

光学学报

时空联合调制空间外差干涉成像仪自适应条纹模板研究

丁毅^{1,2,3}, 罗海燕^{1,2,3*}, 施海亮^{1,2,3}, 李志伟^{1,3}, 李思亮^{1,2,3}, 熊伟^{1,2,3}

¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 时空联合调制型空间外差干涉成像光谱仪(TS-SHIS)推扫图像中有明显的干涉条纹,这会导致传统的图像配准方法对 TS-SHIS 推扫图像配准计算结果的影响较大。鉴于此,提出一种基于目标干涉数据的自适应条纹模板构建方法,采用该方法消除 TS-SHIS 推扫图像中的干涉条纹,并利用曲面拟合加梯度法对消条纹后的推扫图像进行图像配准。仿真及实验研究结果表明,所提方法能够有效消除 TS-SHIS 推扫图像中零光程差处的干涉条纹;干涉条纹对配准计算的影响得到抑制;消条纹处理对图像配准计算结果的影响在 0.02 pixel 以内。

关键词 光谱学; 时空联合调制; 空间外差干涉成像光谱仪; 图像配准; 条纹模板

中图分类号 O433.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0130003

Adaptive Fringe Template of Temporally and Spatially Modulated Spatial Heterodyne Interference Imaging Spectrometer

Ding Yi^{1,2,3}, Luo Haiyan^{1,2,3*}, Shi Hailiang^{1,2,3}, Li Zhiwei^{1,3}, Li Siliang^{1,2,3}, Xiong Wei^{1,2,3}

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

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract There are obvious interference fringes in the push-sweep scanning image of temporally and spatially modulation spatial heterodyne interference imaging spectrometer (TS-SHIS), which will cause the traditional image registration method to have a great influence on the calculation results of TS-SHIS push-sweep scanning image registration. In view of this, an adaptive fringe template construction method based on target interference data is proposed, which is used to eliminate the interference fringes in the TS-SHIS push-sweep scanning image, and the surface fitting plus gradient method is used to register the stripe-eliminated push-sweep scanning image. Simulation and experimental results show that the proposed method can effectively eliminate the interference fringes at the zero optical path difference in TS-SHIS push-sweep scanning images, and the influence of interference fringes on registration calculation is suppressed. The influence of fringe elimination on image registration results is less than 0.02 pixel.

Key words spectroscopy; temporally and spatially modulation; spatial heterodyne interference imaging spectrometer; image registration; fringe template

1 引言

干涉成像光谱技术^[1]于 20 世纪 90 年代被提

出,具有高光谱分辨率、高光通量和多通道^[2]的优点,在目标识别和大气成分监测等遥感探测领域^[3-5]具有广泛的应用。根据目标干涉数据获取方式的不

收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-07-14; 录用日期: 2021-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(61975212,41975033)

通信作者: *luohaiyan@aiofm.ac.cn

同,干涉成像光谱技术可分为时间调制型、空间调制型以及时空联合调制型^[6-7]。时间调制型系统内部有一套高精度的动镜,其对系统的稳定性要求较高;空间调制型系统单次成像可获取沿狭缝方向上目标完整的干涉数据,但光路中含有狭缝,从而限制了其光通量;时空联合调制型系统内部无狭缝及运动部件,近年来成为国际上的研究热点之一^[8]。针对新型的时空联合调制型空间外差干涉成像光谱仪(TS-SHIS)已有部分团队展开了相关研究^[9],该系统^[10]在较窄的波段范围内容易获取极高的光谱分辨率,且静态干涉成像的稳定性好,在大气遥感探测方面具有良好的应用前景。

由于卫星平台振动和推扫会存在误差等问题,当使用 TS-SHIS 对目标进行推扫成像时,目标的实际成像位置会偏离理想的成像位置,从而造成周边相邻目标的图像及光谱信息与待测目标信息发生混合,进而降低了待测目标干涉数据以及复原光谱的精度^[11],因此需要通过图像配准来获取目标位置偏移量的精确值。目前,国内外学者对图像配准进行了诸多研究,主要算法包括曲面拟合法、梯度法和灰度插值法^[12]等。上述算法对于刚性变换的两幅图像均具有较好的配准效果,但是 TS-SHIS 图像中存在干涉条纹,导致上述算法对于零光程差处模板图像配准效果较差。高莹莹^[13]指出干涉条纹在空间上属于高频信号,在频率域中滤除高频信号即可消除图像中的干涉条纹,但是该算法除了消除干涉条纹以外,图像中的有效信息也会受到一定程度的破坏。王府北等^[14]指出将实测图像数据除以条纹模板可以消除条纹,但条纹模板由给定的系统参数来

仿真得到,且条纹模板未考虑到零光程差处的相位畸变,因此该算法不具有普适性。

针对上述问题,本研究团队提出一种新型的适用于 TS-SHIS 推扫图像的目标干涉数据自适应条纹模板构建方法。基于时空联合调制型空间外差干涉光谱技术的机理,仿真干涉条纹对图像配准的影响,分析推扫误差对目标干涉数据的影响,并给出自适应条纹模板的构建方法。结果表明,自适应条纹模板能够有效消除 TS-SHIS 图像中的干涉条纹,提高图像配准的精度。

2 TS-SHIS 图像数据与配准原理

2.1 空间外差干涉成像时空联合调制原理

图 1 为 TS-SHIS 系统的工作流程,包括目标的推扫成像、干涉数据的拼接、目标光谱的复原以及数据立方体的构建。空间外差干涉成像光谱仪的光路布局如图 1 的中间部位所示,利用两个闪耀光栅来代替 Michelson 干涉仪中的两个平面反射镜。具有一定立体角的入射光线经前置像方远心成像物镜(fore optics)后进入分束器中,分束器将入射光线分为强度相等的两束相干光。经光栅衍射返回至分束器的两束相干光在定域面上形成干涉条纹,经后置成像镜组(aft optics)缩放后最终成像在探测器像面上。因此,探测器单次采样获取的图像为视场内所有目标点在不同光程差处的干涉信息,沿光谱维方向使用仪器来推扫可以得到同一目标在其他光程差点处的干涉信息,经过整周期的推扫过程后才能获取目标完整的干涉数据。

