

星载红外高光谱傅里叶变换光谱仪 条纹计数错误的检测及校正

刘畅^{1,2,3}, 施海亮^{1,2,3}, 李志伟^{1,3}, 吴春强⁴, 漆成莉⁴, 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;

⁴国家卫星气象中心中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

摘要 针对星载红外傅里叶光谱仪中存在的干涉图条纹计数错误, 系统地介绍了其形成原因及对复原光谱的影响, 并提出了检测和校正方法。通过对干涉图的偏移相位进行线性拟合, 能够精确获得条纹计数误差个数; 采用理论仿真验证了所提方法的准确性, 误差最低可至 1.25%; 最后采用实际数据进行验证, 验证结果表明所提方法能够达到较好的检测及校正效果。

关键词 遥感; 高光谱; 傅里叶光谱仪; 条纹计数错误; 相位

中图分类号 O433.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1630002

Detection and Correction of Fringe Count Error in Spaceborne Infrared Hyperspectral Fourier Transform Spectrometer

Liu Chang^{1,2,3}, Shi Hailiang^{1,2,3}, Li Zhiwei^{1,3}, Wu Chunqiang⁴,
Qi Chengli⁴, 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 of Chinese Academy of Sciences,
Hefei, Anhui 230031, China;

⁴Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellite,
National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract Aiming at the fringe count error (FCE) in the spaceborne infrared Fourier spectrometer, the reason for its formation and its influence on the recovered spectrum are systematically introduced. Further, detection and correction methods are proposed. The number of FCEs can be accurately obtained by linearly fitting the shifted phase of the interferogram. The accuracy of the method is verified via a theoretical simulation, resulting in an error as low as 1.25%. Actual data are used to verify the proposed method. The verification results show that the method can achieve better detection and correction.

Key words remote sensing; hyperspectrum; Fourier spectrometer; fringe count error; phase

OCIS codes 010.0280; 120.0280

1 引 言

红外高光谱大气遥感能够获取温湿度以及臭氧、温室气体等多种大气成分, 在大气温湿度廓线反

演、数值天气预报同化、气候变化研究及大气痕量气体探测等应用方面具有显著优势。红外傅里叶变换光谱仪采用的是干涉分光技术^[1], 无需狭缝(与光栅分光技术相比), 大大增加了系统的光通量, 从而可

收稿日期: 2020-04-20; 修回日期: 2020-05-07; 录用日期: 2020-05-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500704, 2018YFB0504700)、民用航天预研项目(D040102)

* E-mail: frank@aiofm.ac.cn

以实现更高的信噪比^[2]。结合大光程差的仪器和高频率的采样技术,能够获取具有高光谱分辨率和宽光谱覆盖范围的对地观测光谱,已成为世界各国在大气探测方面重点发展的方向。

在红外干涉光谱仪的数字采样电路中,通常采用高稳定的激光波长控制干涉条纹的采样计数,实现对目标干涉图的等光程差分时采样。在一条完整干涉数据的采样过程中,空间环境的电磁干扰以及平台、仪器的自身振动,可能会导致激光干涉图中条纹的采样计数发生错误,即某一光程差采样数据或连续光程差采样数据丢失。若出现采样数据丢失,该采样点之后的干涉图相对之前的干涉图就会有一个固定的光程差偏移量,这种情形被称为条纹计数错误;此时若不对存在条纹计数错误的干涉数据进行检测和校正,就会导致最终的光谱数据失真。因此,干涉数据条纹计数错误(FCE)的检测和校正就是红外干涉光谱仪数据误差校正必不可少的环节。现有的FCE检测方法依靠获取零光程差点的位置来检测FCE,存在检测失效或检测错误的情况,检测和校正效果并不理想。

本文首先从红外干涉光谱仪采样原理出发,系统分析了FCE产生的原因及FCE的影响;之后针对星载光谱仪的不同工作模式,分别计算了各模式下的剩余相位,采用一次函数线性拟合相位获得了FCE的精确数值,完成了FCE的检测和校正;最后针对相关载荷开展理论仿真实验及实际数据的验证实验。

