3 次分别在左、中、右 3 个位置进行成像实验。畸变数据利用平行光管对 LASIS 探测器进行一维内方位元素标定(空间维)获得。经过成像和拟合,得到探测器采集到的图像为正畸变,畸变中心在第 1070 列,即 $O = 1070$,畸变率为 0.3%,即 $K = 0.3$ 。代入式 (13) 得到该探测器各列像元反演光谱的偏移率为:

$$P(i) = 3 \times 10^{-9} \times (1070 - i)^2 - 3 \times 10^{-9} \times (1070 - i) + 1, \quad i = 1, 2, \dots, 2048 \quad (15)$$

实验分别记录了 594.1 nm 激光器和 632.8 nm 激光器成像实验的干涉图像,以及有效像元的反演谱线。图 7 展示了实验获得的干涉图像,图 8 (彩图见期刊电子版)绘出了不同视场归一化后的反演谱线。从图 8 可以看出当存在桶形畸变时,两侧谱线的峰值波长向波长增大的方向发生了偏移。

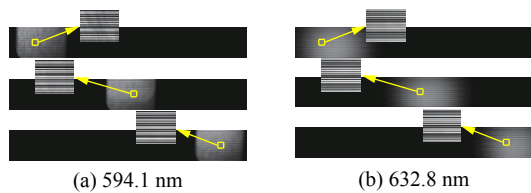


图 7 激光干涉图

Fig. 7 Interferogram of the lasers

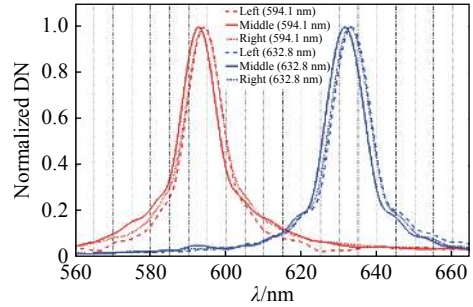


图 8 激光三视场归一化反演光谱

Fig. 8 The normalized inversion spectra of the three fields of view of the lasers

对每一条反演光谱通过高斯拟合得到峰值波长,并利用式(14)、式(15)进行谱线校正。图 9 (彩图见期刊电子版)绘制了误差校正前后有效成像区域反演光谱的中心波长,表 1 列出了部分数据结果。

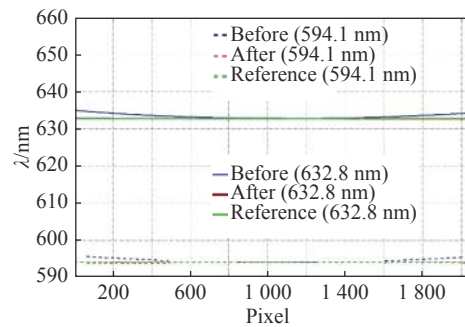


图 9 光谱定标误差校正

Fig. 9 Correction of spectral calibration

表 1 激光中心波长对比

Tab. 1 Comparison of the lasers' center wavelength

像元	中心波长/nm				
	参考值 λ_0	校正前 λ	误差 $ \lambda - \lambda_0 $	校正后 λ'	误差 $ \lambda' - \lambda_0 $
100	594.1	595.5762	1.4762	594.0097	0.0903
400		594.7603	0.6603	594.0126	0.0874
1000		594.1342	0.0342	594.1260	0.0260
1100		594.1342	0.0342	594.1328	0.0328
1700		594.7186	0.6186	594.0594	0.0406
2000		595.4506	1.3506	594.0136	0.0864
100	632.8	634.5429	1.7429	632.8221	0.0221
400		633.5693	0.7693	632.7368	0.0632
1000		632.8351	0.0351	632.8221	0.0221
1100		632.8114	0.0114	632.8110	0.0110
1700		633.3796	0.5796	632.7107	0.0893
2000		634.1151	1.3151	632.6337	0.1663

从图9和表1可以看出,随着与畸变中心距离的增大,中心波长向长波方向移动,但偏移量与距离不成线性关系。校正前中间误差较小,两侧误差较大,序号为100和2000的像元中心波长的误差均大于1 nm。利用本文的校正方法进行处理后,整体的误差得到了显著降低,图9中红线与绿线基本重合,由表1可知,除632.8 nm右视场边缘外,误差均小于0.1 nm。632.8 nm在右视场的校正效果略差的原因可能是由于探测器在安装过程中出现了倾斜、旋转等,使得实际畸变分布不是理想的桶形畸变^[20],进而导致了误差。实验证明,本文提出的谱线位置误差校正方法具有

较好的校正效果。

为了验证该误差校正方法在红外波段的有效性,本文利用LASIS进行了室外推扫实验,并选取一帧图像进行光谱反演,分析了不同像元位置处氧气在红外波段的吸收带。分别选取了左中右3个视场序号为100、400、1000、1100、1700和2000的复原光谱,将746~779 nm光谱曲线进行归一化处理,得到的氧气吸收带如图10(彩图见期刊电子版)所示。可以看出两侧视场存在纳米级的偏移,经过校正后,吸收带曲线更加聚集,表明该误差校正方法在近红外波段依然有效。