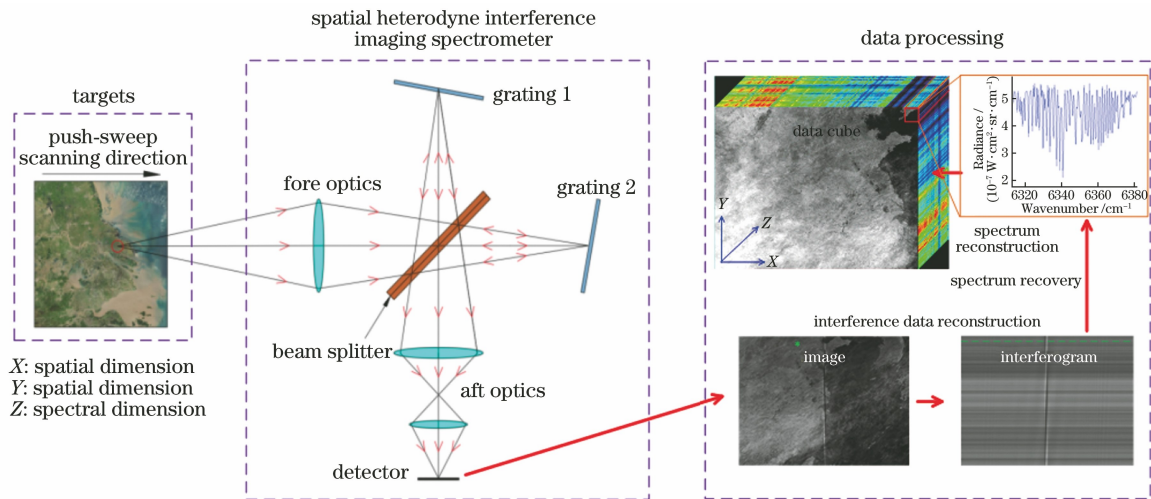


图 1 TS-SHIS 系统的工作流程

Fig. 1 Workflow of TS-SHIS system

目标点在探测器像面上对应的干涉数据强度为

$$I(t) = \int_0^\infty B(\sigma) \{1 + \cos\{2\pi[4(\sigma - \sigma_0)x(t) \tan \theta_L]\}\} d\sigma, \quad (1)$$

$x \propto t, x \in [-2w\sin \theta_L, 2w\sin \theta_L],$

式中: $I(t)$ 为目标干涉数据强度, t 为采样时刻; $B(\sigma)$ 为目标光谱强度, σ 为入射光谱波数; σ_0 为系统的 Littrow 波数; θ_L 为系统的 Littrow 角度; x 为沿光谱维方向的坐标; w 为光栅的有效照明宽度。

目标干涉数据的拼接原理如图 2 所示, 其中 A、

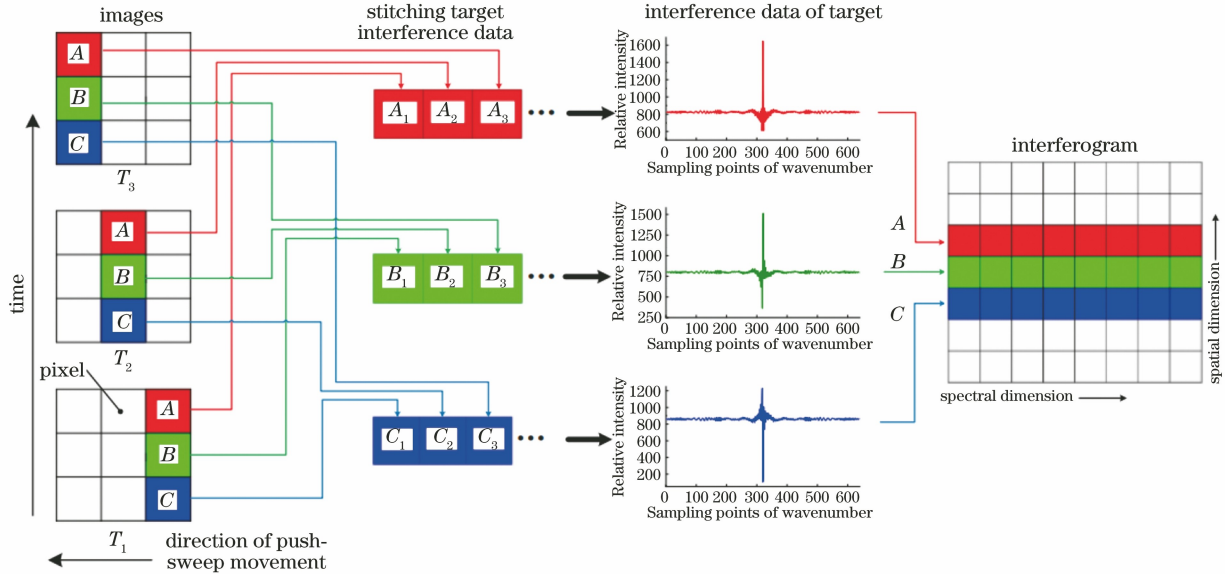


图 2 目标干涉数据的获取原理

Fig. 2 Acquisition principle of target interference data

对目标的干涉数据进行校正处理和傅里叶变换即可得到目标的光谱信息, 最终能够获取场景内目

B 和 C 为沿空间维方向相邻分布的三个目标; T_1 、 T_2 和 T_3 分别对应三个相邻帧的图像, 系统的推扫方向为自右向左。以目标 A 为例, T_1 成像于探测器像面的第一行最右侧像元上, T_2 成像于探测器像面的第一行中间像元上, T_3 成像于探测器像面的第一行最左侧像元上, 以此类推, 目标 A 在整个推扫成像期间将分时依次成像于探测器像面的第一行像元上。对连续帧推扫图像以逐帧逐像元的方式进行数据提取, 即可得到目标 A 的完整干涉数据。

