

星载傅里叶变换红外光谱仪的脉冲噪声抑制方法

郭玲玲*, 赵其昌, 杨勇, 汪少林, 舒锐

上海卫星工程研究所, 上海 201109

摘要 在分析星载傅里叶变换红外光谱仪干涉图的噪声特性后, 提出一种抑制脉冲噪声的方法。计算以干涉图的采样点、相对零光程差得到的对称点、两侧采样点后, 对得到的插值点建立参照值, 通过与阈值比较确定脉冲噪声位置。实验表明, 所提方法可以将光谱相对偏差由 0.24% 抑制到 0.17%, 将噪声等效辐亮度差由 $0.069 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$ 抑制到 $0.056 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$ 。所提方法在抑制脉冲噪声的同时保留了有效光谱信息, 提高了星载傅里叶变换红外光谱仪的探测灵敏度。

关键词 光谱学; 傅里叶变换; 红外; 光谱仪; 脉冲噪声; 噪声等效辐亮度差

中图分类号 TP73

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0830003

Method for Suppression of Impulse Noise in Spaceborne Fourier Transform Infrared Spectrometer

Guo Lingling*, Zhao Qichang, Yang Yong, Wang Shaolin, Shu Rui

Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China

Abstract In this work, after analyzing the noise characteristics of interferograms from a spaceborne Fourier transform infrared spectrometer, a method for suppressing impulse noise is proposed. After calculating the symmetrical points and the sampling points on both sides of the interferogram obtained by the sampling points and the relative zero optical path difference, the reference values for the interpolation points obtained are established. The impulse noise position is then determined by comparing a threshold with this reference value. Experimental results show that the relative spectral deviation of the proposed method can be suppressed from 0.24% to 0.17%; furthermore, the noise equivalent radiance difference is suppressed from 0.069 to 0.056 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$. The proposed method can suppress the impulse noise while retaining the effective spectral information, thereby improving the detection sensitivity of the spaceborne Fourier transform infrared spectrometer.

Key words spectroscopy; Fourier transform; infrared; spectrometer; impulse noise; noise equivalent radiance difference

OCIS codes 300.6300; 300.6340; 300.6170

1 引言

星载傅里叶变换红外光谱仪在进行红外光谱探测时, 具有高光谱通量、多通道、易实现高光谱分辨率等特点。星载傅里叶变换红外光谱仪由于可以根据光谱信息、大气中不同高度的特定气体光谱吸收带与大气辐射的相互作用关系, 借助权重函数分布参数和辐射传输方程定量估算大气温、湿度的三维分布, 故而在数值天气预报、大气成分探测等领域都具有极大价值^[1-3]。典型的星载傅里叶变换红外光谱仪有 Suomi NPP、JPSS 上的垂轨红外探测仪 (CrIS)、MetOp 上的红外大气探测干涉仪

(IASI)^[4-6]等。目前国内风云系列气象卫星上配备有高光谱分辨率的傅里叶变换红外光谱仪, 如风云三号红外高光谱大气探测仪 (HIRAS)^[7]、风云四号大气垂直探测仪 (GIIRS)^[8-9], 核心部件为 Michelson 干涉仪, 利用动镜往复运动获得时间调制型干涉信号, 经过后光路系统将干涉信号聚集到红外探测器。红外探测器响应的信号在获取、放大、传输、存储及处理过程中, 由于探测器自身稳定性、在轨空间环境、电路耦合噪声等因素影响, 不可避免地会出现一些随机、离散的过大值或过小值, 这些值被称为脉冲噪声。

为了抑制脉冲噪声, 一方面要从噪声产生的源

收稿日期: 2019-09-25; 修回日期: 2020-01-01; 录用日期: 2020-01-06

基金项目: 上海市自然科学基金(18ZR1437200)

* E-mail: ustllg@foxmail.com

头出发,改善硬件质量,另一方面可以在后处理过程中加入脉冲噪声抑制算法。脉冲噪声在成像相机中也极为常见,后处理手段包括均值滤波、中值滤波、双边滤波、维纳滤波、小波去噪、基于导数平滑去噪的方法^[10-12]等。这些方法针对二维图像去噪,重点考虑去除噪点、保留图像中的边缘,不考虑去噪过程对图像频谱的改变,而对傅里叶变换红外光谱仪,光谱图才是地面应用系统希望获得的信息,若光谱形状受到影响,将影响其辐射定标精度和仪器的在轨高精度量化应用。干涉图中的脉冲噪声对光谱图的影响会分散在各个光谱通道,最终表现为仪器灵敏度受影响。CrIS采用了一种简单的脉冲抑制方法^[13],预先设置脉冲噪声掩模,通过对干涉图幅度与掩模的比较确定是否为脉冲噪声,并将该方法集成在仪器的星上处理中,在星上模拟量向数字量转换(AD)采样后进行脉冲噪声抑制。这种方法适用于脉冲噪声幅度较大的情形。