2 FCE影响的仿真

红外高光谱干涉仪中的分束器将目标光源发出的单色光或连续光分为透射光和反射光,这两束光分别经动镜和定镜反射后,在干涉仪的出射面上形成干涉条纹;探测器对干涉条纹进行采集,对采集到的干涉数据进行傅里叶变换就可以得到目标辐射的光谱分布^[3]。

探测器获取的干涉信号为模拟信号,需要对模拟信号进行采样来获取干涉图。干涉数据采样在数学上的意义是用一个狄拉克 δ 梳状函数乘以干涉图^[4],即

$$I_s(x) = I(x) \cdot \text{III}(\delta - n\delta_s), \quad (1)$$

式中: δ_s 为采样间隔; $\text{III}(\delta) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (\delta - n)$ 表示一系列 δ 函数; $I(x)$ 为初始干涉图; n 为采样点数。

干涉数据采样使用的是等光程差间隔采样方法^[5]。等光程差间隔采样利用与主干涉光路共用分束片、动镜及定镜的参考激光,将产生参考激光干涉信号的过零点作为主干涉仪的采样触发信号,此时,采样间隔为参考激光波长^[6]。

产生FCE的原因有两个:一,在动镜转向时,平台或仪器自身的振动导致部分干涉数据发生漏采样;二,宇宙高能射线引发了计数系统的异常尖峰,导致计量系统错误计数。无论是哪一种原因,产生的FCE现象都会使当前的干涉图采样发生偏移,导致后续采集的干涉图与之前采集的干涉图的同一光程差会有不同的采样位置^[7-8]。

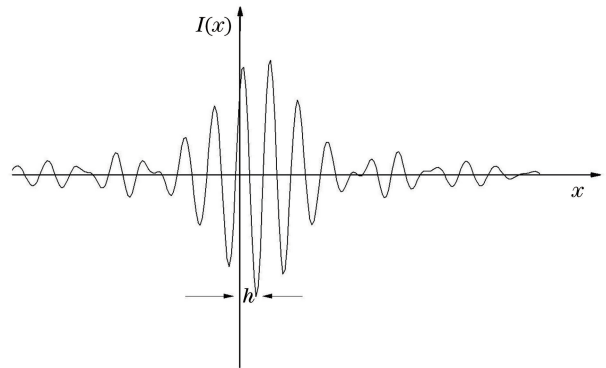


图1 发生FCE时的干涉图示意图

Fig. 1 Interferogram diagram when FCE occurs

如图1所示,当发生条纹计数丢失时,假设丢失一个点,则该采样点无数据,动镜继续移动,实际上采集的是该点之后的数据,干涉图剩余部分相对于该点存在一个光程差的采样间隔误差,干涉图整体向后偏移,即

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} I(x-h) \exp(-i2\pi\sigma x) dx = \\ & \int_{-\infty}^{\infty} I(x-h) \exp[-i2\pi\sigma(x-h)] \cdot \\ & \exp(-i2\pi\sigma h) d(x-h) = S(\sigma) \exp(-i2\pi\sigma h), \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $I(x-h)$ 为出现 h 点FCE的干涉图; h 为FCE出现的点数,即干涉图的偏移点数; $S(\sigma)$ 为初始复原光谱; σ 为波数。

从(2)式可以看出,存在FCE时,频域会产生相位偏移。当FCE发生在干涉图的不同位置时,相位的变化趋势会不同。

根据表1所示参数,对FCE误差干涉数据进行仿真,图2~4分别展示了当FCE位于不同位置时的相位、光谱、相位差和光谱偏差。

表 1 FCE 误差仿真参数

Table 1 FCE error simulation parameters

Parameter	Value
Spectral range / cm^{-1}	648 to 1136
Spectral resolution / cm^{-1}	0.625
Sampling point	19456
Lost point	1
Lost position	left edge, center, right edge

采样点丢失可以分为三种情况:FCE 发生在干涉图左侧边缘、中部、右侧边缘。从上面的公式可知:当 FCE 发生在左侧边缘及中部时,相当于干涉图大部分向左偏移,干涉图整体变化较大,所以对光谱及其相位有较大影响;当 FCE 发生在干涉图右侧