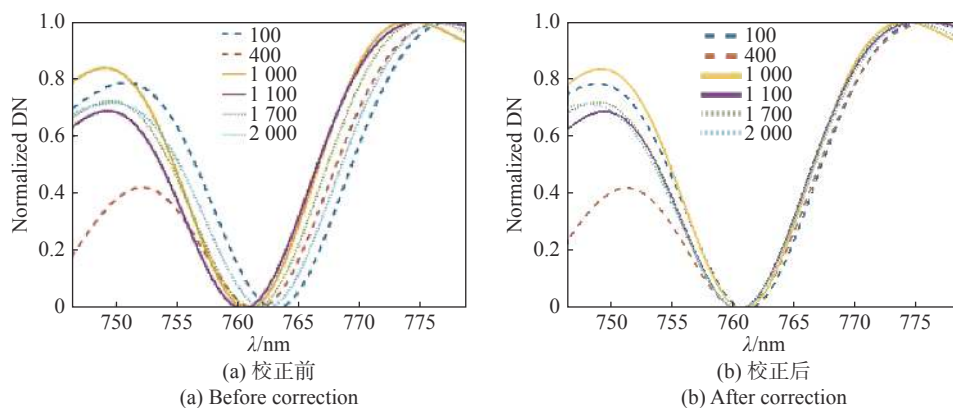


图10 氧气红外吸收带

Fig. 10 Absorption band of oxygen in infrared wavelengths

5 结 论

本文提出了一种径向畸变误差校正模型以校正光谱反演时出现的谱线偏移,用于大孔径静态干涉成像光谱仪在使用大面阵探测器时的光谱定标。根据干涉图与光谱图之间的对应关系和径向畸变的理论和数学表达式推导出了径向畸变与谱线偏移的模型,用计算机仿真实验验证模型,并给出了误差校正模型,最后实验验证了模型的准确性和可靠性。实验结果表明,本文所提出的校正

方法可以有效减少谱线误差,对于594.1 nm激光,边缘视场的谱线误差从1.5 nm减少到0.1 nm,对于632.8 nm激光,尽管右边缘误差校正效果相对较差,但是也减少到了0.2 nm,在近红外波段也有明显校正效果,表明该方法准确可靠,提高了数据质量。尽管该方法是基于干涉型成像光谱仪实验室光谱定标提出的,但当仪器投入使用后,畸变数据可以通过载荷的外方位元素进行修正,从而光谱定标误差也可以不断校正,实现再定标,该方法具有长久的参考价值。

参考文献:

- [1] 刘红婕, 王凤蕊, 耿峰, 等. 荧光成像技术无损探测光学元件亚表面缺陷[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(1): 50-59.
LIU H J, WANG F R, GENG F, *et al.*. Nondestructive detection of optics subsurface defects by fluorescence image technique[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(1): 50-59. (in Chinese)
- [2] 何志平, 李春来, 吕刚, 等. 月球表面原位光谱探测技术研究与应用(特约)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(5): 62-69.
HE ZH P, LI CH L, LÜ G, *et al.*. Research and applications of In-Situ lunar surface spectral detection