本文对星载傅里叶变换红外光谱仪的脉冲噪声进行统计分析,根据傅里叶变换红外光谱仪的特性,提出一种光谱保持的自适应脉冲噪声抑制方法,并基于发射前的测试数据,比较了各种工况下的噪声抑制效果。

2 星载傅里叶变换红外光谱仪的噪声特性分析

2.1 噪声来源及性质

探测器自身噪声、等间隔采样误差、电路噪声等

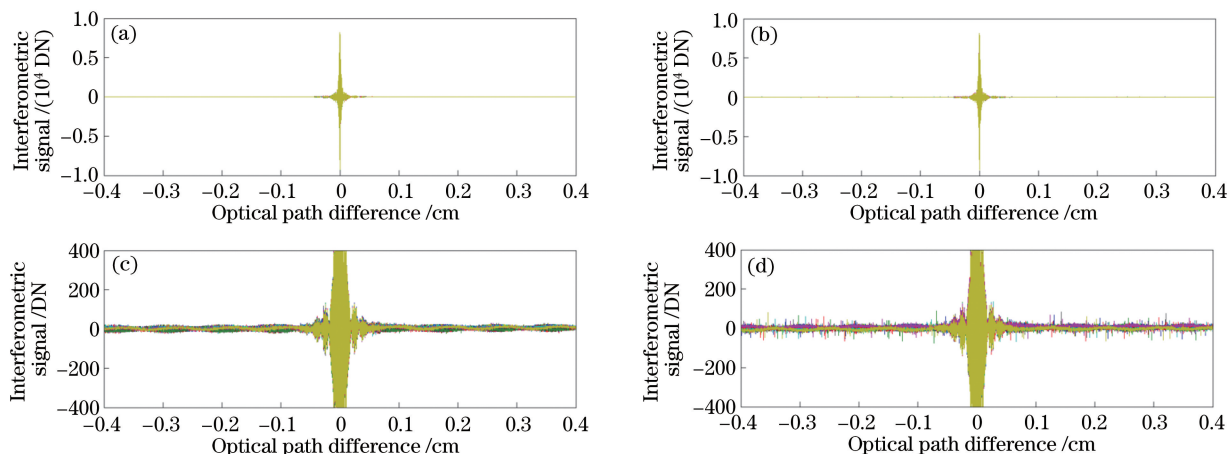


图1 含脉冲噪声的干涉图。(a)扫描转动部件驱动电路未使能时获取的干涉图;(b)扫描转动部件驱动电路使能时获取的干涉图;(c)对应图1(a)的纵向拉伸显示;(d)对应图1(b)的纵向拉伸显示

Fig. 1 Interferograms with impulse noise. (a) Interferogram recorded when the drive circuit of scanning motor is disabled; (b) interferogram recorded when the drive circuit of scanning motor is enabled; (c) stretched display corresponding to Fig. 1(a); (d) stretched display corresponding to Fig. 1(b)

均会影响星载傅里叶变换红外光谱仪的噪声水平。对地面测试中的数据分析发现,星载傅里叶变换红外光谱仪的干涉图数据还可能受到其扫描转动部件控制电路的耦合噪声干扰。图1为发射前地面测试中傅里叶变换红外光谱仪在同一工作状态下观测同一目标辐射时获取的原始干涉图,其中图1(c)、(d)分别为对图1(a)、(b)的纵向拉伸显示(每组显示20幅干涉图),数字量码值(DN)表示傅里叶变换红外光谱仪直接输出的干涉图信号的单位。傅里叶变换红外光谱仪采用共光路高稳频激光器产生干涉图等光程差采样脉冲,干涉图采样间隔等于激发波长,为852.3 nm。图1所示的仪器直接输出的干涉图中基本不包含干涉图直流量,这是由于在仪器硬件采样电路中采用了隔直设计。图1(a)与图1(b)的状态差异在于,图1(a)中扫描转动部件驱动电路未使能,而图1(b)中扫描转动部件驱动电路已使能。在扫描转动部件驱动电路使能情况下,驱动电路发出脉宽调制波(PWM),电机具有驱动力矩,可以控制带动负载(扫描镜)进行高精度的指向或转动;未使能情况下,驱动电路无PWM发出,电机无驱动力矩。由图1(d)可以明显看出脉冲噪声的存在。由于星载傅里叶变换红外光谱仪在轨工作时,扫描转动部件需要连续工作才能获取跨轨的大气辐射光谱信息,故而需要对产生的脉冲噪声进行抑制。