标的光谱数据立方体, 获取原理如图 3 所示, 其中 A' 、 B' 、 C' 和 D' 为视场内相邻分布的 4 个目标, 各目

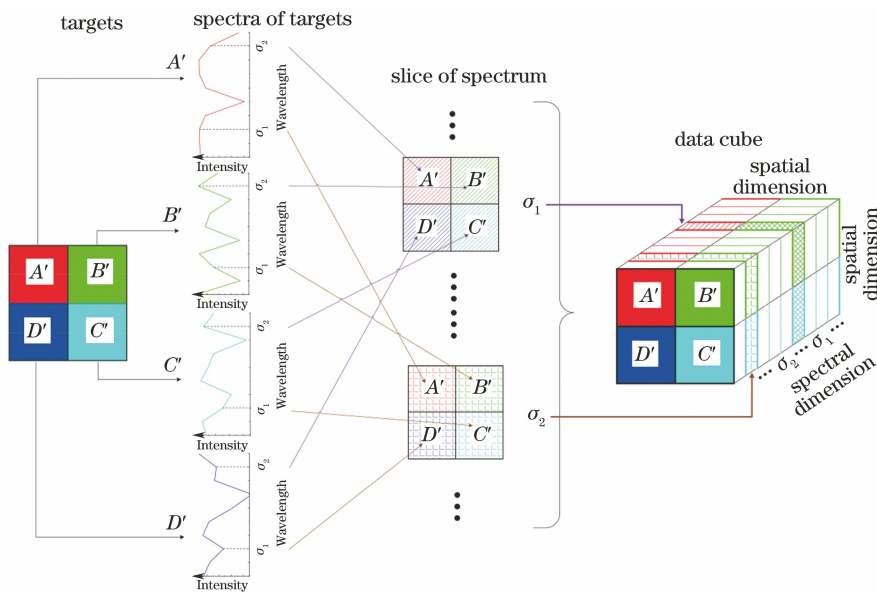


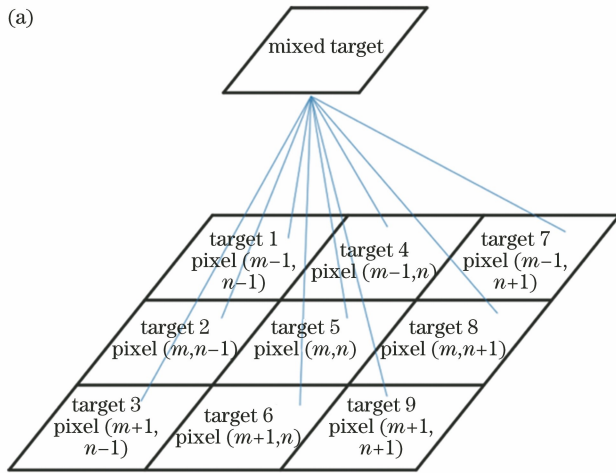
图 3 二维目标图谱数据立方体的获取原理

Fig. 3 Acquisition principle of 2D object atlas data cube

标分别对应一定的光谱曲线。提取各目标在 σ_1 波段下的光谱信息,并按各目标之间的空间相对位置进行排布,能够获得 σ_1 波段下的“光谱切片”,同理获得 σ_2 波段下的“光谱切片”。以此类推,获取各目标在探测波段内的所有“光谱切片”并将其沿光谱维方向进行叠加,即可得到视场内目标完整的图谱数据立方体。

2.2 自适应模板

受到 TS-SHIS 图像中干涉条纹的影响,导致图像配准的精度较低,因此在图像配准工作前需要滤除 TS-SHIS 图像中的干涉条纹。对于一帧实测的



目标干涉数据 $f(x, y)$, 假设存在一个自适应的条纹模板 $h(x, y)$, 滤除掉干涉条纹的普通图像 $f'(x, y)$ 可表示为

$$f'(x, y) = f(x, y) / h(x, y), \quad (2)$$

式中: (x, y) 为目标成像像元在探测器像面中的坐标。条纹模板 $h(x, y)$ 是理论上不存在推扫误差的理想干涉数据, 然而对目标进行推扫成像, 由于卫星平台振动、推扫存在方向偏差以及推扫系统存在定位误差等问题, 像元实际接收到的是相邻目标之间的混合信号, 所以无法直接获取条纹模板 $h(x, y)$ 。相邻目标的光谱混叠与分类如图 4 所示。

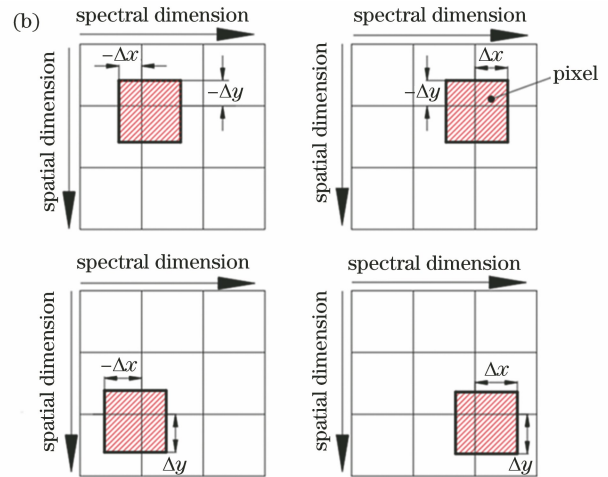


图 4 相邻目标的光谱混叠与分类。(a) 目标光谱混叠现象; (b) 4 种目标混叠情况

Fig. 4 Spectral aliasing and classification of adjacent targets. (a) Spectral aliasing of target; (b) aliasing of four targets

根据光谱线性混合理论^[15]可知, 像元实际获取的混合目标光谱强度可表示为

$$B'(\sigma) = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \eta_{mn} B_{mn}(\sigma), \quad (3)$$

其中

$$\sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \eta_{mn} = 1, \quad (4)$$

式中: $B'(\sigma)$ 为像元实际接收的混合目标光谱强度; $B_{mn}(\sigma)$ 为各目标的光谱强度; η_{mn} 为各目标的成像面积占总像元面积的比例(掺杂比)。此时, 探测器像元对应的混合目标干涉数据强度 $I'(t)$ 可表示为

$$I'(t) = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \int_0^{\infty} \eta_{mn}(t) B_{mn}(\sigma) \cdot \{1 + \cos\{2\pi[4(\sigma - \sigma_0)x(t)\tan\theta_L]\}\} d\sigma. \quad (5)$$

为了简化书写, 令 $\Phi = 2\pi[4(\sigma - \sigma_0)x(t)\tan\theta_L]$ 。由(5)式可知, 混合目标的光谱信息主要受到 $B_{mn}(\sigma)$ 和 $\eta_{mn}(t)$ 的影响。在系统推扫成像的过程中, $B_{mn}(\sigma)$ 通常保持稳定, 因此混合目标的光谱数据仅受 $\eta_{mn}(t)$ 的影响。经过分析可知, 掺杂比

仅受推扫误差的影响, 而推扫误差可分为系统性误差(推扫方向偏差和振动等)以及随机误差(推扫系统定位误差等)两种, 因此(5)式可以写为

$$I'(t) = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \int_0^{\infty} [\eta_{mn}^k(t) + \eta_{mn}^r(t)] \cdot B_{mn}(\sigma) (1 + \cos \Phi) d\sigma, \quad (6)$$

式中: $\eta_{mn}^k(t)$ 为系统性推扫误差所引入的掺杂比; $\eta_{mn}^r(t)$ 为随机性推扫误差所引入的掺杂比。因此, (6)式中混合目标的干涉数据强度可以写为

$$I'(t) = I'_k(t) + I'_r(t), \quad (7)$$

$$I'_k(t) = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \int_0^{\infty} \eta_{mn}^k(t) B_{mn}(\sigma) (1 + \cos \Phi) d\sigma, \quad (8)$$

$$I'_r(t) = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \int_0^{\infty} \eta_{mn}^r(t) B_{mn}(\sigma) (1 + \cos \Phi) d\sigma. \quad (9)$$

分析(9)式可知, 由于 η_{mn}^r 值是呈随机分布的, 因此 $I'_r(t)$ 在混合目标干涉数据中相当于一个随机噪声。 $I'_k(t)$ 为混合目标干涉数据中的有效信号, 其

