

# 时空联合调制型空间外差干涉成像仪运动误差评估与校正

丁毅<sup>1,2,3</sup>, 罗海燕<sup>1,2,3\*</sup>, 李志伟<sup>1,3</sup>, 施海亮<sup>1,2,3</sup>, 李思亮<sup>1,2,3</sup>, 熊伟<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>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)在对目标推扫成像过程中,指向镜推扫误差、指向镜定位误差或卫星运动平台振动等会引起目标对应像点 $(x', y')$ 偏离理想位置 $(x, y)$ ,导致其与相邻的若干空间分辨单元之间存在光谱掺杂现象,进而影响干涉数据重构及复原光谱精度。基于 TS-SHIS 机理,针对运动误差引起的目标光谱线性混叠、不同程度的地表反射率差异对复原光谱精度的影响等问题进行了分析;建立了以相邻目标掺杂比、地表反射率差异为变量的混合目标干涉函数关系。依据 MODIS 卫星载荷观测数据,对中国地区不同空间分辨率地表反射率差异进行了分析;以相对光谱二次误差为评价函数,讨论了典型高轨平台姿态参数对不同空间分辨率目标复原光谱精度的影响,该研究为下一代高轨、高时空分辨温室气体探测技术提供技术基础。

**关键词** 测量; 时空联合调制; 空间外差干涉成像光谱仪; 运动误差; 地表反射率差异; 相对光谱二次误差

中图分类号 O433.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0512007

## Motion Error Evaluation and Correction of Temporally and Spatially Modulated Spatial Heterodyne Interference Imaging Spectrometer

Ding Yi<sup>1,2,3</sup>, Luo Haiyan<sup>1,2,3\*</sup>, Li Zhiwei<sup>1,3</sup>, Shi Hailiang<sup>1,2,3</sup>, Li Siliang<sup>1,2,3</sup>, Xiong Wei<sup>1,2,3</sup>

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

<sup>2</sup> University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

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

**Abstract** In the process of target push-broom imaging by a temporally and spatially modulated spatial heterodyne interference imaging spectrometer (TS-SHIS), the push-broom error and positioning error of the pointing mirror and the satellite platform vibration can deviate the actual imaging position  $(x', y')$  of a target from its ideal position  $(x, y)$ . This results in spectral mixing between adjacent targets, affecting the interference data reconstruction and reducing the accuracy of recovery spectra. In light of the mechanism of TS-SHIS, this paper discussed the linear mixing of target spectra caused by motion errors and the influence of surface reflectance difference on the accuracy of recovery spectra. On this basis, the interference function of mixed targets was established with the mixing ratio of adjacent targets and the surface reflectance difference as variables. Further, we analyzed the surface reflectance differences of different spatial resolutions in China based on MODIS satellite payload data. Taking the relative spectral quadratic error as an evaluation function, we explored the effects of attitude parameters of a typical high-orbit platform on the accuracy of target recovery spectra with different spatial resolutions. This research provides a

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-04-29; 录用日期: 2021-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(61975212, 41975033)

通信作者: \*luohaiyan@aiofm.ac.cn

technical basis for the next generation of high-orbit greenhouse gas detection technology with high spatial and temporal resolutions.

**Key words** measurement; temporal and spatial modulation; spatial heterodyne interference imaging spectrometer; motion error; surface reflectance difference; relative spectral quadratic error

## 1 引言

干涉成像光谱技术<sup>[1]</sup>起源于 20 世纪 80 年代, 具有高光谱分辨率、大光通量、多通道<sup>[2]</sup>的优点, 在目标识别、大气成分监测等遥感探测领域<sup>[3-5]</sup>有广泛的应用。根据目标干涉数据获取方式的不同, 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<sup>[6-7]</sup>。时间调制型系统内部含有一套高精度的动镜系统, 对系统稳定性要求较高; 空间调制型系统通过单次成像可获取沿狭缝方向所有目标的干涉数据, 但其光路中含有狭缝, 这限制了其光通量; 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<sup>[8]</sup>。目前已有部分研究团队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) 展开了相关研究<sup>[9-11]</sup>, 该技术<sup>[12-13]</sup>在较窄波段范围内容易获取极高光谱分辨率和较好的静态干涉稳定性, 在大气遥感探测方面具有良好的应用前景。

根据不同的时间调制方式, 即利用卫星平台沿光谱维方向的推扫方式或者指向镜沿光谱维方向的推扫方式, 卫星平台振动、指向镜推扫方向偏差和指向镜定位误差等会导致系统在对目标进行推扫成像过程中, 目标实际成像位置会偏离理想成像位置<sup>[14]</sup>, 进而导致周边相邻目标的图像及光谱信息与待测目标信息发生掺杂, 从而降低了待测目标干涉数据以及复原光谱的精度。以卫星平台振动为例, 空域上的振动分为平动和转动两种类型, 振动频率与系统采样频率之比大于 2.5 时为高频振动, 低于 2.5 时为低频振动<sup>[15]</sup>。唐秋艳等<sup>[16-17]</sup>对复杂振动条件下光谱退化现象进行了仿真; 南一冰等<sup>[18]</sup>针对以光栅为分光元件的色散型成像光谱仪, 研究了卫星振动频率和振幅对高光谱成像质量的影响, 而针对 TS-SHIS 的运动误差影响的研究目前未见报道。因此, 本文针对上述问题, 基于典型高轨平台姿态参数研究运动误差对 TS-SHIS 干涉数据及复原光谱的影响。

基于时空联合调制型空间外差干涉成像光谱技术机理研究, 分析了卫星平台振动导致的光谱掺杂现象以及相邻目标地表反射率差异对目标干涉数据及光谱数据的影响, 并构建了相关的函数关系。仿