以同一工作状态下观测同一目标辐射时获取的多组(≥ 100)干涉图均值作为估计值,每一干涉图与其差值作为噪声,结果如图2所示。图1中干涉图

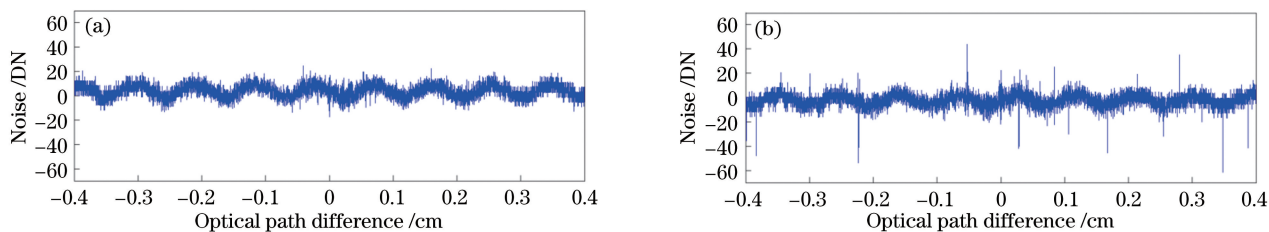


图 2 干涉图噪声。(a)扫描转动部件驱动电路未使能时;(b)扫描转动部件驱动电路使能时

Fig. 2 Noise of interferograms. (a) When the drive circuit of scanning motor is disabled;

(b) when the drive circuit of scanning motor is enabled

包含一个固定的低频噪声,与一般成像相机不同,傅里叶变换红外光谱仪一般在一个或多个波段(带通)工作,低频噪声经傅里叶变换后不影响带内信号,故而可以不作处理。若滤除了固定低频噪声,结果如图 3 所示。对滤除低频噪声后的噪声进行统计分析,结果分别如图 4、5 所示,图 4 为扫描转动部件驱动电路未使能时 10 组干涉图的噪声直方图,图 5 为扫描转动部件驱动电路使能时 10 组干涉图的噪声直方图。结合图 3 可以看出,在扫描转动部件驱动

电路未使能时,噪声主要为高斯噪声,每一采样点均受影响;在扫描转动部件驱动电路使能时,噪声可以看作是高斯噪声与脉冲噪声的叠加,其中脉冲噪声仅影响部分采样点。

对同一工作状态下观测同一目标辐射时获取的多组(≥ 100)干涉图进行傅里叶变换,并统计光谱数字量的标准差,结果如图 6 所示。可以明显看出,在存在脉冲噪声的情况下,光谱图标准差更大,表明脉冲噪声虽然仅存在于部分干涉图采样点中,但已经

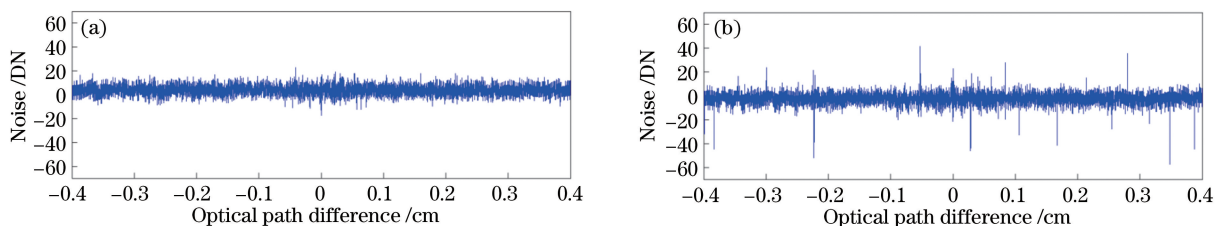


图 3 滤除固定低频噪声后的干涉图噪声。(a)扫描转动部件驱动电路未使能时;(b)扫描转动部件驱动电路使能时

Fig. 3 Noise of interferograms after the low-frequency fixed noise is filtered. (a) When the drive circuit of

scanning motor is disabled; (b) when the drive circuit of scanning motor is enabled