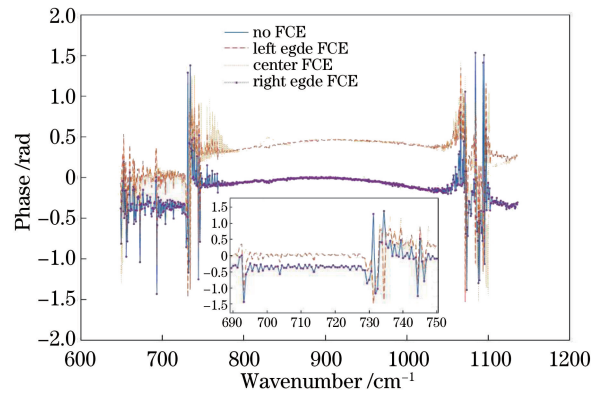


图 2 不同位置发生 FCE 对相位的影响

Fig. 2 Effect of FCE at different positions on phase
边缘位置时,相当于干涉图右侧边缘部分向左偏移,对光谱和相位的影响较小。

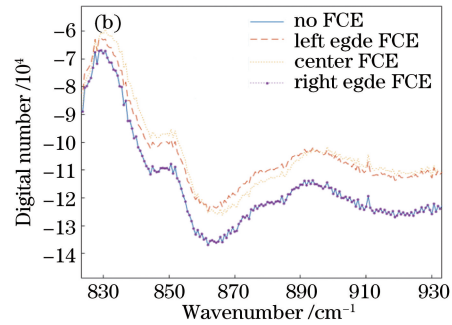
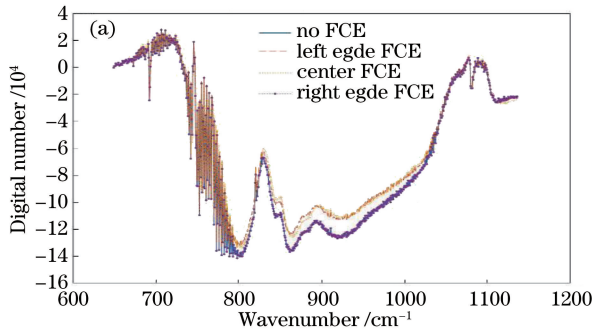


图 3 不同位置发生 FCE 对光谱的影响。(a)全貌;(b)局部放大

Fig. 3 Effect of FCE at different positions on spectrum. (a) Overall view; (b) partial enlargement

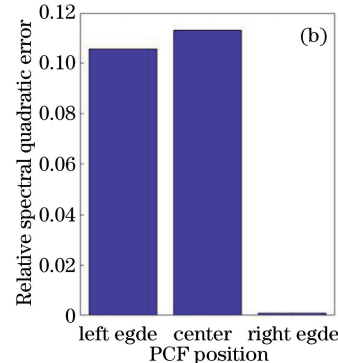
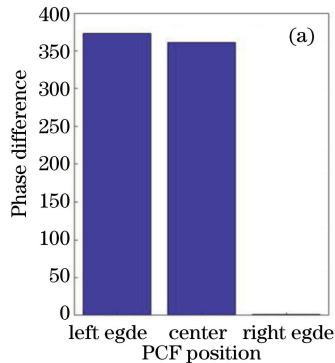


图 4 不同位置发生 FCE 对相位差和光谱偏差的影响。(a)对相位差的影响;(b)对光谱偏差的影响

Fig. 4 Effects of FCE at different positions on phase difference and spectral deviation. (a) Effect on phase difference;
(b) effect on spectral deviation

图 4 所示的仿真结果也表明了实际与理论推导一致:当 FCE 发生在干涉图的非右侧边缘位置时,光谱严重失真,相位差以及光谱偏差较大,需要对干涉图进行 FCE 校正,从而获得准确的测量光谱。

3 星载干涉数据 FCE 检测及校正

现有的 FCE 检测方法直接用零光程差点偏移

的位置来判断是否出现了 FCE,偏移点数与 FCE 出现的次数相同。一般情况下,当场景包含某种连续背景时,零光程差点的位置可以很容易地确定。当场景光谱与黑体分布明显不同时,例如只包含几条特征谱线,就可能导致干涉图零光程差点的定位不准确,无法作为 FCE 的判断依据。