真结果表明相邻目标地表反射率差异与目标相对光谱二次误差 (RQE) 呈线性关系; 卫星振动频率低于系统奈奎斯特采样频率时, 目标复原光谱曲线中会引入显著的光谱误差, 通过降低系统采样频率可有效减小卫星平台振动对目标复原光谱的影响。

## 2 空间外差干涉成像时空联合调制原理

空间外差干涉成像光谱仪 (SHIS) 光路布局如图 1 所示, 利用两个闪耀光栅代替 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准直镜组后进入分束器, 分束器将入射光线分为强度相等的两束相干光, 然后再经干涉仪内部的成像镜组成像于两光栅面上。经光栅衍射后返回至分束器的两束相干光在定域面形成干涉条纹, 干涉条纹经后置成像镜组的比例缩放后, 最终成像在探测器面上。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, 通过仪器沿光谱维方向的推扫得到同一目标在其他光程差点的干涉信息, 经过一次完整的推扫过程获取目标完整的干涉数据。

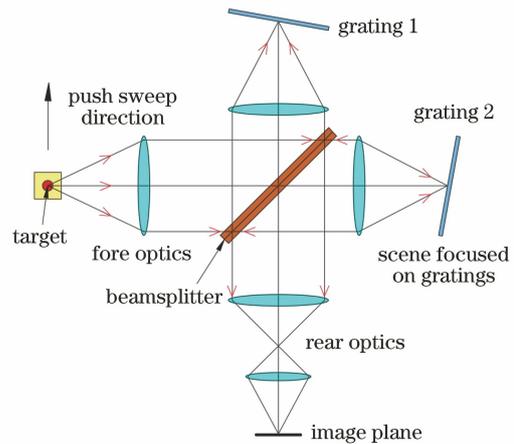


图 1 SHIS 光路布局图

Fig. 1 Optical path layout of SHIS

目标点在探测器像面上的干涉数据强度为

$$I(t) =$$

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

式中:  $I(t)$  为目标干涉数据强度;  $x$  为光谱维坐标;  $t$  为采样时刻;  $B(\sigma)$  为目标光谱,  $\sigma$  为入射光谱波数;

$\sigma_0$  为系统 Littrow 波数;  $\theta_L$  为系统 Littrow 角度;  $w$  为光栅有效照明宽度。

目标干涉数据拼接原理如图 2 所示, A、B、C 为沿空间维相邻分布的 3 个目标;  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  分别对应 3 个相邻帧图像, 系统自右向左推扫。以目标 A 为例:  $T_1$  时刻, 其成像于探测器像面第一行最右侧像元上;  $T_2$  时刻, 其成像于探测器像面第一行中间像元

上;  $T_3$  时刻, 其成像于探测器像面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元第一行像元上。通过对连续帧推扫图像逐帧逐像元进行数据提取即可得到目标 A 的完整干涉数据, 通过对目标 A 的干涉数据进行校正处理以及傅里叶变换后即可得到目标 A 的光谱信息, 进而获取场景内所有目标的图谱数据立方体。

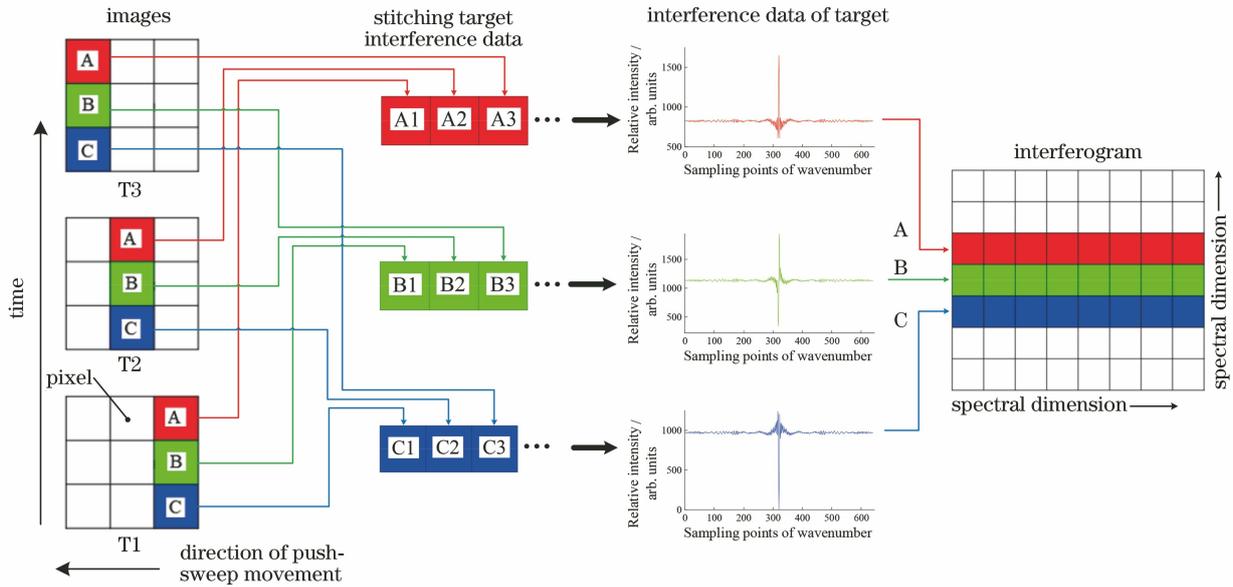


图 2 目标干涉数据获取原理

Fig. 2 Principle of target interference data acquisition

### 3 运动误差影响模型

#### 3.1 混合目标光谱掺杂分析

通常, 运动误差导致相邻帧目标成像位置的影响在单像元以内, 因此, 假设待测目标的实际成像位

置以理想像元为原点进行周期性的变动, 理想像点处实际接收到的是待测目标与其周边 8 个相邻目标的混合光谱。如图 3 所示, 图 3(a) 为待测目标 ( $m, n$ ) 与其周围 8 个相邻目标; 图 3(b) 为相邻目标发生掺杂的 4 种具体情况, 中间方格为实际待测目标, 周