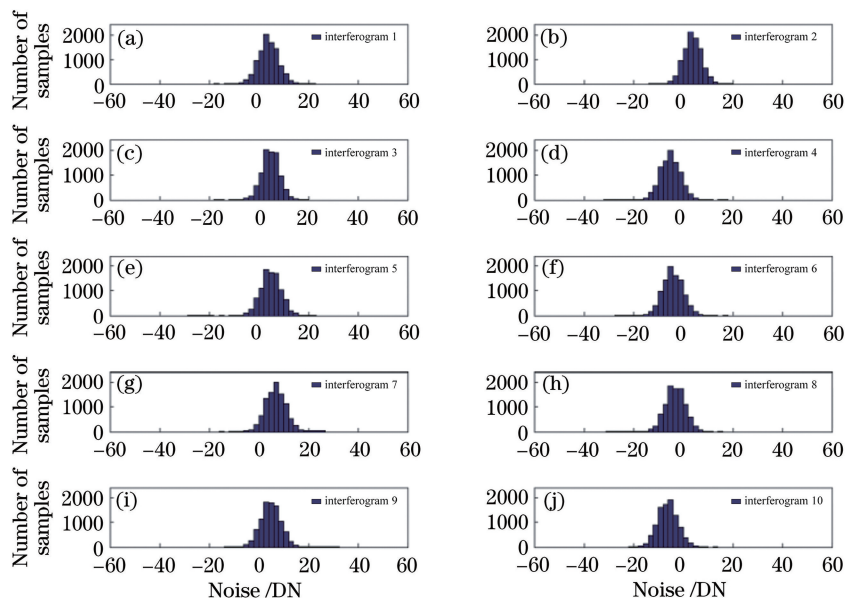


图 4 无脉冲噪声时的干涉图噪声直方图

Fig. 4 Noise histograms of interferograms without impulse noise

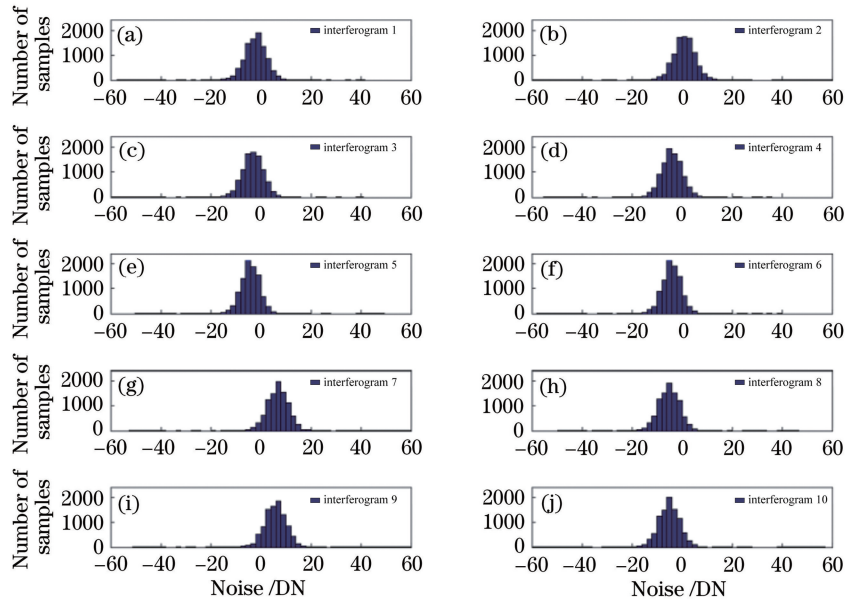


图 5 含脉冲噪声时的干涉图噪声直方图

Fig. 5 Noise histograms of interferograms with impulse noise

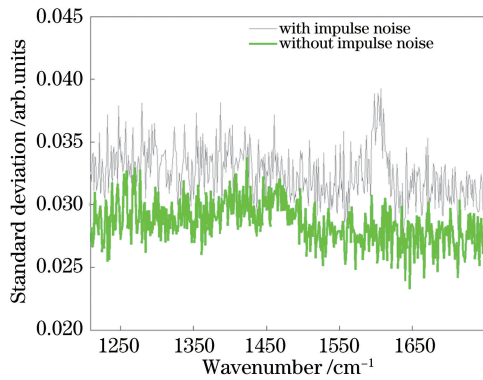


图 6 未标定光谱的标准差对比

Fig. 6 Comparison of standard deviation in uncalibrated spectra

影响了傅里叶变换红外光谱仪的探测灵敏度,因此抑制脉冲噪声是提升仪器灵敏度性能的必要措施。图 6 中光谱未经过辐射标定,故而标准差单位为光谱数字量,即任意单位。

2.2 问题分析及建模

通过 2.1 节的分析,可以将直接获取的包含噪声的干涉图 I_{noisy} 认为是由理想干涉图信号 I_{ideal} 与加性噪声构成,表达式为

$$I_{\text{noisy}}(x) = I_{\text{ideal}}(x) + I_{\text{fixed}}(x) + I_{\text{Gaussian}}(x) + I_{\text{impulse}}(x), \quad (1)$$

式中: x 为光程差,对获取双边干涉图的傅里叶变换红外光谱仪, x 变化范围为 $-x_{\text{MPD}} \sim x_{\text{MPD}}$, x_{MPD} 为最大光程差; I_{fixed} 为固定低频噪声; I_{Gaussian} 为高斯噪声; I_{impulse} 为脉冲噪声。傅里叶变换具有可加性,即(1)式对应的光谱满足

$$S_{\text{noisy}}(x) = S_{\text{ideal}}(x) + S_{\text{fixed}}(x) + S_{\text{Gaussian}}(x) + S_{\text{impulse}}(x), \quad (2)$$

式中: S_{noisy} 、 S_{ideal} 、 S_{fixed} 、 S_{Gaussian} 、 S_{impulse} 分别为对应分量的傅里叶变换。其中只有高斯噪声、脉冲噪声会影响傅里叶变换后的带内光谱,而固定低频噪声仅影响光谱带外分量。一幅干涉图中,高斯噪声存在于每个采样点中,脉冲噪声仅存在于部分采样点中,但干涉图中每个采样点都可能被脉冲噪声影响。固定低频噪声与高斯噪声对应的光谱强度如图 7 所示。

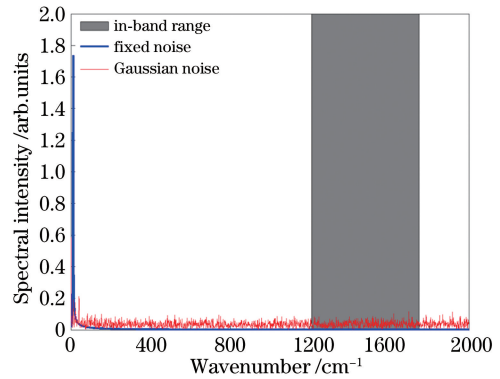


图 7 低频固定噪声与高斯噪声频谱
Fig. 7 Frequency spectra of low-frequency fixed noise and Gaussian noise