基线数据 $I_D^k(t)$ 可表示为

$$I_D^k(t) = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \int_0^\infty \eta_{mn}^k(t) B_{mn}(\sigma) d\sigma. \quad (10)$$

因此,对于一组混合目标的干涉数据,其基线数据的相对强度 $B(t)$ 可表示为

$$B(t) = \frac{\sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \int_0^\infty \eta_{mn}^k(t) B_{mn}(\sigma) d\sigma}{\int_0^\infty B_{22}(\sigma) d\sigma}, \quad (11)$$

式中: $B_{22}(\sigma)$ 为待测目标的光谱信号。通过对实测数据进行多项式拟合,即可计算得到 $B(t)$ 。结合(7)~(9)式和(11)式,可得

$$\frac{I'(t)}{B(t)} = \int_0^\infty B_{22}(\sigma) [1 + \cos \Phi] d\sigma + \frac{I_r'(t)}{B(t)}. \quad (12)$$

由(12)式可知, $I'(t)/B(t)$ 是待测目标的理论干涉数据与一组随机信号的叠加值,因此条纹模板 $h(t)$ 的计算公式为

$$h(t) = \frac{I'(t)}{B(t)} - \frac{I_r'(t)}{B(t)}. \quad (13)$$

对于高轨卫星平台,TS-SHIS 的推扫运动由指向镜完成,而指向镜的定位精度取决于步进电机的精度,误差可以精确在 3% 以内。因此,对于实测的目标干涉数据,可以忽略随机误差的影响,将 $I'(t)/B(t)$ 近似为所需的条纹模板。利用该条纹模板对 TS-SHIS 图像数据进行消条纹处理,然后进行图像配准可有效提高图像配准的精度。

3 仿真及实验分析

3.1 系统参数

使用本课题组现有的 CO₂ 空间外差干涉成像光谱仪原理样机进行实验,该仪器由中国科学院合

肥物质科学研究所安徽光学精密机械研究所研制,可以用来探测大气 CO₂ 对太阳光谱的吸收。原理样机使用 Xenics 公司生产的 XEVA-FPA-1.7-640 型探测器,响应波段为 0.9~1.7 μm,像元数为 512 pixel×640 pixel,实际使用的有效像元数为 400 pixel×500 pixel。系统的主要技术参数如表 1 所示,其中视场角 (FOV) 为 ±6°,瞬时视场角 (IFOV) 为 ±0.02°,1.567 μm 波长对应的波数为 6381.6 cm⁻¹,1568~1583 nm 波段对应的波数范围为 6317~6377 cm⁻¹。

表 1 CO₂ 空间外差干涉成像光谱仪的主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of CO₂ space heterodyne interferometry imaging spectrometer

Parameter	Value
Littrow wavelength / μm	1.567
Spectral range / nm	1568-1583
Grating density / mm ⁻¹	250
Spectral resolution / nm	0.1
Grating size / cm	3.134
Pixel number of detector / (pixel×pixel)	512×640
FOV / (°)	±6
IFOV / (°)	0.02

原理样机是用来探测大气 CO₂ 在近红外波段 (1568~1583 nm) 的吸收光谱,如图 5(a) 所示。从图 5(a) 可以看到,遥感器入瞳处的典型辐射亮度为 5.0×10⁻⁷ W·cm²·sr·cm⁻¹,卷积仪器的光谱分辨率为 0.4 cm⁻¹。图 5(b) 为图 5(a) CO₂ 吸收光谱所对应的干涉数据。CO₂ 的吸收光谱可以用于模拟分析卫星平台振动对在轨实测吸收光谱的影响,即对 CO₂ 光谱基线及光谱吸收峰深度的影响。

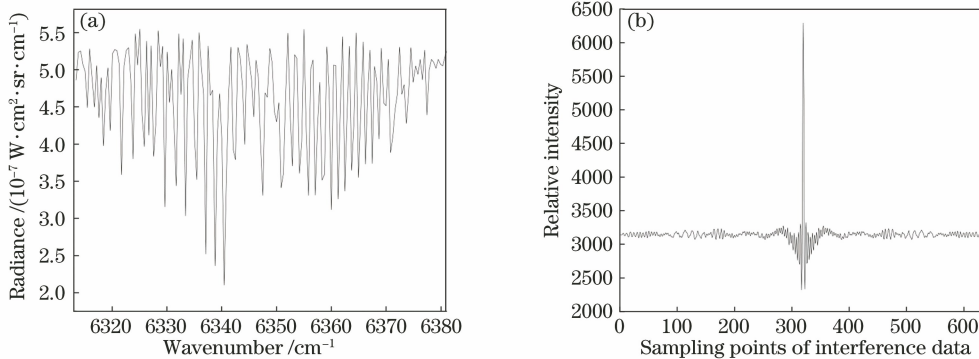


图 5 CO₂ 的吸收光谱及其干涉条纹。(a) CO₂ 的吸收光谱;(b) 干涉条纹

Fig. 5 Absorption spectrum of CO₂ and its interference fringe. (a) Absorption spectrum of CO₂; (b) interference fringe

3.2 仿真研究

对中国中东部地区空间分辨率为 3 km 且在

1568~1583 nm 波段内的 CO₂ 大气吸收谱线进行仿真,自东向西连续推扫获取 640 frame 干涉图像

数据,获取的图像如图 6 所示。空间维系统性推扫误差为 0.1 pixel,光谱维系统性推扫误差为 0.15 pixel,两维度系统性推扫误差在整个推扫过程中呈均匀分布。除了系统性推扫误差以外,两维度分别添加均值为 0、标准差为 1%且呈正态分布的随机误差。采用双线性插值法来求得含推扫误差的图像,计算公式为

$$f(x + \Delta x, y + \Delta y) = (1 - \Delta x) \cdot (1 - \Delta y)f(x, y) + \Delta x(1 - \Delta y)f(x + 1, y) + \Delta y(1 - \Delta x)f(x, y + 1) + \Delta x\Delta yf(x + 1, y + 1), \quad (14)$$

式中: $f(x, y)$ 为图像数据; Δx 为光谱维方向推扫误差; Δy 为空间维方向推扫误差。

图 6 给出了系统在推扫过程中第 1 frame 和第 290 frame 结果。东西方向与光谱维方向一致,对应图中 x 方向;南北方向与系统空间维方向一致,对

应图中 y 方向。框中为图像配准所选模板区域,对应中国洞庭湖区域,模板大小为 40 pixel \times 40 pixel。从图 6(b)可以看到,由于干涉条纹的存在,模板图像发生了明显变化,已不能准确反映真实的地貌信息。