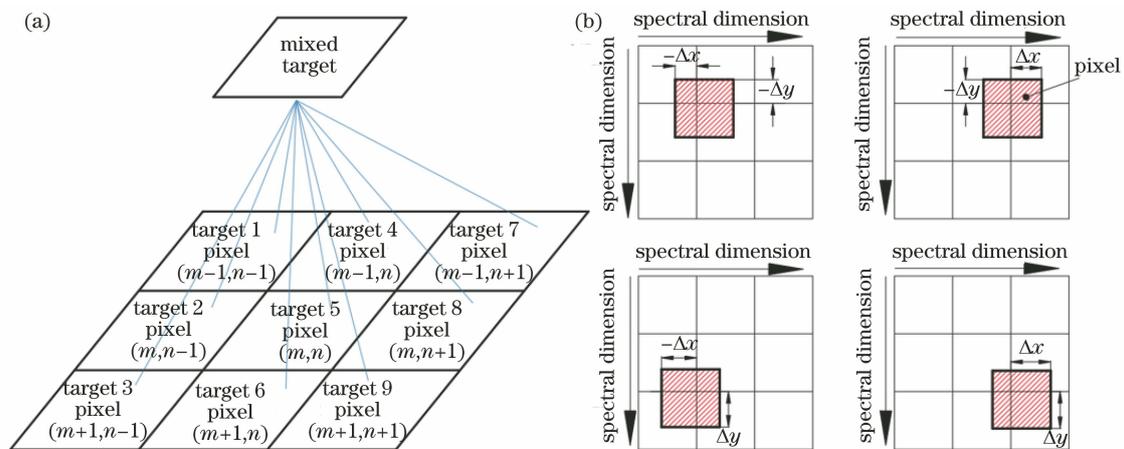


图 3 相邻目标光谱混叠与分类。(a) 目标光谱混叠现象; (b) 4 种目标混叠情况

Fig. 3 Spectrum mixing and classification of adjacent targets. (a) Target spectrum mixing; (b) four kinds of situations of target spectrum mixing

边 8 个方格为 8 个相邻目标,阴影框部分为待测目标理想成像位置(像元), $\Delta x$ 、 $\Delta y$  分别为待测目标实际成像位置与理想成像位置在  $x$  和  $y$  方向的偏离量(单位:pixel)。

根据光谱线性混合理论<sup>[19]</sup>,混合目标光谱是由构成该像元的各目标光谱强度与其成像面积占像元面积的比例为权重系数的线性组合。因此,像元实际获取的混合目标光谱的计算公式为

$$B'(\sigma) = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \eta_{mn} B_{mn}(\sigma), \quad \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \eta_{mn} = 1, \quad (2)$$

式中: $B'(\sigma)$  为像元实际接收的混合目标光谱; $B_{mn}(\sigma)$  为各掺杂目标光谱; $\eta_{mn}$  为各掺杂目标成像面积占像元面积的比例(掺杂比)。分析方程可知,混合目标光谱信息主要受到掺杂目标光谱  $B_{mn}(\sigma)$  以及对应的掺杂比  $\eta_{mn}$  的影响;在系统推扫成像过程中,掺杂目标光谱  $B_{mn}(\sigma)$  通常保持不变,因而混合目标光谱数据仅受掺杂比  $\eta_{mn}$  的影响。掺杂比与卫星平台的运动状态相关,卫星平台呈周期性的运动状态时,目标掺杂比也呈现出周期性的变化情况。混合目标光谱与待测目标理想光谱之间的差异由 RQE 函数进行描述,其公式为

$$R_{\text{RQE}} = \frac{\sqrt{\int |B'(\sigma) - B(\sigma)|^2 d\sigma}}{\int B(\sigma) d\sigma}. \quad (3)$$

### 3.2 混合目标地表反射率差异分析

时空联合调制过程中,运动误差引起待测目标偏离理想成像像元位置,导致待测目标与其相邻目标在理想成像像元处发生光谱混叠。运动误差会导致遥感器像元响应值变化,即不同空间分辨单元辐射亮度的变化。根据文献<sup>[20]</sup>对地表辐射度、入射辐射照度与地表反射率的分析,可得

$$\rho_i = \frac{\pi L_i}{E_i}, \quad (4)$$

式中: $\rho_i$  为  $i$  波段的地表反射率; $L_i$  为  $i$  波段的地表辐射度; $E_i$  为  $i$  波段的总照度。从(4)式中可以看出,在相同的入射辐射度情况下,地面目标的辐射度与其地表反射率呈线性关系。由于 TS-SHIS 观测波段范围较窄(约 20 nm),可认为目标的地表反射率不随波长发生改变;并且,相邻目标之间大气参数以及观测角度等参数差异较小;因此,TS-SHIS 对地面目标进行观测时,相邻目标光谱强度的关系为

$$\frac{B_n(\sigma)}{B_m(\sigma)} = \frac{\rho_n}{\rho_m}, \quad (5)$$

式中: $\rho_n$  为目标  $n$  的地表反射率; $\rho_m$  为目标  $m$  的地表反射率; $B_n(\sigma)$  为目标  $n$  在入射光谱波数为  $\sigma$  时的光谱强度; $B_m(\sigma)$  为目标  $m$  在入射光谱波数为  $\sigma$  时的光谱强度。