脉冲噪声形式为

$$I_{\text{impulse}}(x) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \delta(x - x_i), \quad (3)$$

式中: δ 为单位冲击函数; x_i 为第 i 个采样点对应的光程差; A_i 为第 i 个采样点的脉冲噪声幅度。脉冲

噪声仅分布在任意局部采样点中,而对于其他采样点, $A_i = 0$ 。脉冲噪声概率 R 为被脉冲噪声污染的采样点数除以干涉图总点数,即 $A_i \neq 0$ 的概率为

$$P(A_i \neq 0) = R. \quad (4)$$

3 脉冲噪声抑制方法

3.1 现有的脉冲噪声抑制方法

现有的针对相机图像的脉冲噪声抑制方法不适用于需要高精度定量化反演的傅里叶变换红外光谱仪中。针对星载傅里叶变换红外光谱仪,现有方法为 CrIS 采用的预设掩模法,通过比较干涉图采样值与预设值,对差异过大的点重置为 0,并将该干涉图标记为经校正过的干涉图。

3.2 自适应的脉冲噪声抑制方法

理想干涉图信号 I_{ideal} 满足对称性,即干涉图关于零光程差位置对称,

$$I_{\text{ideal}}(x) = I_{\text{ideal}}(-x). \quad (5)$$

根据 2.1 节分析可知,低频噪声、高斯噪声、脉冲噪声均会影响干涉图 I_{noisy} 的对称性。为有效利用该对称性,本文提出自适应脉冲噪声抑制方法。该方法包含如下步骤:去除低频噪声,得到低频噪声滤除后的干涉图 $I_{\text{filtered}}(x)$;寻找干涉图零光程差位置;将干涉图反向并按照原始采样位置进行重采样,获得 $I_{\text{mirror}}(x)$;对干涉图中采样点两侧位置的点进行样条插值,获得插值点 $I_{\text{interp}}(x)$;获取 $I_{\text{filtered}}(x)$ 、 $I_{\text{mirror}}(x)$ 、 $I_{\text{interp}}(x)$ 的中值 $I_{\text{median}}(x)$;将 $I_{\text{filtered}}(x)$ 、 $I_{\text{median}}(x)$ 的差值绝对值与阈值进行比较,确定是否对该点进行校正,若差值绝对值大于阈值,则将该点设置为 $I_{\text{median}}(x)$ 。与阈值比较的过程类似于 CrIS 采用的预设掩模法,差异在于,CrIS 由于考虑到在轨星上处理,故而掩模是预设的且不随目标辐射改变,而所提方法中 $I_{\text{median}}(x)$ 是根据输入干涉图自适应调整的。其中,低频噪声频率固定,故而可以通过干涉图两侧的弱干涉信号进行拟合,从而确定低频噪声的幅度和相位。

为了获取零光程差位置,依然基于理想干涉图的对称性,通过傅里叶变换的性质可知,对于偶对称的实数序列,其傅里叶变换为纯实函数,故而可以得到零光程差位置,即

$$x_{\text{ZPD}} = \operatorname{argmin}_{x'} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} F_{\text{imag}}[I_{\text{filtered}}(x - x')], \quad (6)$$

式中: $v_{\min} \sim v_{\max}$ 为傅里叶变换红外光谱仪的有效波数范围;函数 $F_{\text{imag}}[\cdot]$ 为对复数取虚部。

由于采样误差的存在, x_{ZPD} 可能对应的并非是整数采样位置,获得零光程差后,将干涉图序列反向,需要对反向后的干涉图进行重采样,从而对应到与正向干涉图统一的采样位置。由于 $I_{\text{filtered}}(x)$ 依然包含脉冲噪声,故而 $I_{\text{mirror}}(x)$ 同样包含脉冲噪声。

脉冲噪声随机影响部分采样点,故而在干涉图上可仅用两侧位置的采样值对某一采样点进行样条插值得到一个插值点 $I_{\text{interp}}(x)$ 。对于未被脉冲噪声影响的采样点, $I_{\text{filtered}}(x)$ 、 $I_{\text{mirror}}(x)$ 、 $I_{\text{interp}}(x)$ 三者的差异应在高斯噪声水平;而对于被脉冲噪声影响的位置, $I_{\text{filtered}}(x)$ 、 $I_{\text{mirror}}(x)$ 、 $I_{\text{interp}}(x)$ 中至多有一项与其他两项偏差较大,故而通过求取中值 $I_{\text{median}}(x)$ 即可得到一组参照值。对 $I_{\text{filtered}}(x)$ 和 $I_{\text{median}}(x)$ 比较,确定需要校正的采样点,而大部分采样点是未经过校正的,故而可以较好地保留原始干涉图的光谱幅度信息与相位信息,不造成失真。