由(2)式可知干涉图的 h 点偏移导致光谱域产

生了线性相位^[9],即

$$I(x-h) \leftrightarrow S(\sigma) \exp(-2\pi i h \sigma). \quad (3)$$

根据(3)式可得出光谱的相位偏移与干涉图采样偏移对应。因此,光谱相位偏移上的线性相关表现为干涉图上由 FCE 引起的光程差采样位移,所以可以从相位偏移中获取干涉图的采样误差偏移量。

实际上,计算得到的相位偏移不是绝对相位,而是相对于之前平均干涉图的偏移相位,因为光谱相位包括观测场景辐射相位、仪器自身辐射相位和可能存在的 FCE 相位。利用相位相对偏移可以排除仪器自身辐射相位的影响。使用相位提取函数 $\bar{R}(\nu)$,采用 $\varphi_h = -2\pi h \lambda_s$ 计算线性相位函数,如图 5 所示,其中 φ_h 为线性相位, λ_s 为参考激光波长。

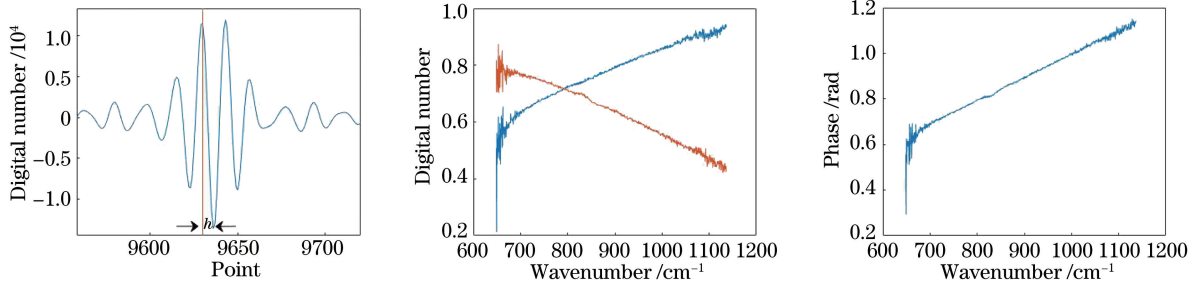


图 5 FCE 检测示意图。(a)出现 FCE 的干涉数据;(b)相位提取函数;(c)相位提取函数的相位
Fig. 5 Schematics of FCE detection. (a)Interference data with FCE; (b) phase extraction function;
(c) phase of phase extraction function

目前,典型的星载干涉仪包含三种工作模式:深空、黑体以及地球场景。深空、黑体工作模式下获取的是标准黑体的辐射数据以及仪器自身的辐射数据,用这些数据可以完成对地球光谱的辐射定标。

不同工作场景下仪器观测数据包含的辐射源不同,需要分开进行处理。

在本文实验条件下,深空干涉图的相位提取函数可以表示为

$$\bar{R}(\nu) = \frac{\tilde{S}_c(\nu)}{\langle \tilde{S}_c \rangle(\nu)} = \frac{\exp(i\varphi_h) [A_c \exp(i\varphi_{ext}) + A_{in} \exp(i\varphi_{in})]}{A_c \exp(i\varphi_{ext}) + A_{in} \exp(i\varphi_{in})} = \frac{\exp(i\varphi_h) [0 + A_{in} \exp(i\varphi_{in})]}{0 + A_{in} \exp(i\varphi_{in})} = \exp(i\varphi_h), \quad (4)$$

式中: $\tilde{S}_c(\nu)$ 为深空光谱; $\langle \tilde{S}_c \rangle(\nu)$ 为之前观测的深空光谱的平均值; $\exp(i\varphi_h)$ 为与 FCE 相关的线性相位; $A_c \exp(i\varphi_{ext})$ 为入射深空场景的复数光谱; $A_{in} \exp(i\varphi_{in})$ 为仪器自身辐射的复数光谱。与仪器辐射相比,深空场景辐射可以忽略。