由(5)式可知,相邻目标光谱强度之比可以表述为其各自对应的地表反射率强度之比,通过计算相邻目标之间地表反射率的差异即可得到对应的目标光谱强度差异。图 3(b)给出的 4 种掺杂状态对应的地表反射率差异计算方法为

$$\begin{cases} R_{\text{RE}_1} = \left| \frac{R_1 + R_2 + R_4}{3} - R_5 \right| \times 100 \\ R_{\text{RE}_2} = \left| \frac{R_4 + R_7 + R_8}{3} - R_5 \right| \times 100 \\ R_{\text{RE}_3} = \left| \frac{R_2 + R_3 + R_6}{3} - R_5 \right| \times 100 \\ R_{\text{RE}_4} = \left| \frac{R_6 + R_8 + R_9}{3} - R_5 \right| \times 100 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $R_1 \sim R_4$  和  $R_6 \sim R_9$  为各目标地表反射率; $R_5$  为待测目标地表反射率。被测目标与其周围相邻目标的地表反射率差的计算式为

$$R_{\text{RE}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 R_{\text{RE}_i}. \quad (7)$$

分析(5)~(7)式可知,地表反射率差异越小,运动误差对被测目标复原光谱精度的影响越小。因此,当存在固定运动误差时,地表反射率差异统计数据可作为在轨遥感器数据融合的判别条件,针对不同类型被测区域进行不同程度的空间分辨率数据融合,可在光谱数据有效性的前提下减少数据冗余。

## 4 运动误差仿真验证

### 4.1 参试遥感器及运动平台参数

对卫星平台振动导致的目标干涉数据及复原光谱的误差进行仿真,假设卫星平台处于地球静止轨道,轨道高度为 35786 km,卫星姿态角稳定度参考国内风云四号卫星,姿态角稳定度控制在 3"以内。参试仪器为本课题组现有的 CO<sub>2</sub> SHIS 原理样机,由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制,用于基于大气 CO<sub>2</sub> 对太阳光谱吸收线的探测;探测器采用比利时 Xenics 公司生产的 XEVA-FPA-1.7-640 型探测器,响应波段为 0.9~1.7  $\mu\text{m}$ ;像元数为 512×640(实际使用的有效像元数为 400×500),像元尺寸为 20  $\mu\text{m}$ 。系统仿真的主要技术参数如表 1 所示。表 1 中  $f_z/f_c$  为卫星平台振动频率  $f_z$  与系统采样频率  $f_c$  之比。

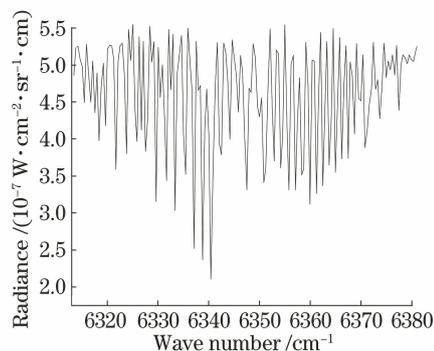
表 1 CO<sub>2</sub> SHIS 主要技术参数Table 1 Main technical parameters of CO<sub>2</sub> SHIS

Main parameter	Value
Orbital altitude /km	35786
Spectral resolution /cm <sup>-1</sup>	0.4
Spectral range /nm	1568—1584
Littrow wavelength /nm	1567
Detector resolution at 20 μm	512×640
Attitude stability /(")	3
$f_z/f_c$	2.5

原理样机的探测目标为大气 CO<sub>2</sub> 近红外波段 (1568~1584 nm) 吸收光谱, 图 4 为遥感器典型入瞳辐亮度 ( $5.0 \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$ ) 条件下, 卷积仪器线型函数的光谱分辨率为  $0.4 \text{ cm}^{-1}$  时的 CO<sub>2</sub> 吸收光谱, 用于模拟分析卫星平台振动对在轨实测吸收光谱 (CO<sub>2</sub> 光谱基线和光谱吸收峰深度) 的影响。

#### 4.2 中国中东部地区仿真结果

对中国中东部地区的空间分辨率为 3 km、1568~1584 nm 波段范围内的 CO<sub>2</sub> 大气吸收谱线

图 4 CO<sub>2</sub> 吸收光谱Fig. 4 Absorption spectrum of CO<sub>2</sub>

进行仿真, 通过自东向西连续推扫获取 640 帧干涉图像数据。图 5 给出了系统推扫过程中第 100 帧、200 帧、300 帧和 400 帧的结果。光谱维对应图中的  $x$  方向, 空间维对应图中的  $y$  方向。矩形框中所选目标为我国的青海湖, 对目标沿光谱维不同光程差点对应的像元按时间序列成像, 直至超过系统视场范围。