对于脉冲噪声与高斯噪声同时存在的采样点,很难将其区分清楚。所提方法的目标是将幅值较大的脉冲噪声抑制到幅度较小的高斯噪声水平,可以通过发射前地面实验,对大量数据进行统计分析得到经验值,以地面实验过程中高斯噪声的 3σ (σ 为标准差)作为阈值实现。

4 实验与分析

为了验证所提方法的有效性,本章分别对仿真数据和实际测试数据进行处理,并将所提方法与现有脉冲噪声抑制方法进行对比。

4.1 仿真结果及讨论

固定低频噪声在星载傅里叶变换红外光谱仪中即使存在也不影响光谱带内信号,且可通过所提方法将其滤除,故而仿真中不对其进行考虑,仅模拟高斯噪声(均值为 0,标准差 σ)、脉冲噪声(噪声概率 R ,噪声幅度为 $0 \sim A_{\text{max}}$ 的均匀分布)叠加到理想干涉图(以一幅包含气体吸收谱的干涉图作为典型理想干涉图)的情况。

现有脉冲噪声抑制方法更倾向于星上实现的简便性,故而仅在脉冲噪声幅度较大时,将其与所提方法进行对比。仿真中设置脉冲噪声概率 $R = 0.01$,脉冲噪声最大幅度 $A_{\text{max}} = 200$ DN。设置掩模如图 8 所示,预设掩模与所提方法检测到的脉冲噪声位置如图 9 所示。

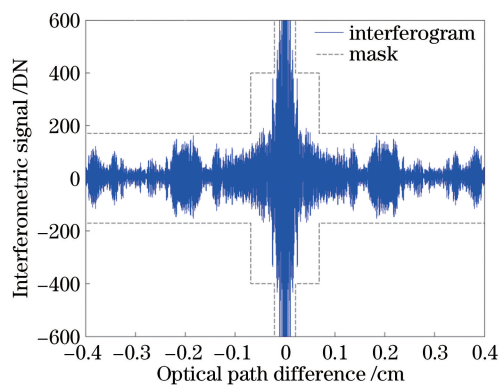


图 8 干涉图掩模设置

Fig. 8 Predefined mask of interferogram

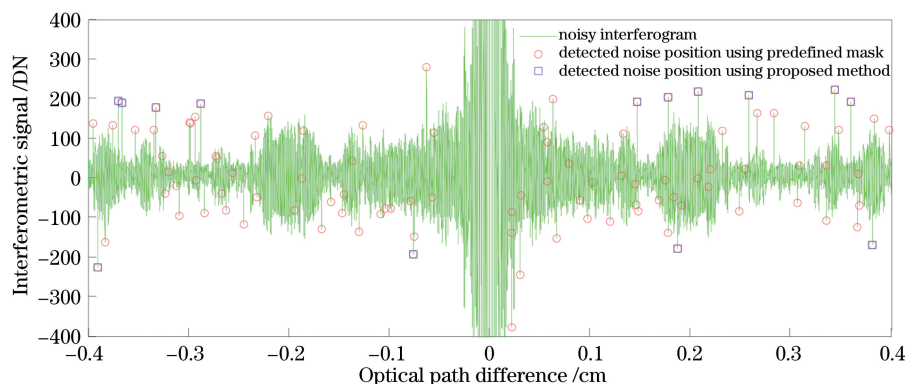


图 9 不同脉冲噪声抑制方法的结果

Fig. 9 Result of different impulse noise suppressing methods

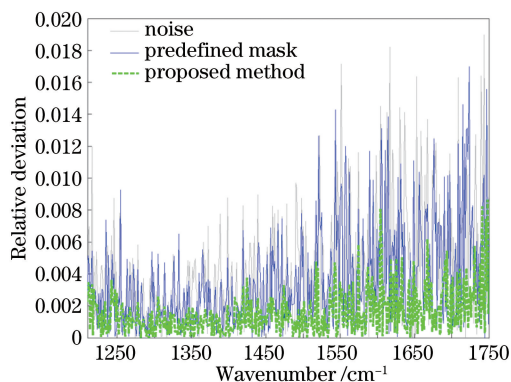


图 10 不同脉冲噪声抑制方法的光谱相对偏差

Fig. 10 Spectral relative deviation of different impulse noise suppressing methods

改变脉冲噪声最大幅度与概率分别进行仿真实验,图 11 为不同情况下的脉冲噪声抑制结果,可以看出,所提方法对不同幅度、不同概率下(不超过 10%)的脉冲噪声均能有效抑制。

统计不同情况下光谱有效谱段内的各个通道的相对偏差,如表 1 所示。脉冲噪声概率越大,光谱相对偏差越大;脉冲噪声幅度越大,光谱相对偏差越大。针对不同情况下的脉冲噪声,所提方法均可以

为了评价去噪效果,以光谱图中各个通道的相对偏差 $b(v)$ 进行评价,即

$$b(v) = \frac{|S_{\text{denoised}}(v) - S_{\text{ideal}}(v)|}{S_{\text{ideal}}(v)} \quad (7)$$