星载黑体干涉图的相位提取函数可以表示为

$$\bar{R}(\nu) = \frac{\tilde{S}_H(\nu)}{\langle \tilde{S}_H \rangle(\nu)} = \frac{\exp(i\varphi_h) [A_H \exp(i\varphi_{ext}) + A_{in} \exp(i\varphi_{in})]}{A_H \exp(i\varphi_{ext}) + A_{in} \exp(i\varphi_{in})} = \exp(i\varphi_h). \quad (5)$$

式中: $\tilde{S}_H(\nu)$ 为星载黑体光谱; $\langle \tilde{S}_H \rangle(\nu)$ 为之前观测的星载黑体光谱的平均值; $A_H \exp(i\varphi_{ext})$ 为入射黑体的复数光谱。

地球场景辐射的连续变化使得地球场景的相位提取函数与(4)、(5)式不同。地球场景的相位提取函数使用深空场景和星载黑体的均值来计算,即

$$\bar{P}(\nu) = \frac{\tilde{S}_s}{\langle \tilde{S}_H \rangle - \langle \tilde{S}_c \rangle} = \frac{\exp(i\varphi_h) [A_s \exp(i\varphi_{ext}) + A_{in} \exp(i\varphi_{in})]}{[A_H \exp(i\varphi_{ext}) + A_{in} \exp(i\varphi_{in})] - [A_c \exp(i\varphi_{ext}) + A_{in} \exp(i\varphi_{in})]} = \exp(i\varphi_h) \left\{ \frac{A_s}{A_H - A_c} + \frac{A_{in}}{A_H - A_c} \exp [i(\varphi_{in} - \varphi_{ext})] \right\}, \quad (6)$$

$$\bar{Q}(\nu) = \frac{\langle \tilde{S}_c \rangle}{\langle \tilde{S}_H \rangle - \langle \tilde{S}_c \rangle} = \frac{A_{in}}{A_H - A_c} \exp [i(\varphi_{ext} - \varphi_{in})]. \quad (7)$$

计算出 $\bar{P}(\nu)$ 、 $\bar{Q}(\nu)$ 之后,就可以获得地球场景的相位提取函数,即

$$\bar{R}(\sigma) = \frac{\bar{P}(\sigma)}{\sqrt{|\bar{P}(\sigma)|^2 - \text{Im}\{\bar{P}(\sigma)\}^2 + i\text{Im}\{\bar{Q}(\sigma)\}^2}} = \exp(i\varphi_h). \quad (8)$$

根据不同场景下相位提取函数的结果,利用(9)式计算波数的相位漂移函数。

$$\varphi(\sigma) = \text{Unwrap}_{2\pi} \{ \arctan \{ \text{Im} [\bar{R}(\sigma)] / \text{Re} [\bar{R}(\sigma)] \} \} \quad (9)$$

FCE 主要影响 $\bar{R}(\sigma)$ 的虚部,具体表现为相位作为波数的函数线性变化。

建立波数与相位偏移之间的线性关系为

$$\varphi_0, \delta\varphi = \text{LinearFit}\{\varphi(v), v\}, \quad (10)$$

式中: φ_0 为拟合的截距; $\delta\varphi$ 为线性相位函数的斜率; $\varphi(v)$ 为偏移相位; v 为波数。

线性拟合的有效性可以用拟合直线与原始数据的标准差进行评价,即

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{p=0}^{N-1} [\varphi(\sigma_p) - (\delta\varphi \cdot \sigma_p + \varphi_0)]^2, \quad (11)$$

式中: s 为标准差; N 为拟合点数; $\varphi(\sigma_p)$ 为 σ_p 波数下的实际相位; σ_p 为某一波数。

由(11)式给出的线性相位函数的斜率,计算干涉图的漂移点数 h ,即

$$h = \frac{\delta\varphi}{2\pi\lambda_s} = \frac{\delta\varphi}{2\pi\delta_s}, \quad (12)$$

式中: δ_s 为参考激光的采样波长。

由于仪器噪声、计算误差等因素的影响,(12)式计算出的 h 可能不是整数,此时可以根据 FCE 产生的原理使用截断函数将计算出的干涉图采样漂移点数进行向下取整,即

$$h = \text{floor}\left(\frac{\delta\varphi}{2\pi\delta_s} + \frac{1}{2}\right). \quad (13)$$