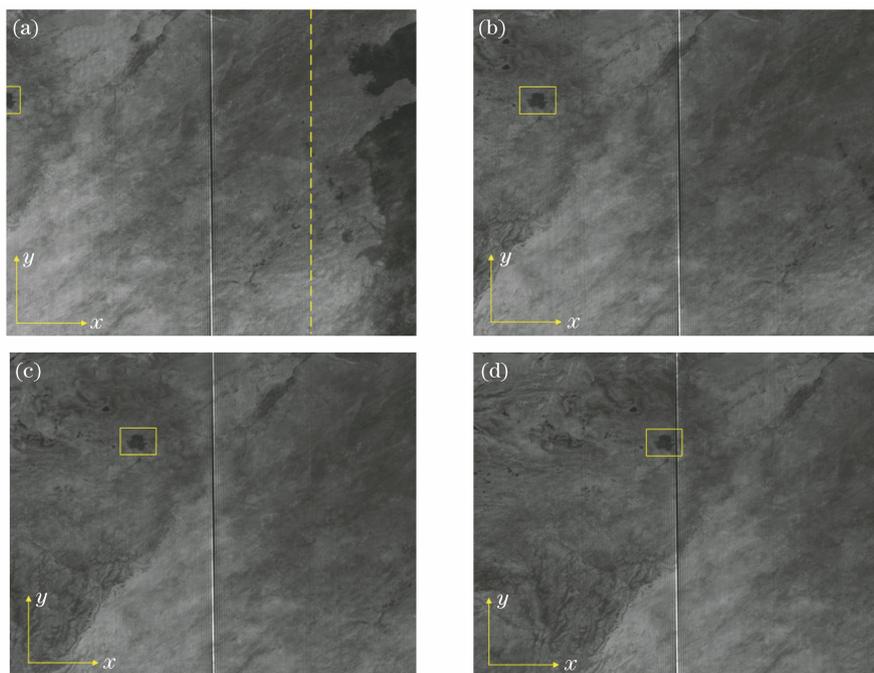


图 5 仿真 1 的结果。(a) 第 100 帧图像; (b) 第 200 帧图像; (c) 第 300 帧图像; (d) 第 400 帧图像

Fig. 5 Results of simulation 1. (a) Image at 100<sup>th</sup> frame; (b) image at 200<sup>th</sup> frame; (c) image at 300<sup>th</sup> frame; (d) image at 400<sup>th</sup> frame

提取图 5(a) 中虚线所示第 470 列目标, 对 640 帧图像逐帧逐像元进行数据拼接, 得到目标的干涉数据如图 6 所示, 图 6(a) 为第 470 列目标的重构干涉图, 图 6(b) 为两个不同目标点的干涉数据。其

中, 光谱维  $x$  对应不同的光程差, 且与时间相关。由图 6 可知, 不同行的干涉强度主要受地表反射率的影响, 地表反射率越高则干涉强度越大。

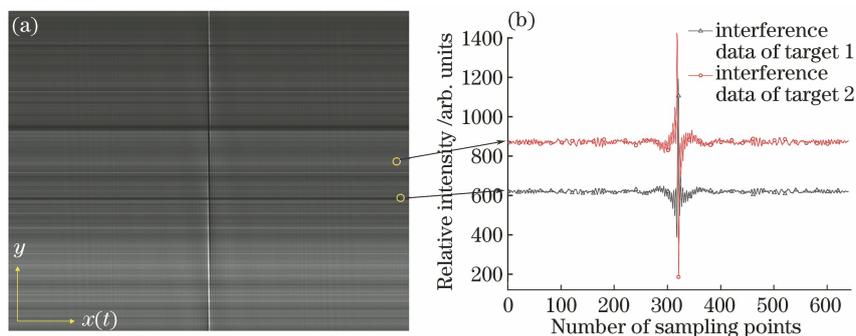


图 6 仿真 2 的结果。(a) 第 470 列目标干涉图；(b) 两目标点的干涉数据

Fig. 6 Results of simulation 2. (a) Target interferogram of 470<sup>th</sup> column; (b) interference data of two targets

#### 4.2.1 中国典型地貌地表反射率差异统计

中国地区地表反射率数据如图 7 所示, 地表反射率数据来源于 MODIS 卫星于 2020 年 9 月 9 日的观测结果, 观测波段为 1628~1652 nm, 选取的波段应尽可能靠近原理样机的 CO<sub>2</sub> 吸收波段, 空间分辨率为 3 km。图中框选区域为本次分析所选取的

样本目标, 分别是华北地区(600 km×500 km, 方框 1)、华南地区(600 km×500 km, 方框 2)、云贵地区(500 km×500 km, 方框 3)、长三角地区(220 km×330 km, 方框 4)以及中国内陆地区(2000 km×2000 km, 方框 5)。

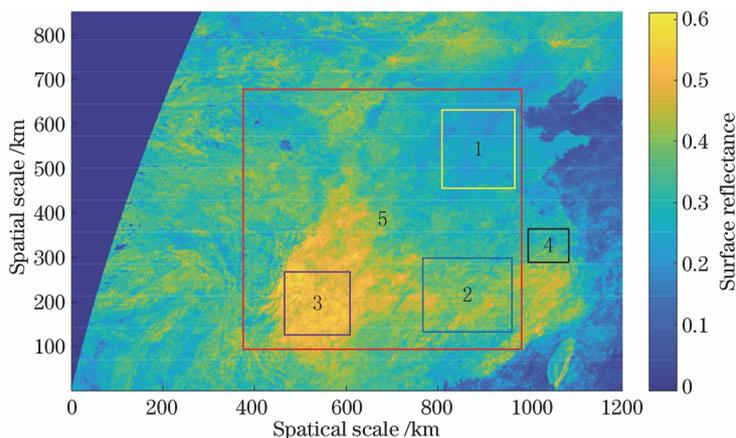


图 7 地表反射率数据

Fig. 7 Surface reflectance data

图 8 为中国内陆地区和长三角地区的地表反射率差异统计结果, 空间分辨率为 3 km, 从图 8(a)、(b)中可以看出, 两地区目标的地表反射率差异主

要集中在 15% 以内; 长三角地区地表反射率差异较中国内陆略高, 这是因为长三角地区地貌特征更加复杂。表 2 为所选 5 个样本区域的地表反射率差异

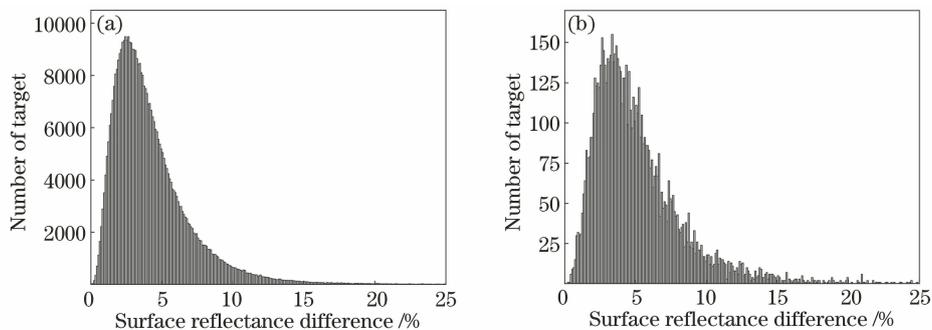


图 8 地表反射率差异统计结果。(a) 中国内陆; (b) 长三角地区

Fig. 8 Statistical results of surface reflectance differences. (a) Inland China; (b) Yangtze River Delta