利用梯度法对仿真图像进行配准计算,结果如图 7 所示,图 7(a)为光谱维的配准计算结果,图 7(b)为空间维的配准计算结果。从图 7 分析得出,光谱维及空间维的配准结果在第 300 frame 左右都出现明显波动且误差较大,这是因为模板图像在干涉条纹附近,受到干涉条纹的影响,导致配准计算结果的误差较大;图 7(a)实线框区域是模板图像远离零光程差的情况,可见配准结果依然具有明显误差,误差值接近 0.05 pixel,这是因为远离零光程处依然存在弱的干涉条纹。综上所述,当推扫图像存在干涉条纹时,图像配准结果不可信。

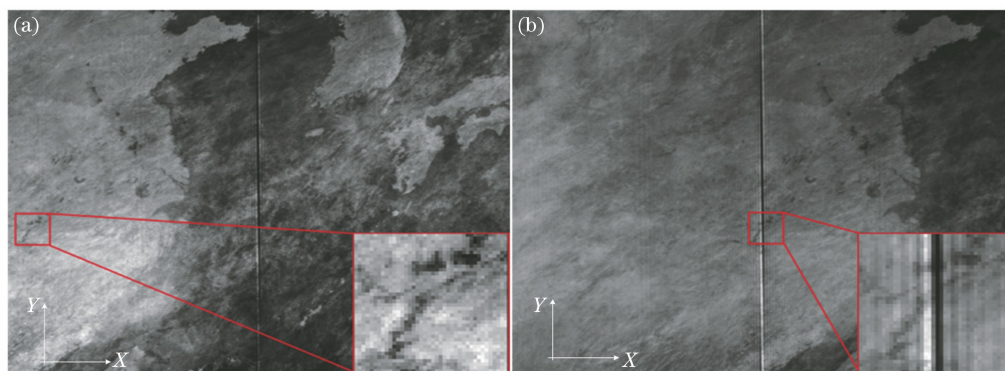


图 6 不同帧图像及对应的模板信息。(a)第 1 frame;(b)第 290 frame

Fig. 6 Different frame images and corresponding template information. (a) 1st frame; (b) 290th frame

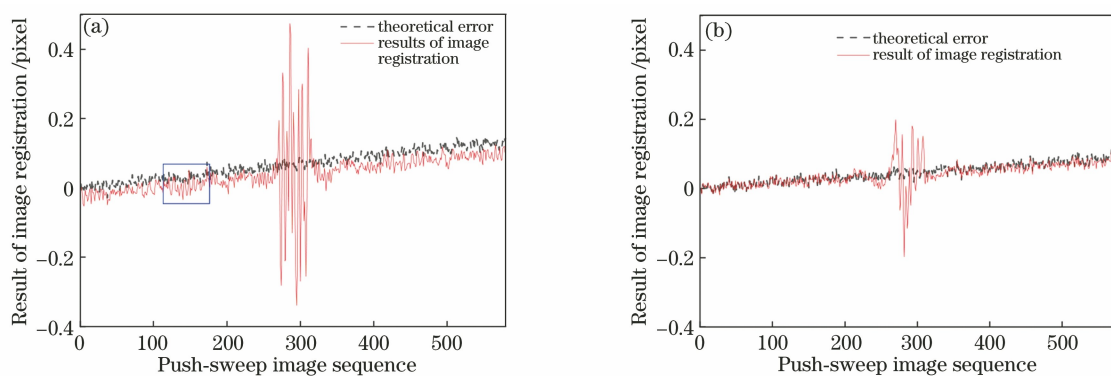


图 7 仿真图像在不同维上的配准结果。(a)光谱维;(b)空间维

Fig. 7 Simulation image registration results in different dimensions. (a) Spectral dimension; (b) spatial dimension

采用所提方法来构建自适应条纹模板,并使用该条纹模板对推扫图像进行消条纹处理,结果如图 8 所示。图 8(a)为消除干涉条纹后第 290 frame 图像,可以看到零光程差处的干涉条纹得到了有效消除。图 8(b)为推扫图像经过消条纹处理后的光

谱维配准结果,其中上方图片的实线为理论推扫误差曲线,虚线为配准结果曲线,框选区域为零光程差处干涉条纹对配准结果的主要影响范围;下方散点图为配准结果与理论值之间的差值,可以看到该差值保持在 0.02 pixel 以内。从仿真结果可以看到,

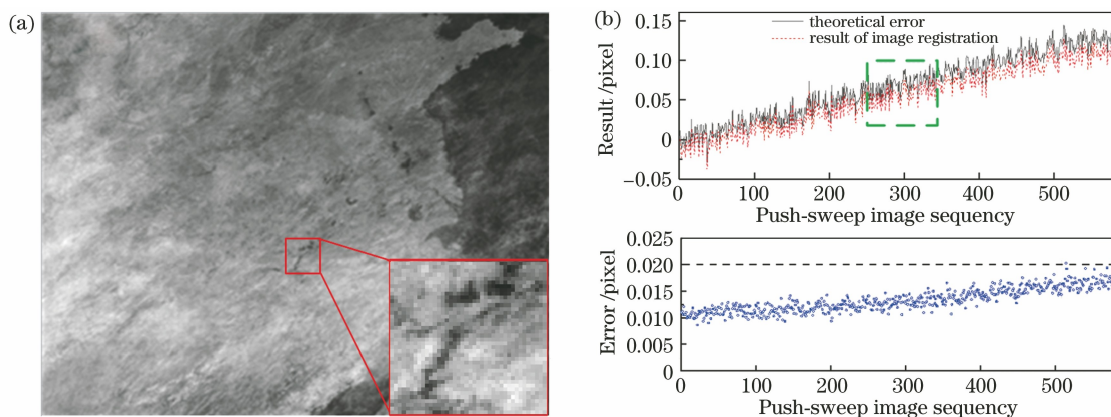


图 8 干涉条纹消除后的效果及配准结果。(a)第 290 frame 图像及模板;(b)光谱维配准结果及误差

Fig. 8 Effect and registration result after elimination of interference fringe. (a) 290th frame image and template; (b) result and error of spectral registration

经过消条纹处理后,零光程差处的干涉条纹对推扫图像配准结果的影响得到了有效抑制;消条纹处理对 TS-SHIS 推扫图像配准结果的影响在 0.02 pixel 以内。

3.3 实验

实验仪器及现场布局如图 9 所示。图 9(a)为本次实验所用的 TS-SHIS 原理样机,主要包括一维旋转台、角度调整台以及 CO₂ 空间外差干涉成像光

谱仪;图 9(b)为实验现场布局,主要包括积分球、TS-SHIS 原理样机以及数据采集系统。使用原理样机对积分球进行推扫成像,积分球口设置有模拟目标,积分球发出的均匀面光源透过模拟目标后被仪器接收,由于模拟目标上各目标点所对应的透过率不同,因此仪器所接收到的是非均匀的包含目标图像信息的干涉数据。