本文采用以上流程对干涉数据的 FCE 进行检测,若 $h=0$,表明干涉数据中不存在 FCE;若 h 过大,超过设定的阈值,则认为该干涉数据无效,应丢弃该数据。

直接将存在 FCE 的干涉数据偏移相应的 h 点即可完成 FCE 的校正。校正之后的干涉图再次进行线性拟合,计算标准差和漂移点数;若这两者均超过阈值,则说明校正无效,该干涉数据无效。

4 FCE 检测及校正实验

风云三号 D 星搭载的红外高光谱大气干涉仪(HIRAS)使用多探元小面阵对地并行扫描。光谱仪的一次扫描包括 2 次冷空间定标探测、29 次对地探测和 2 次黑体定标源探测^[10],即一次完整的扫描干涉数据包括深空、黑体和地球场景观测数据。仪器参数如表 2 所示。

表 2 仪器相关参数

Table 2 Instrument related parameters

Parameter	Technical indicator
Scan cycle /s	10
Residence steps	40
Effective residence steps	33
Scan times	30
Wave band	Longwave, midwave, shortwave

在实际检测时,选用长波波段的数据进行 FCE 检测验证。

深空和黑体干涉数据的 FCE 检测需要之前对应的平均值。对干涉数据添加 FCE,当 FCE 发生在干涉图边缘位置时,其相位与之前相位的均值如图 6 所示。当出现 FCE 时,傅里叶变换后的光谱虚部较大,因此相位变化较大。线性拟合函数能够较好地拟合相位提取函数,且线性拟合函数的斜率不为 0,表明存在 FCE 现象;计算出拟合函数的斜率,即可得到偏移点数。

根据存在 FCE 的干涉图检测出的点数,直接将干涉图循环移位相应的点数,即可完成校正。当 FCE 出现在干涉图边缘位置时,校正效果最好;当 FCE 出现在干涉图中心位置时,理论上校正效果最差;当 FCE 发生在右侧边缘位置时,受影响的点数较少,因此对光谱和相位的影响也较小,无需校正。因为 FCE 可能随机出现,所以需要对校正过的干涉图再次进行检测,若检测出的点数不为 0,则说明 FCE 发生在干涉图的中心部位,此时对干涉图进行移位已无法完成对干涉图的校正,所以丢弃该干涉数据。

将 FCE 添加在干涉图的不同位置,相应的结果如表 3 所示。可以看出,对于黑体或者深空数据,当 FCE 出现在左侧边缘及干涉图中部时,算法都能较好地检测出来,检测点数的误差最低可达到 1.25%,平均达到 3%左右。