统计结果,给出了 80%、90%、95%、98% 的目标点的地表反射率差异范围。从表 2 中可以看出,中国

内陆地区 98% 的目标点地表反射率差异在 12.2% 以内。

表 2 中国典型地貌地表反射率差异统计结果

Table 2 Statistical results of surface reflectance difference of typical landforms in China

Target point proportion / %	Surface reflectance difference / %				
	North China	South China	Yunnan-Guizhou Plateau	Yangtze River Delta	Inland China
80	5.7	5.4	4.1	7.1	5.9
90	7.4	6.8	5.1	9.1	7.7
95	9.1	8.4	6.2	11.3	9.6
98	11.6	10.7	7.7	14.4	12.2

对样本区域内目标地表反射率数据进行数据插值及融合计算,然后对图 7 中样本区域内 98% 目标点的地表反射率差异随空间分辨率的变化情况进行统计,结果如图 9 所示。从图中可以得出,地表反射率差异范围随着空间分辨率的降低逐渐减小,在空间分辨率低于 3 km 范围内的降低速度较快,在空间分辨率大于 3 km 后降低速度较慢并趋于平缓。长三角地区的地表反射率差异最大;云贵为代表的高原地区,地形单一,且人类活动影响较小,地表反

射率差异最小;华北、华南及中国内陆地区的地表反射率差异处于前述两者之间。

#### 4.2.2 空间分辨率对复原光谱的影响

处于地球静止轨道的卫星平台离地面较远,对探测结果影响较大的因素是卫星平台的转动,即俯仰、侧滚和偏航 3 个姿态角的振动;文献[14]指出,在同样的姿态稳定度下,由俯仰和侧滚所引起的像素非正常偏移量要比偏航所带来的像素非正常偏移量大;因此,本节以俯仰、侧滚姿态角的振动为例,分析不同空间分辨率下卫星平台振动对目标干涉数据及复原光谱的影响。当空间分辨率为 1,2,3,4 km 时,对应的系统瞬时视场角分别为 5.76"、11.53"、17.29"、23.06"。以表 1 中卫星平台的姿态稳定度为 3" 为例,此时,目标成像位置最大偏差分别为 0.52,0.26,0.17,0.13 pixel;卫星平台振动频率  $f_z$  与系统采样频率  $f_c$  之比设置为 2.5。空间维和光谱维方向的振幅及振动频率相同,初始相位不同,振动形式为简谐振动;空间维及光谱维的振动曲线如图 10 所示。

仿真得到待测目标、混合目标两者的干涉数据以及复原光谱对比如图 11 所示,图 11(a) 为干涉数据对比,图 11(b) 上图为归一化复原光谱对比,

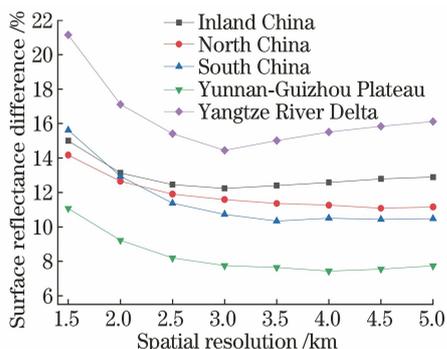


图 9 样本范围内 98% 目标点的地表反射率差异范围随空间分辨率的变化情况

Fig. 9 Difference range of surface reflectance of 98% targets in sample range varying with spatial resolution

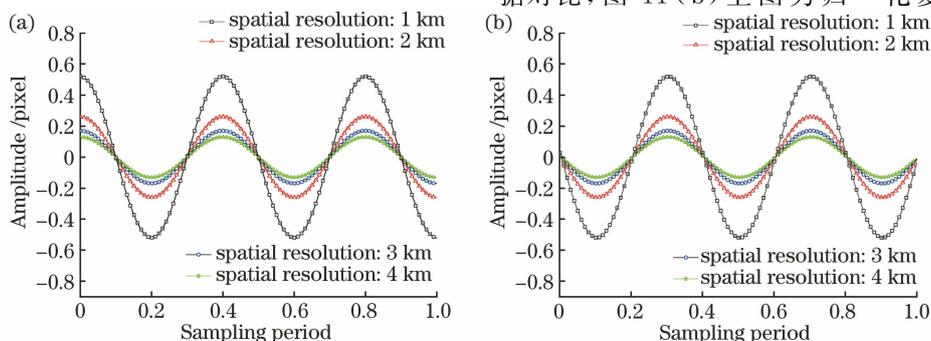


图 10 不同空间分辨率下的卫星平台振动曲线。(a) 光谱维;(b) 空间维

Fig. 10 Vibration curves of satellite platform under different spatial resolutions. (a) Spectral dimension; (b) spatial dimension

图 11(b)下图为复原光谱偏差。图 11 所列举待测目标的空分辨率率为 3 km,目标地表的反射率差异为 12.2%,对应中国内陆地区 98%目标点的地表反射率差异边界值。