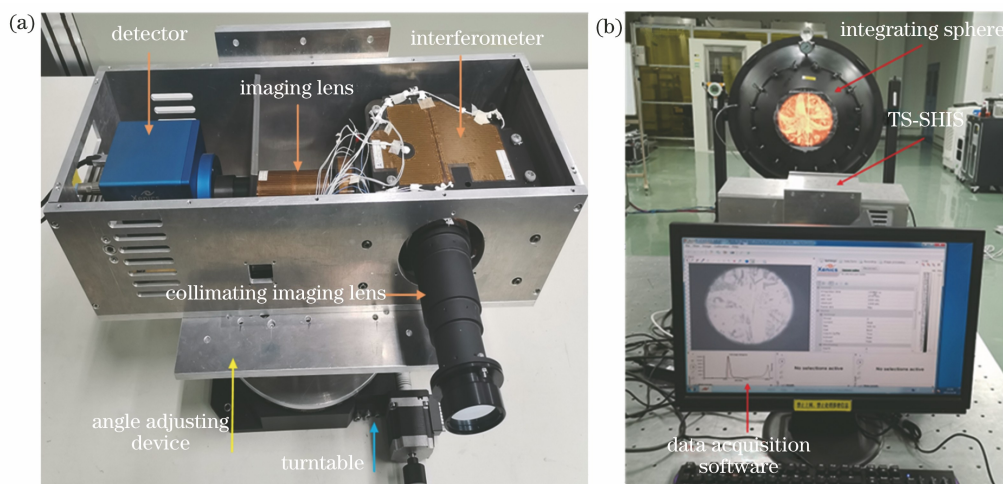


图 9 TS-SHIS 原理样机及实验现场布局。(a)TS-SHIS 原理样机;(b)实验现场布局

Fig. 9 TS-SHIS prototype and experimental site layout. (a) TS-SHIS prototype; (b) experimental site layout

实验共连续采集 1000 frame 图像数据,其中第 100,300,500,700 frame 图像数据如图 10 所示。目标在探测器像面上的成像位置自左向右移动,每帧图像的实际有效数据共 310 行(空间维)、500 列(光谱维),因此需经过连续 500 次推扫成像才能获取单个目标的完整干涉数据。图像两侧无干涉条纹,这是由于远离零光程差区域的干涉数据的调制度较低,因此干涉条纹不明显;零光程差附近的干涉数据

的调制度较高,因此存在明显的干涉条纹。

选取图 10 第 300 frame 图像中虚线所列的目标,然后采用第 2.1 节所述的干涉数据拼接方法来逐帧逐像元地对目标干涉数据进行拼接处理,结果如图 11(a)所示。单张干涉图中的数据量有 310×500 个,即干涉图中共包含 310 个目标干涉数据信息,每个目标中完整的干涉数据共有 500 个数据点。各目标对应的干涉数据强度不同,越暗的区域

所对应的干涉数据强度越弱,反之越强,这是由目标的透过率存在差异造成的,即透过率高,则干涉数据较强,透过率低,则干涉数据较弱。图 11(b)为

图 11(a)中虚线处第 18 行的干涉数据,可以明显看到干涉数据强度逐渐变化,这是由推扫误差导致相邻目标光谱发生掺杂。

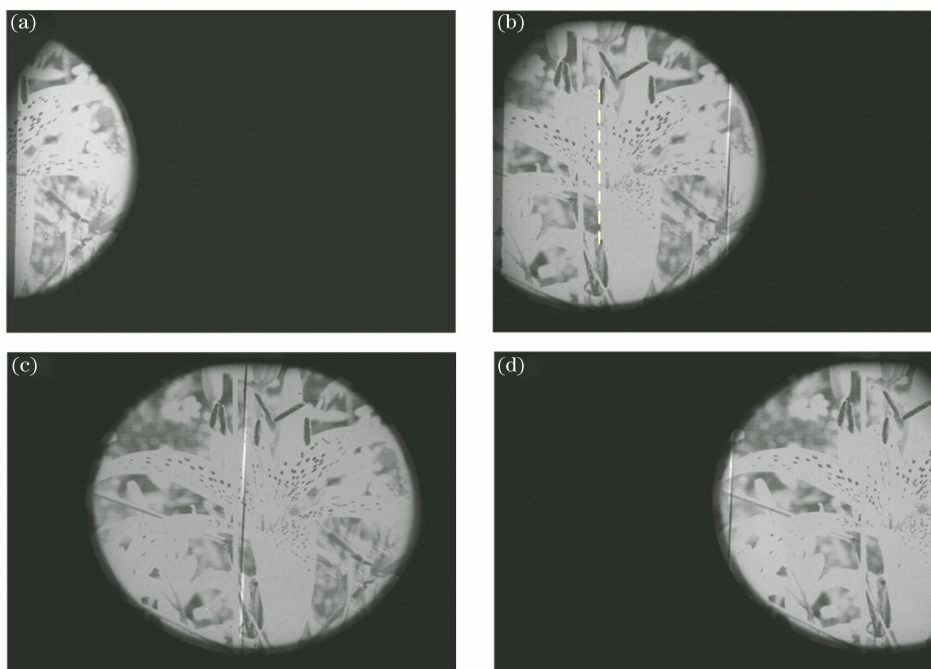


图 10 不同图像在积分球推扫下的成像结果。(a)第 100 frame;(b)第 300 frame;(c)第 500 frame;(d)第 700 frame

Fig. 10 Imaging results of different images pushed by integrating sphere. (a) 100th frame; (b) 300th frame; (c) 500th frame; (d) 700th frame

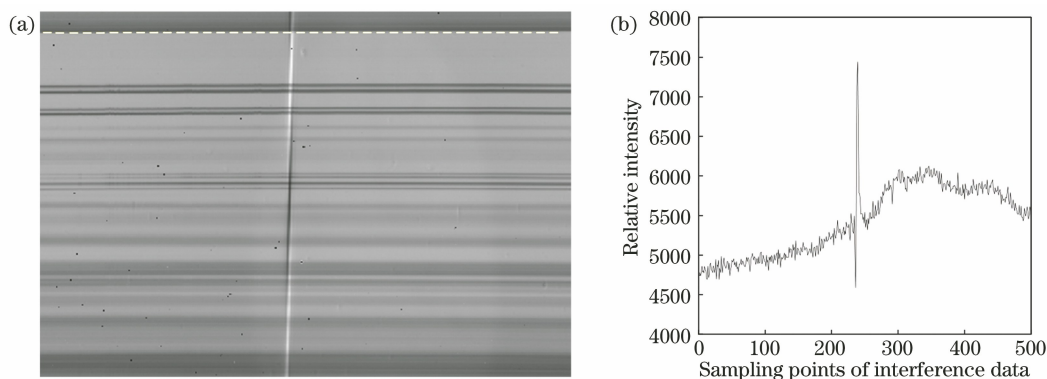


图 11 目标干涉数据。(a)干涉图;(b)单个目标的干涉数据

Fig. 11 Target interference data. (a) Interferogram; (b) interference data for single target