在仿真中,理想光谱 S_{ideal} 是已知的,在 $R = 0.01$,脉冲噪声最大幅度 $A_{\text{max}} = 200$ DN 的情况下,分别计算原始含噪信号光谱、采用预设掩模法进行噪声抑制后的光谱、采用所提方法进行噪声抑制后的光谱的各个通道相对偏差,结果如图 10 所示。由图 10 可知,用所提方法进行脉冲噪声抑制后的光谱更加接近真实光谱,但是由于高斯噪声的存在,进行脉冲噪声抑制后的光谱图与理想光谱图仍存在一定的偏差。

获得不同程度的改善,可以有效减小干涉图中的脉冲噪声对光谱造成的影响。比如在 $R = 0.01$, $A_{\text{max}} = 60$ 的情况下,所提方法可以将光谱相对偏差由 0.24% 抑制到 0.17%,由于所提方法未针对高斯噪声处理,故而进行脉冲噪声抑制后的光谱图与理想光谱图仍存在一定的偏差。

表 1 脉冲噪声抑制后光谱的相对偏差对比

Table 1 Comparison of relative deviation after impulse noise suppression

| A_{max} | R | Relative deviation | Relative deviation |
|------------------|------|----------------------------|-------------------------------|
| | | of noisy interferogram / % | of denoised interferogram / % |
| 200 | 0.01 | 0.43 | 0.15 |
| 30 | 0.01 | 0.18 | 0.14 |
| 60 | 0.01 | 0.24 | 0.17 |
| 60 | 0.05 | 0.43 | 0.17 |
| 60 | 0.10 | 0.57 | 0.19 |

4.2 实际测试数据去噪处理

对星载傅里叶变换红外光谱仪实测干涉图进行脉冲噪声抑制后,结果如图 12 所示。

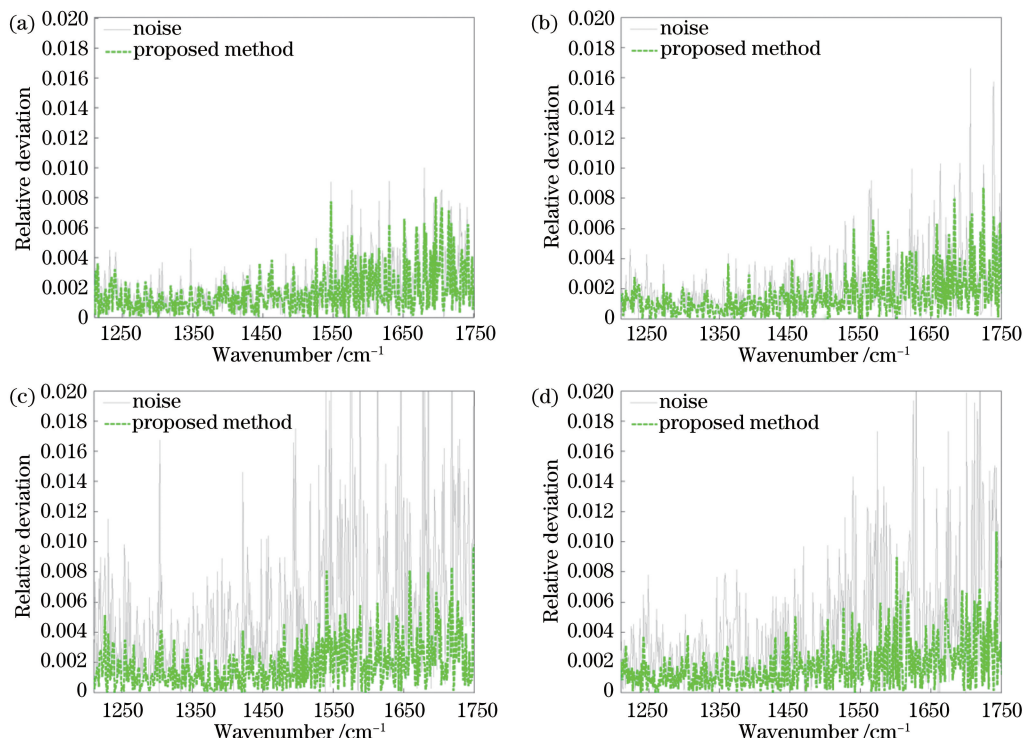


图 11 脉冲噪声抑制结果。(a) $A_{\max}=30, R=0.01$; (b) $A_{\max}=60, R=0.01$; (c) $A_{\max}=60, R=0.1$; (d) $A_{\max}=60, R=0.05$
 Fig. 11 Results of impulse noise suppression. (a) $A_{\max}=30, R=0.01$; (b) $A_{\max}=60, R=0.01$; (c) $A_{max}=60, R=0.1$;
 (d) $A_{\max}=60, R=0.05$