- technology(Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 62-69. (in Chinese)
- [3] 郑光辉, 焦彩霞, 上官晨曦, 等. 基于成像光谱技术的土壤剖面发生层划分初探[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(3): 882-885.
ZHENG G H, JIAO C X, SHANGGUAN CH X, *et al.*. Horizon classification in soil profile using imaging spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(3): 882-885. (in Chinese)
- [4] 朱梦远, 杨红兵, 李志伟. 高光谱图像和叶绿素含量的水稻纹枯病早期检测识别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(6): 1898-1904.
ZHU M Y, YANG H B, LI ZH W. Early detection and identification of rice sheath blight disease based on hyperspectral image and chlorophyll content[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(6): 1898-1904. (in Chinese)
- [5] 谭翠媚, 许廷发, 马旭, 等. 图-谱结合的压缩感知高光谱视频图像复原[J]. *中国光学*, 2018, 11(6): 949-957.
TAN C M, XU T F, MA X, *et al.*. Graph-spectral hyperspectral video restoration based on compressive sensing[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 949-957. (in Chinese)
- [6] MAILHES C, VERMANDE P, CASTANIE F. Spectral image compression[J]. *Journal of Optics*, 1990, 21(3): 121-132.
- [7] LUCEY P G, HORTON K A, WILLIAMS T J, *et al.*. SMIFTS: a cryogenically cooled, spatially modulated imaging infrared interferometer spectrometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 1937: 130-141.
- [8] 相里斌, 赵葆常, 薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术[J]. *光学学报*, 1998, 18(1): 18-22.
XIANG L B, ZHAO B CH, XUE M Q. Spatially modulated imaging interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(1): 18-22. (in Chinese)
- [9] 高泽东, 郝群, 刘宇, 等. 高光谱成像与应用技术发展[J]. *计测技术*, 2019, 39(4): 24-34.
GAO Z D, HAO Q, LIU Y, *et al.*. Hyperspectral imaging and application technology development[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2019, 39(4): 24-34. (in Chinese)
- [10] 吕群波, 相里斌, 姚涛, 等. 光学畸变对大孔径静态干涉成像光谱仪影响的建模与仿真[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(1): 142-145.
LÜ Q B, XIANG L B, YAO T, *et al.*. Modeling and simulation of effect of optical distortion on the large aperture static imaging spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(1): 142-145. (in Chinese)
- [11] 郑玉权. 超光谱成像仪的精细光谱定标[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(11): 2347-2354.
ZHENG Y Q. Precise spectral calibration for hyperspectral imager[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(11): 2347-2354. (in Chinese)
- [12] 郑子鹏, 邱波, 魏诗雅, 等. 曲线距离法的二维光纤光谱弯曲校正[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(10): 3051-3055.
ZHENG Z P, QIU B, WEI SH Y, *et al.*. Two-dimensional fiber spectral bending correction based on curve distance method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(10): 3051-3055. (in Chinese)
- [13] 于丙文, 金伟, 金钦汉, 等. 基于能量重分配的波长偏移校正方法[J]. *高等学校化学学报*, 2019, 40(8): 1600-1605.
YU B W, JIN W, JIN Q H, *et al.*. Wavelength drift correction method based on energy redistribution[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2019, 40(8): 1600-1605. (in Chinese)
- [14] 朱丹彤, 沈宏海, 杨名宇, 等. 编码孔径成像光谱仪中编码元形变的分析校正[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 061201.
ZHU D T, SHEN H H, YANG M Y, *et al.*. Analysis and correction of coded pixel distortion in coded aperture imaging spectrometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 061201. (in Chinese)
- [15] 董瑛, 相里斌, 赵葆常. 大孔径静态干涉成像光谱仪的干涉系统分析[J]. *光学学报*, 2001, 21(3): 330-334.
DONG Y, XIANG L B, ZHAO B CH. Analysis of interferometer system in a large aperture static imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(3): 330-334. (in Chinese)
- [16] 董瑛, 相里斌, 赵葆常. 大孔径静态干涉成像光谱仪中的横向剪切干涉仪[J]. *光子学报*, 1999, 28(11): 991-995.
DONG Y, XIANG L B, ZHAO B CH. Lateral shearing interferometer in large aperture static imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(11): 991-995. (in Chinese)
- [17] 王爽. 大孔径静态干涉光谱成像仪信噪比研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2013.
WANG SH. Research on the signal-to-noise ratio of large aperture static imaging spectrometer[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [18] SUN Q CH, HOU Y Q, CHEN J. Lens distortion correction for improving measurement accuracy of digital image

correlation[J]. *Optik*, 2015, 126(21): 3153-3157.

[19] 邹曜璞. 星载傅里叶光谱仪星上数据处理研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2016.

ZOU Y P. Research of on-board data processing techniques for Fourier transform spectrometer[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese).

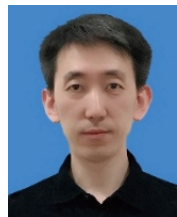
[20] 蔡萍, 李潇雁, 唐玉俊, 等. 改进的空间大口径追踪相机畸变校正[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(10): 2272-2279.

CAI P, LI X Y, TANG Y J, *et al.*. Improved distortion correction method for spacial large aperture tracking cameras[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2272-2279. (in Chinese)

作者简介:



安玲坪(1996—), 女, 山西忻州人, 博士研究生, 2018年于太原理工大学获得学士学位, 主要从事光谱成像仪器量化技术研究。E-mail: anlingping@opt.cn



王爽(1980—), 男, 黑龙江东宁人, 博士, 研究员, 硕士生导师, 2002年、2006年于北京理工大学分别获得学士、硕士学位, 2014年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得博士学位, 主要从事光谱成像理论与仪器开发、光谱成像数据处理与量化研究。E-mail: wangshuang@opt.ac.cn

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》以材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术, 及时反映国内外本学科领域及产业信息动态, 是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果, 进行国际交流的平台。其内容丰富, 涵盖面广, 信息量大, 可读性强, 是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶聚合物、胶体等软物质材料和各类显示材料及制备方法、液晶物理、液晶非线性光学、生物液晶; 液晶显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术; 各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用; 显示材料和器件的测试方法与技术; 各类显示器件的应用; 与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿和订阅。

地址: 长春市东南湖大路3888号

《液晶与显示》编辑部

邮编: 130033

电话: (0431) 6176059

E-mail: yjyxs@126.com

国内统一刊号: CN 22-1259/O4

国际标准刊号: ISSN 1007-2780

国内邮发代号: 12-203

国内定价: 50元/期

网址: www.yjyxs.com