对检测出的干涉数据偏移相应的点数后计算相位偏移,计算结果与校正前的相位偏移相比误差大幅度减小,说明正确地完成了 FCE 的校正。

地球场景干涉数据的 FCE 检测无需之前数据的均值,并且因为场景变化的原因,地球场景的光谱会不断变化,各个频率的响应会不断变化,相应的光谱相位也会发生改变。

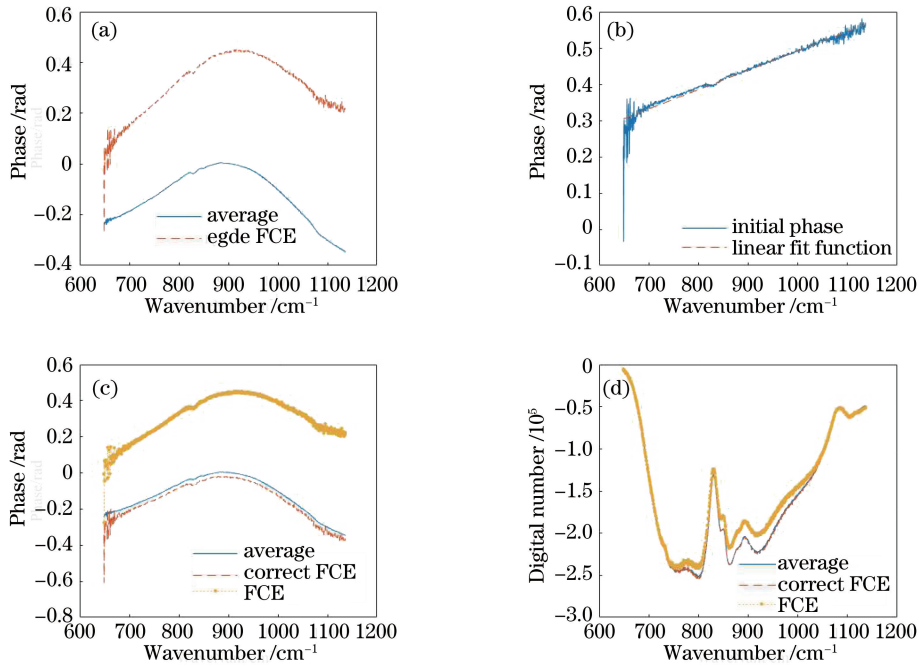


图 6 FCE 校正结果。(a)出现 FCE 的干涉图的光谱相位;(b)线性拟合相位提取函数;
(c) FCE 校正后的相位对比图;(d) FCE 校正后的光谱对比图

Fig. 6 FCE calibration results. (a)Spectral phase of the interferogram with FCE; (b) linearly fits the phase extraction function; (c)phase contrast chart after FCE correction; (d) spectrum contrast chart after FCE correction

表 3 不同 FCE 条件下算法检测和校正的效果

Table 3 Algorithm detection and correction under different FCE conditions

FCE appear position		Calculated offset points	Fitted variance	Phase difference before correction	Phase difference after correction
Left	One point lost	1.0319	0.2352	339.2286	21.1
	Three points lost	3.0375	0.2305	1045.2	35.2764
	Five points lost	5.1713	0.2348	693.9244	28.8488
Center	One point lost	0.9362	8.0109	339.2195	21.0571
	Three points lost	3.0353	0.1853	1045.3	35.2145
	Five points lost	5.1674	0.1694	694.767	28.7564

对于地球场景干涉数据,由于吸收峰的存在,相位函数的线性拟合存在较大误差,采用光谱数据中较为平缓的数据段可以缓解该问题。对于长波波段

来说,线性提取函数在 800~1000 cm⁻¹ 波段较为平缓,此外该波段的信噪比也较为优异。

如图7所示,地球场景干涉图的FCE检测和校

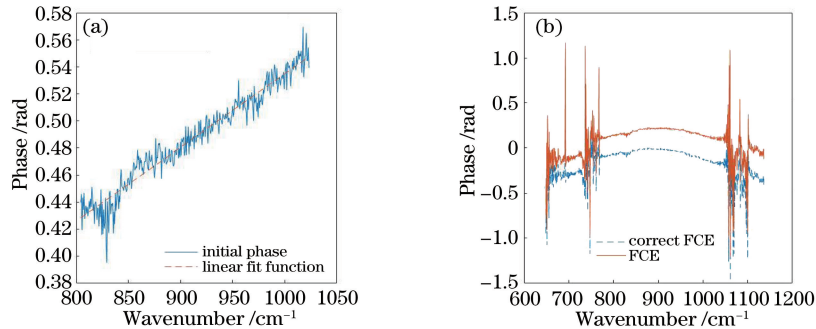


图 7 地球场景下 FCE 的校正结果。(a)地球场景下相位提取函数的线性拟合;(b)校正前后的相位对比

Fig. 7 FCE correction in earth scene. (a)Phase extraction function linear fitting in earth scene;

(b) phase comparison before and after correction

正流程与黑体、深空的检测校正流程一致,能够检测出 FCE 的点数并完成校正。同样,对于校正的干涉图也需要再次进行检测,若点数不为 0,则舍弃该数据。

此外,本文对实际的载荷数据也进行了检测,结果如图 8 所示。可以看到,在 29 次对地场景观测中,出现了两次 FCE,点数都为 1,剩下的干涉数据检测出的 FCE 值极小,说明不存在明显的 FCE,与实际数据出现 FCE 的情况一致。