从图 11(a)中干涉数据局部放大图以及图 11(b)中复原光谱与理想光谱之间的差值(散点图)中可以看出,受卫星平台振动的影响,待测目标

干涉数据和复原光谱都与理想数据具有较大偏差。利用 RQE 函数对目标复原光谱误差进行定量评价。图 12 显示空间分辨率分别为 1,2,3,4 km 时 512 个目标点的复原 RQE 值。从图中可以看出: 1)随着空间分辨率的降低,目标复原 RQE 值逐渐降低;2)目标复原 RQE 值随着地表反射率差异的增大而变大,两者具有较强的线性关系。

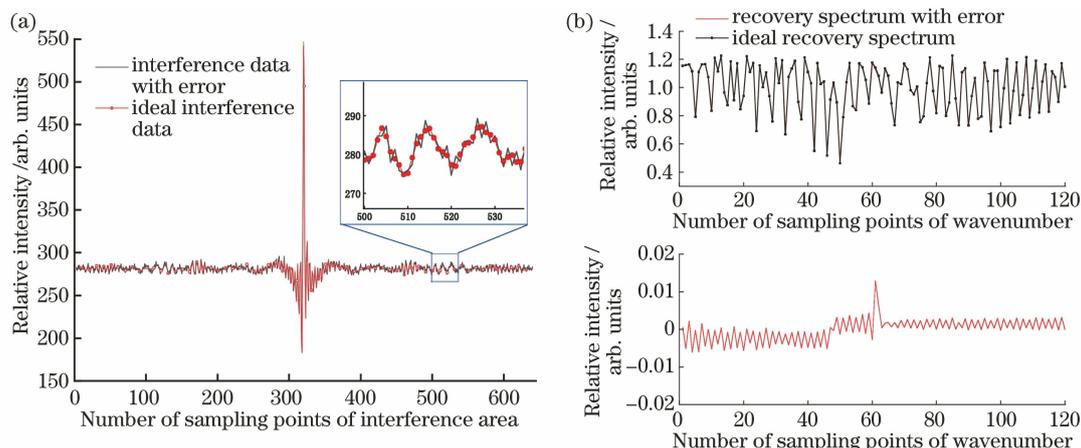


图 11 含误差的干涉数据、复原光谱与理想数据的对比,以及偏差。(a)含误差的干涉数据与理想数据的对比; (b)含误差的复原光谱与理想数据的对比和偏差

Fig. 11 Deviation and relationship among interference data, recovery data, and ideal data. (a) Comparison between interference data with error and ideal data; (b) deviation and comparison between recovery data with error and ideal data

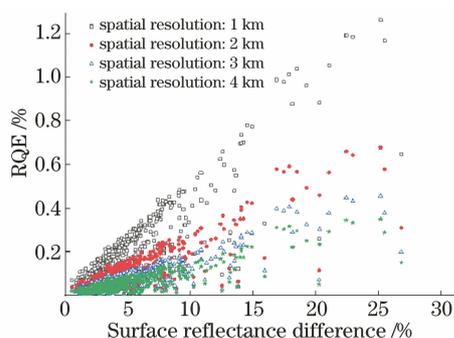


图 12 复原光谱 RQE 与地表反射率差异的关系  
Fig. 12 Relationship between recovery RQE and surface reflectance difference

#### 4.2.3 振动频率对复原光谱的影响

由于太空中没有空气阻力,卫星平台的振动能量将保持较长时间<sup>[21]</sup>;TS-SHIS 沿时间维对目标干涉数据进行均匀采样,因此,目标干涉数据中会叠加周期性振动信号。经过傅里叶变换后,干涉数据中周期性的振动信号会复原到对应外差波数的光谱上,造成复原光谱失真。图 13 展示的是  $f_z/f_c = 0.2$  以及  $f_z/f_c = 1.0$  两种情况下,混合目标的干涉数据(已扣除基线)、复原光谱与理想数据的对比。

如图 13(a)所示,  $f_z/f_c = 0.2$  时,  $f_z$  满足系统

奈奎斯特采样频率限制,复原光谱中第 128 个波数采样点处具有较大的误差,这是由卫星平台振动频率与系统采样频率之比与该外差波数对应的输入光谱在探测器面上形成的干涉条纹的空间频率与探测器像元空间频率之比相同造成的。第 256 个波数采样点处存在一个较强的误差光谱,该光谱处于滤光片的截止波段范围内,这是由卫星平台振动所引入的伪信号。该处光谱外差波数是受卫星平台振动影响的光谱外差波数的两倍,这是因为振动方向上两掺杂目标的地表反射率相近,卫星平台振动一次,待测目标经历两次相似的掺杂过程。

如图 13(b)所示,  $f_z/f_c = 1.0$  时,卫星平台振动所引入的误差信号相当于一个高频信号,由于系统采样频率低于误差信号振动频率的 1/2,该误差信号并不能被有效复原。高频信号对空间外差光谱仪具有平场效果,造成干涉数据基线抬高<sup>[22]</sup>,基线数据可以通过扣除基线处理进行校正,因而,目标复原光谱误差被抑制。从图中可以看出,由卫星平台振动引入的光谱误差和伪信号得到了抑制。

分别设置  $f_z/f_c$  等于 0.2,0.4,1.0 时,目标复原 RQE 值与地表反射率差异之间的关系如图 14 所示。从图中可以看出,当  $f_z/f_c$  比值较小时,卫星平