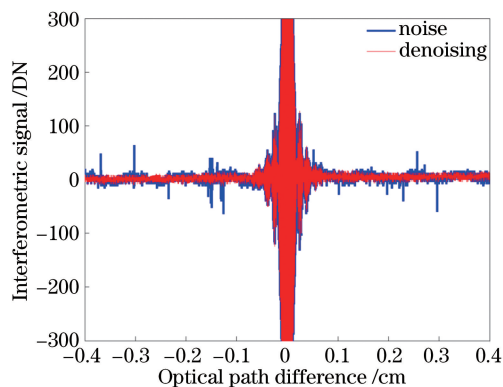


图 12 脉冲噪声抑制前后的干涉图对比
 Fig. 12 Interferogram comparison before and after impulse noise suppression

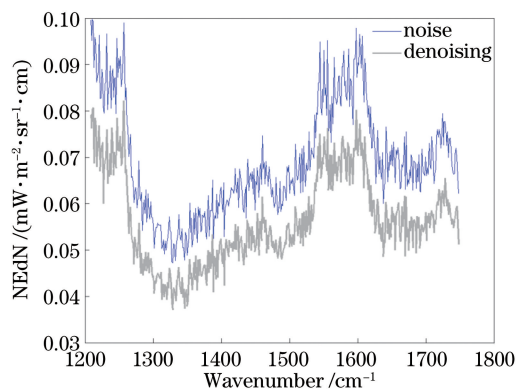


图 13 脉冲噪声抑制前后的 NEdN 对比
 Fig. 13 NEdN comparison before and after impulse noise suppression

由于星载傅里叶变换红外光谱仪更加注重光谱,而非干涉图的直观效果,为了进一步说明所提方法效果,结合星载傅里叶变换红外光谱仪发射前地面辐射定标系数,对噪声等效辐亮度差(NEdN)进行计算,结果如图 13 所示。对于各光谱通道,采用所提方法进行脉冲噪声抑制后的 NEdN 均优于原始未进行处理的方法,脉冲噪声抑制前在有效谱段范围内 NEdN 平均为 $0.069 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$,抑制后 NEdN 平均为 $0.056 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$ 。

5 结 论

通过分析星载傅里叶变换红外光谱仪的噪声特性,提出一种自适应的脉冲噪声抑制方法。基于干涉图的对称性,利用干涉图上采样点与插值点、对称点的比较,获取参照值。实验结果表明,所提方法能有效处理不同幅度、不同概率下(不超过 10%)的脉冲噪声,在抑制脉冲噪声的同时保留了有效光谱信息,提高了星载傅里叶变换红外光谱仪的探测灵敏度。

参 考 文 献

- [1] Collard A D, McNally A P. The assimilation of infrared atmospheric sounding interferometer radiances at ECMWF [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2009, 135 (641): 1044-1058.
- [2] Yu M J, Liu M H, Dong Z R, et al. Study on measuring concentration of ammonia and sulphur dioxide by differential optical absorption spectrometry based on fast Fourier transform [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0915001.
郁敏捷, 刘铭晖, 董作人, 等. 基于傅里叶变换的差分吸收光谱法测量 NH_3 和 SO_2 浓度的实验研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0915001.
- [3] Ma P F, Chen L F, Tao J H, et al. Simulation of atmospheric temperature and moisture profiles retrieval from CrIS observations [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(7): 1894-1897.
马鹏飞, 陈良富, 陶金花, 等. 利用红外高光谱资料 CrIS 反演大气温湿廓线的模拟研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1894-1897.
- [4] Grieco G, Masiello G, Matricardi M, et al. Partially scanned interferogram methodology applied to IASI for the retrieval of CO , CO_2 , CH_4 and N_2O [J]. Optics Express, 2013, 21(21): 24753-24769.
- [5] Hilton F, Armante R, August T, et al. Hyperspectral earth observation from IASI: five years of accomplishments [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(3): 347-370.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Feng X, Han C P, Zou Y P, et al. On-orbit spectral calibration algorithm of infrared Fourier transform spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0630002.
冯绚, 韩昌佩, 邹曜璞, 等. 红外傅里叶光谱仪在轨光谱定标算法研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0630002.
- [9] Chen R, Gao C, Wu X W, et al. Application of FY-4 atmospheric vertical sounder in weather forecast [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38 (3): 285-289.
陈仁, 高聪, 吴晓唯, 等. 风云四号大气垂直探测仪在气象预报中应用 [J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(3): 285-289.
- [10] Awad A. Denoising images corrupted with impulse, Gaussian, or a mixture of impulse and Gaussian noise [J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2019, 22(3): 746-753.
- [11] Wu J, Tang C. PDE-based random-valued impulse noise removal based on new class of controlling functions [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(9): 2428-2438.
- [12] Awad A S. Standard deviation for obtaining the optimal direction in the removal of impulse noise [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(7): 407-410.
- [13] Baker N. Joint polar satellite system (JPSS) cross track infrared sounder (CrIS) sensor data records (SDR) algorithm theoretical basis document (ATBD) [M/OL]. Greenbelt, Maryland: NASA, 2014 [2019-09-25]. http://as1.umbc.edu/pub/reports/external/474-00032_CrIS-SDR-ATBD_Rev-.pdf.