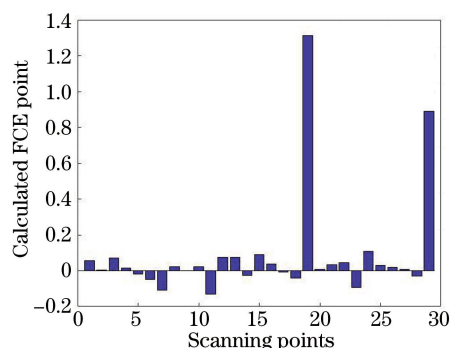


图 8 实际载荷数据的检测结果

Fig. 8 Test results of actual data

5 结 论

近些年来,红外技术得到了迅速发展,在星载遥感探测方面具有广阔的前景。传统的 FCE 检测依赖于零光程差点的位置,而零光程差点位置的变化不仅受 FCE 的影响,还受多种因素的影响^[11],从而导致检测精度低、校正效果差。

本文首先深入分析了 FCE 产生的原因及其对干涉图、光谱的影响;然后根据采样条纹技术误差直接导致的干涉图数据偏移与光谱数据相位偏移之间的对应关系,使用相位提取函数进行线性拟合,分别获取了三种场景下的偏移点数,误差最低可至 1.25%,从而完成了对 FCE 的检测和校正;最后利用实际数据对算法进行验证,结果表明,该算法较为理想。

参 考 文 献

- [1] Dong C H, Li J, Zhang P, et al. Principles and applications of satellite hyperspectral infrared atmospheric remote sensing [M]. Beijing: Science Press, 2013.
董超华, 李俊, 张鹏, 等. 卫星高光谱红外大气遥感原理和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [2] Zhou F. Inversion and accuracy verification of spectral calibration parameters for spaceborne infrared hyperspectral instrument [D]. Beijing:

- Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2019.
周方. 星载红外高光谱仪器光谱定标参数反演与精度验证研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.
- [3] Zhang C M. Interference imaging spectroscopy [M]. Beijing: Science Press, 2010.
张淳民. 干涉成像光谱技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] Oppenheim A V, Willsky A S. Signals and systems [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997.
- [5] Zou Y P. Research of on-board data processing techniques for Fourier transform spectrometer [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
邹曜璞. 星载傅里叶光谱仪星上数据处理研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016.
- [6] Li Y, Li S, Gao M G, et al. Comparative study on two infrared interferogram acquisition and spectrum recovery methods [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35 (9): 0930005.
李妍, 李胜, 高闽光, 等. 两种红外干涉图采集及光谱复原方法的对比研究 [J]. 光学学报, 2015, 35 (9): 0930005.
- [7] Northrop Grumman Space & Mission Systems Corporation. Cross track infrared sounder (CrIS) sensor data [Z/OL]. [2020-04-20]. http://ftp.emc.ncep.noaa.gov/jcsda/CRTM/instrumentinfo/CrIS_SDR_ATBD.Pdf.
- [8] JPSS Configuration Management Office. Joint polar satellite system (JPSS) operational algorithm description (OAD) document for cross-track infrared sounder (CrIS) sensor data record (SDR) software [Z/OL]. [2020-04-20]. http://npp.gsfc.nasa.gov/science/sciencedocuments/122012/474-00071_OAD-CrIS-SDR_B.pdf.
- [9] Han Y, Revercomb H, Cromp M, et al. Suomi NPP CrIS measurements, sensor data record algorithm, calibration and validation activities, and record data quality [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(22): 12734-12748.
- [10] Yang T H, Hu X Q, Xu H L, et al. Radiation calibration accuracy assessment of FY-3D hyperspectral infrared atmospheric sounder based on inter-comparison [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (11): 1130003.
杨天杭, 胡秀清, 徐寒列, 等. 基于交叉比对的风云三号 D 星红外高光谱大气探测仪辐射定标性能评估 [J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1130003.
- [11] Feng X, Guo Q, Han C P, et al. Correction method of zero path difference position [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(6): 795-799.
冯绚, 郭强, 韩昌佩, 等. 干涉图零光程差位置的确定方法 [J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(6): 795-799.