4 结果与讨论

4.1 条纹消除

采用第 2.2 节的方法来构建目标自适应条纹模板,然后利用该条纹模板对推扫图像进行消条纹处理,结果如图 12 所示。图 12(a)为消条纹前第 55 frame 图像,可以明显看到零光程差处由干涉条纹造成的图像失真;图 12(b)为经过所提方法消条纹处理后第 55 frame 图像,可以看到零光程差处不再具有明显的干涉条纹。两图中实线框部分为后续

配准所用的模板图像。

4.2 图像配准

图 13 为推扫图像经过消条纹处理前后的图像配准结果对比,图 13(a)为光谱维的配准结果,图 13(b)为空间维的配准结果,图中虚线为消条纹前的配准结果,实线为消条纹后的配准结果,散点图为消条纹前后的配准结果差值。从图 13 分析得出,在推扫图像未进行消除条纹处理的情况下,当模板图像处于零光程差附近时,由于受到干涉条纹的影响,配准结果曲线剧烈波动,光谱维波动范围达到

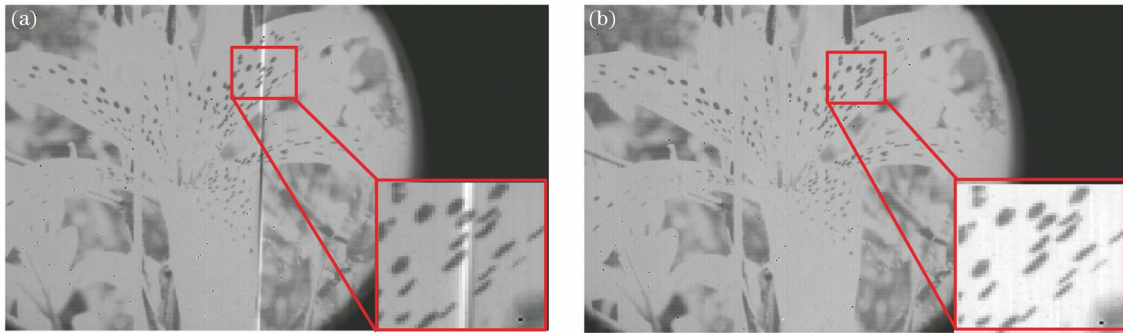


图 12 校正前后的图像数据及模板。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 12 Image data and template before and after correction. (a) Before correction; (b) after correction

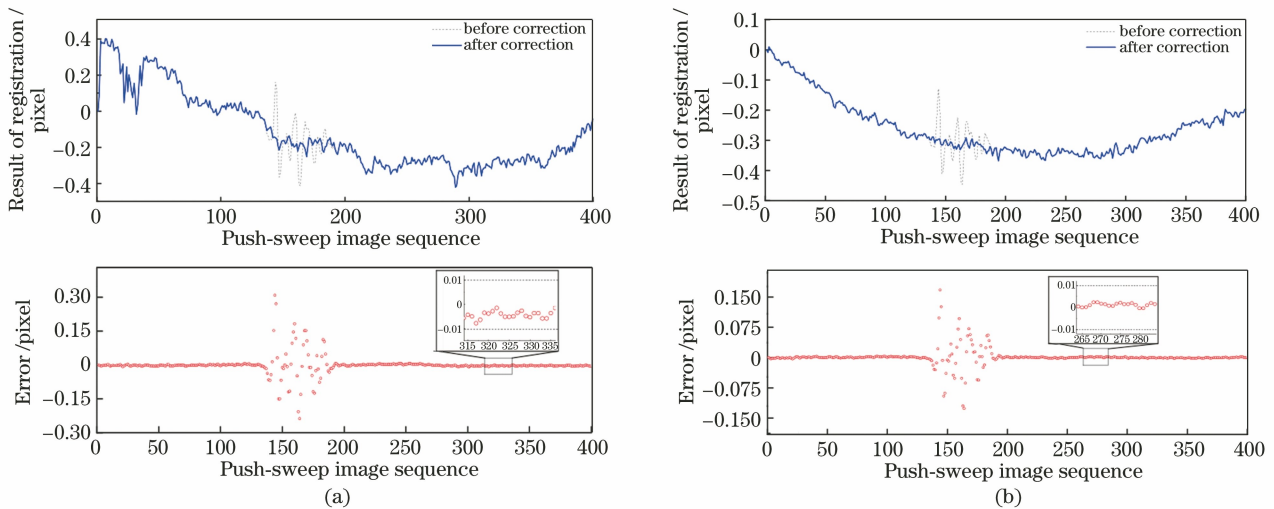


图 13 图像校正前后的配准结果对比。(a)光谱维;(b)空间维

Fig. 13 Comparison of registration results before and after image correction. (a) Spectral dimension; (b) spatial dimension

0.6 pixel,空间维波动范围达到 0.3 pixel,说明该区域的配准结果不可信;推扫图像进行消除条纹处理后,配准曲线呈现连续缓慢的变化情况,与实际推扫运动过程相符合;从配准结果的差值放大图可以看到,消条纹处理对图像配准结果的影响较小,差值在 0.02 pixel 以内,与仿真结果相符。

4.3 干涉数据及复原光谱分析

利用二次曲面插值法对图 14(a)的目标干涉数据进行重采样,并对干涉数据进行剔除坏像元、平场校正和扣除基线等处理^[16],得到的结果如图 14(b)所示。从图 14 可以得出,目标干涉数据得到了有效校正。由于存在相位误差,干涉数据线形与理想线

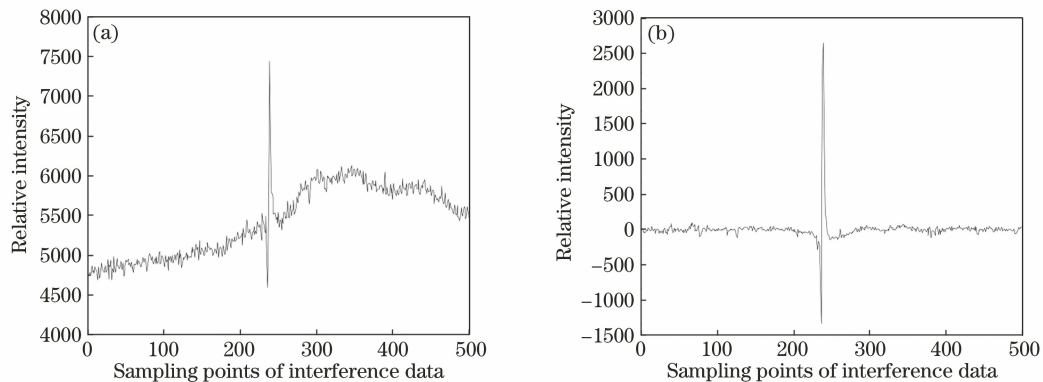


图 14 干涉数据校正前后的对比曲线。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 14 Comparison curves of interference data before and after correction. (a) Before correction; (b) after correction