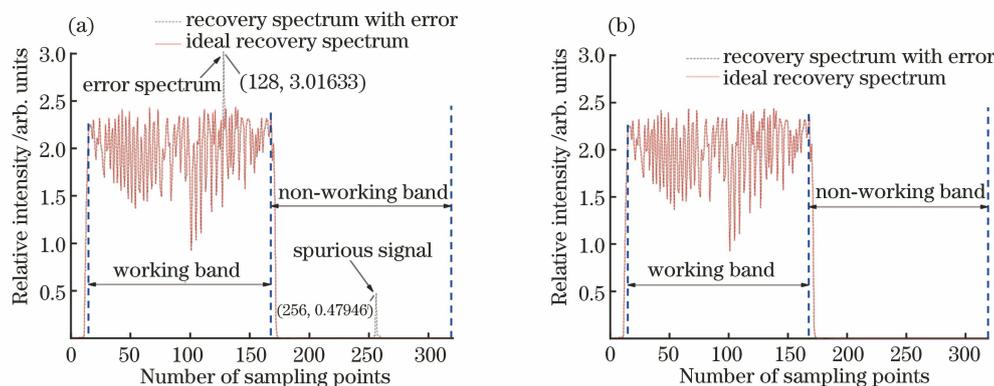


图 13 不同  $f_z/f_c$  比值下混合目标光谱数据与理想数据对比。(a)  $f_z/f_c=0.2$ ;(b)  $f_z/f_c=1.0$

Fig. 13 Comparison of mixed target spectral data and ideal data under different  $f_z/f_c$ .

(a)  $f_z/f_c=0.2$ ; (b)  $f_z/f_c=1.0$

台振动导致目标复原光谱误差 RQE 值较高;随着  $f_z/f_c$  比值的增加,目标复原 RQE 值降低。由于卫星平台振动频率无法改变,通过降低系统采样频率可有效减小卫星平台振动对目标复原光谱的影响。

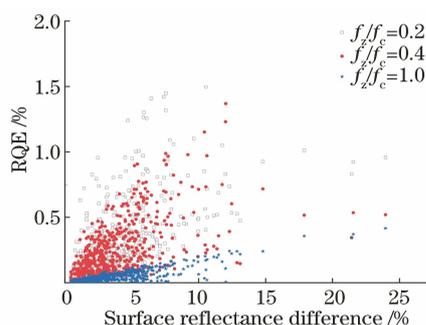


图 14 不同  $f_z/f_c$  比值下复原 RQE 与地表反射率差异的关系

Fig. 14 Relationship between recovery RQE and surface reflectance difference at different  $f_z/f_c$ .

## 5 结 论

针对 TS-SHIS 运动误差导致的目标像点偏离、光谱掺杂等问题,根据光谱线性混合模型,建立了混合目标光谱数据与相邻目标掺杂比、相邻目标地表反射率差异之间的函数关系。依据 MODIS 卫星载荷观测数据,对中国 5 大典型区域的地表反射率差异进行了统计和分析,结果表明,在 3 km 空间分辨率条件下 90% 目标点的地表反射率差异低于 10%。根据国内典型高轨平台参数,仿真分析了卫星平台振动对目标复原光谱精度的影响。结果表明,卫星平台振动的影响主要集中于其振动频率低于系统采样频率的区间 ( $f_z/f_c < 1$ ) 内。本文研究结果对于 TS-SHIS 在高轨高时空分辨温室气体探测任务中的应用具有一定的指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang C M. Study on interference imaging spectroscopy[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, 2001.  
张淳民. 干涉成像光谱技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 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] Sabbah S, Rusch P, Gerhard J H, et al. Remote sensing of gases by hyperspectral imaging: results of measurements in the Hamburg port area [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8186: 81860S.
- [6] Jing J J, Xiangli B, Lü Q B, et al. Advance in interferogram data processing technique [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(4): 865-870.  
景娟娟, 相里斌, 吕群波, 等. 干涉光谱数据处理技术研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(4): 865-870.
- [7] 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.
- [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] Smith B W, Harlander J M. Imaging spatial heterodyne spectroscopy: theory and practice [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3698: 925-931.
- [10] 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.
- [11] Cai Q S. Research on large aperture spatial heterodyne imaging spectroscopy [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- 才敏胜. 大孔径空间外差干涉光谱成像技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [12] 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.
- [13] Jin W, Chen D H, Li Z W, et al. Screening and testing method of satellite-borne detectors for spatial heterodyne spectrometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0904004.
- 金伟, 陈迪虎, 李志伟, 等. 星载空间外差光谱仪探测器筛选测试方法[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0904004.
- [14] Yu C W, Chen D R, Yang J F, et al. Influence of satellite attitude jitter on LASIS imaging quality[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(5): 4-6, 13.
- 余成伟, 谌德荣, 杨建峰, 等. 卫星姿态抖动对 LASIS 成像质量的影响[J]. *光电工程*, 2004, 31(5): 4-6, 13.
- [15] Tang Y, Tang Q Y, Wang X Y, et al. Simulation and analysis of interference imaging spectrometer influenced by satellite vibration[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(11): 3149-3153.
- 唐义, 唐秋艳, 王晓燕, 等. 干涉成像光谱仪受卫星振动影响的仿真与分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(11): 3149-3153.
- [16] Tang Q Y, Tang Y, Cao W L, et al. Simulation of imaging spectrometers degraded by satellite vibrations [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(7): 070202.
- 唐秋艳, 唐义, 曹玮亮, 等. 卫星平台复杂振动引起的光谱成像退化仿真研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(7): 070202.
- [17] Zhang L J, Chang Y E, Tang Y, et al. Simulation of pseudo cross-correlation degraded by the hyperspectral imaging of satellite complex motion [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(8): 2196-2202.
- 张丽君, 常月娥, 唐义, 等. 卫星平台高光谱复杂运动成像伪互相关退化仿真研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(8): 2196-2202.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Du S D, Zhang Y J, Wei W, et al. Analysis of influence of solar zenith angle on reconstruction of hyperspectral surface reflectance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0229001.
- 杜沈达, 张运杰, 韦玮, 等. 太阳天顶角对反演高光谱地表反射率影响分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0229001.
- [21] Xu B Q. Study on image compensation technology for spaceborne cameras under micro-vibration circumstances [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2015.
- 许博谦. 星载相机微振动下图像补偿技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- [22] 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.