形不一致。

对目标的干涉数据进行相位校正以及傅里叶变换处理即可得到目标复原光谱,根据第 2.1 节所述的光谱拼接原理对场景内所有目标进行光谱拼接以获取图谱数据立方体,结果如图 15 所示。图 15 的左边为场景内目标图谱数据立方体,右边为目标复

原光谱曲线。经过光谱定标可以得到系统的 Littrow 波数为 6373 cm^{-1} ,光谱分辨率为 0.4 cm^{-1} ;当未对目标复原光谱进行辐射定标时,其线形会受滤光片透过率曲线的影响。图谱数据立方体共包含一个光谱维,对应图中 z 方向;两个空间维,对应图中 x 方向和 y 方向。

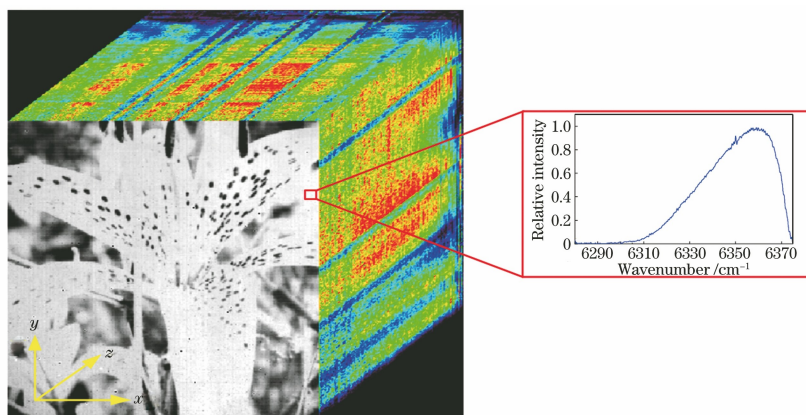


图 15 图谱数据的立方体及目标复原光谱曲线

Fig. 15 Cube and target recovery spectral curve of atlas data

5 结 论

针对时空联合调制型空间外差干涉成像光谱仪(TS-SHIS)推扫图像的数据特点,提出一种基于目标干涉数据的自适应条纹模板构建方法,用来降低推扫图像中干涉条纹对配准计算结果的影响。仿真及实验结果表明,条纹模板可以有效消除推扫图像中的干涉条纹;采用所提方法进行消条纹处理,能够抑制干涉条纹对图像配准结果的影响;消条纹处理对推扫图像配准结果的影响在 0.02 pixel 以内。所提方法对于 TS-SHIS 目标推扫图像的配准计算及后续的数据处理具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Zhang C M. Study on interference imaging spectroscopy [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2001.
张淳民. 干涉成像光谱技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2001.
- [2] Chen Q, Yang J F, Qiao W D, et al. Analysis for signal-to-noise ratio of large aperture static imaging spectroscopy[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(10): 1889-1892.
陈琦, 杨建峰, 乔卫东, 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪的信噪比分析[J]. 光子学报, 2007, 36(10): 1889-1892.
- [3] Ma C. Inversion of free ferric oxide content in surface

soil based on HJ-1A hyperspectral images [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(20): 164-170.

马驰. HJ-1A 高光谱影像的表层土壤游离氧化铁含量反演[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 164-170.

- [4] Lucey P G, Horton K A, Williams T. Performance of a long-wave infrared hyperspectral imager using a Sagnac interferometer and an uncooled microbolometer array[J]. Applied Optics, 2008, 47(28): F107-F113.
- [5] Harig R. Remote sensing of gases by hyperspectral imaging: results of field measurements [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8542: 854227.
- [6] Chang Y Y, Yi W N, Du L L, et al. A new method of on-orbit relative calibration for spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 083004.
常亚运, 易维宁, 杜丽丽, 等. 空间调制干涉成像光谱仪在轨相对定标新方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 083004.
- [7] Lü J G, Zhao B X, Liang J Q, et al. Modeling and experiment of image field modulated Fourier transform imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1811002.
吕金光, 赵百轩, 梁静秋, 等. 像场调制傅里叶变换成像光谱仪的建模与实验研究[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1811002.
- [8] Gao J H, Liang J Q, Lü J G, et al. A stepped mirror based temporally and spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer: principle and data

- processing[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(12): 3932-3939.
- 高健华, 梁静秋, 吕金光, 等. 基于多级微反射镜的时空联合调制傅里叶变换成像光谱仪: 原理及数据处理[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(12): 3932-3939.
- [9] Bin X L, Cai Q S, Du S S. Large aperture spatial heterodyne imaging spectrometer: principle and experimental results [J]. Optics Communications, 2015, 357: 148-155.
- [10] Xiong W. Greenhouse gases monitoring instrument (GMI) on GF-5 satellite (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(3): 0303002.
- 熊伟. “高分五号”卫星大气主要温室气体监测仪(特邀) [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(3): 0303002.
- [11] Nan Y B, Ni G Q. Simulation analysis & experimental study of the effects of satellite vibration frequency and amplitude on hyperspectral image [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(10): 3226-3231.
- 南一冰, 倪国强. 卫星振动频率和振幅对高光谱成像质量影响的仿真分析和实验研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(10): 3226-3231.
- [12] Liu H L, Chen W Y, Xu Z S. An image sub-pixel registration algorithm based on combination of curved surface fitting method and gradient method [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(5): 180-185.
- 刘红亮, 陈维义, 许中胜. 曲面拟合法和梯度法相结合的图像亚像素配准算法 [J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(5): 180-185.
- [13] Gao Y Y. Research on registration of raw image sequence of LASIS [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2007.
- 高莹莹. 大孔径静态干涉成像光谱仪(LASIS)图像配准技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2007.
- [14] Wang F B, Jing J J, Wu Q S, et al. Stripes elimination and registration of large aperture static imaging spectrometer image [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(6): 706-712.
- 王府北, 景娟娟, 吴琼水, 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪图像的条纹消除与配准 [J]. 测绘学报, 2016, 45(6): 706-712.
- [15] Zhao Y. Research on algorithm of mixed pixel decomposition for hyperspectral image linear model [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- 赵岩. 高光谱图像线性模型混合像元分解的算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [16] Ding Y, Luo H Y, Shi H L, et al. New flat-field correction method for spatial heterodyne spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(19): 1930002.
- 丁毅, 罗海燕, 施海亮, 等. 一种新型的空间外差光谱仪平场校正方法 [J]. 光学学报, 2020, 40(19): 1930002.