

# 一种干涉数据毛刺的检测校正方法

刘加庆<sup>1,2\*</sup>, 韩顺利<sup>1,2</sup>, 孟鑫<sup>1,2</sup>, 李志增<sup>1</sup>, 鞠军委<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中电科仪器仪表有限公司, 山东 青岛 266555;

<sup>2</sup>中国电子科技集团公司第四十一研究所电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555

**摘要** 针对毛刺的实时检测校正需求,提出一种基于滤波和预定义阈值检测的干涉数据毛刺实时检测校正方法,并给出了基于现场可编程门阵列的硬件实现。在使用较少硬件资源的情况下,所提方法可实现较高的检测精度,能有效检测出干涉数据中央条纹区可能存在的毛刺,可满足星上数据等实时处理的应用需求。

**关键词** 光谱学;干涉数据毛刺;实时检测校正;滤波;预定义阈值

中图分类号 O438.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1030002

## Detection and Correction Method for Interferogram Spikes

Liu Jiaqing<sup>1,2\*</sup>, Han Shunli<sup>1,2</sup>, Meng Xin<sup>1,2</sup>, Li Zhizeng<sup>1</sup>, Ju Junwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>China Electronics Technology Instruments Co. Ltd, Qingdao, Shandong 266555, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Science and Technology on Electronic Test and Measurement, the 41st Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Qingdao, Shandong 266555, China

**Abstract** In this study, a detection and correction method for interferogram spikes is proposed based on filtering and predefined threshold detection to satisfy the requirement of real-time spike detection and correction. We present the algorithm hardware implementation based on a field-programmable gate array. In case of less hardware resources, the detection and correction algorithm achieves high detection accuracy, especially for the spikes of the central fringe of interferogram. The algorithm proposed in this study can be used for real-time on-board interferometric data processing.

**Key words** spectroscopy; interferogram spikes; real-time detection/correction; filter; predefined threshold

**OCIS codes** 300.6170; 300.6340; 300.6300; 070.2615

## 1 引 言

干涉分光技术常被用于光谱参数的测量<sup>[1-2]</sup>,具有波段覆盖宽、光谱分辨率高、信噪比高、测量速度快等优势,在紫外、可见光到红外、太赫兹等光学波段的光谱相关参数测量中应用广泛。例如,以傅里叶变换红外光谱仪为代表的干涉仪器,已广泛应用于目标识别、对地观测与外太空探测、大气与环境监测、光电系统测试、计量等领域<sup>[3-5]</sup>。

傅里叶变换红外光谱仪将入射待测光分为两束,并通过动镜运动等手段,在两束光之间引入相位差,从而产生干涉,通过干涉调制方式实现入射待测光的光谱分光。因此,傅里叶变换红外光谱仪获取

的是干涉数据,而不是待测目标的光谱数据,需要经过傅里叶变换等一系列复杂处理,才能得到目标的光谱数据<sup>[6]</sup>。

红外傅里叶变换光谱仪获取的实际干涉数据中可能存在脉冲毛刺,干涉图上表现为单点或连续毛刺。毛刺在光谱域表现为叠加到复原光谱上的光谱纹波,也是光谱相位的来源之一。目前,可通过移除探测器衬底、光学组部件采用楔形设计等优化手段,剔除大部分连续毛刺,剩余的连续毛刺则可在定标过程中有效移除。对于干涉图中央条纹区域外的单点毛刺,可通过阈值法等实现有效识别和剔除;对于干涉图中央条纹区出现的毛刺,由于中央条纹区本身的幅值变化较为剧烈,故需要更为复杂的检测算

收稿日期: 2019-05-23; 修回日期: 2019-06-11; 录用日期: 2019-06-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0106900)、电子测试技术重点实验室稳定经费支持计划(JCKY2019XXXXC038)、预研基金(JZX7Y201902XXXX01)

\* E-mail: eiqd@ceyear.com

法。现有的毛刺检测算法,如哈尔小波变换法、自回归模型法、标准偏差法、主成分分析法、多重单调神经网络法等,都有一定的局限性,难以应用于星载观测、目标探测等需要实时获取目标光谱的应用场合。此类场合需要对获取的干涉数据进行实时光谱反演,而在光谱反演之前,对毛刺进行实时检测与校正对于改善反演光谱质量十分重要<sup>[7-9]</sup>。本文采用的基于滤波和阈值检测的干涉数据毛刺检测方法,可实现毛刺的有效检测,且便于硬件实现,不占用过多的硬件资源<sup>[8-9]</sup>。

## 2 基本原理

### 2.1 傅里叶光谱仪原理

基于经典迈克尔孙干涉仪结构的傅里叶光谱仪的原理如图 1 所示,包括两块互成直角的动镜 M1 和定镜 M2,以及与 M1、M2 成 45°的分束器 B、补偿器 C。动镜 M1 沿箭头方向作匀速运动,而 M2 为固定平面镜。理想情况下,入射平行光被分束片 B 分成相等的两束光 I 和 II。补偿器 C 使两束光到达探测器时,以相同的次数通过分束器 B 和补偿器 C。光束 I 穿过分束器 B 和补偿器 C,经动镜 M1 反射到达探测器 D;另一光束 II 经定镜 M2 反射,穿过分束器 B 和补偿器 C,在探测器 D 处与光束 I 会合产生相干叠加,其光程差  $\delta$  随动镜 M1 的往返运动呈周期性变化,等于动镜运动距离的两倍。干涉信号的强度分布与光程差、光谱成分等有关。实际上,傅里叶光谱仪的光谱范围会受到探测器、分束器和光学元件(例如光学滤波器、采样窗口)等的限制<sup>[10-11]</sup>。

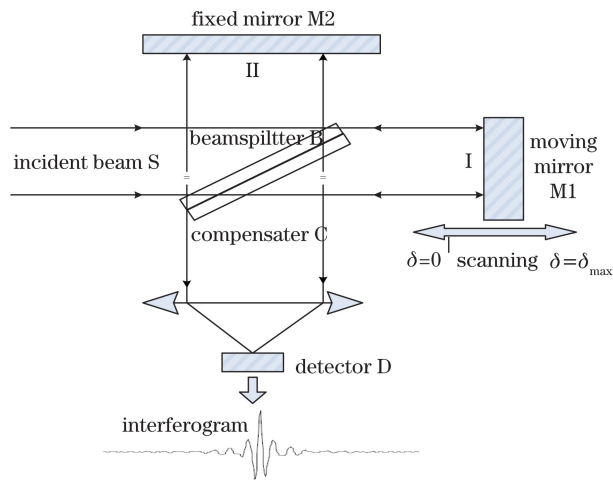


图 1 傅里叶光谱仪原理图

Fig. 1 Diagram of Fourier spectrometer

波数为  $\nu$  的单色入射光的电磁辐射可表示为

$$E(x, \nu) = E_0(\nu) \exp[i(\omega t - 2\pi x \nu)], \quad (1)$$

式中,  $\omega$  为角频率,  $t$  为时间,  $x$  为距离,  $E_0(\nu)$  为波数  $\nu$  处入射光电磁辐射的幅值。

该入射光分别经动镜和定镜反射后到达探测器,入射光的电磁辐射可表示为

$$E(x_1, x_2, \nu) = rR_t E_0(\nu) \{ \exp[i(\omega t - 2\pi x_1 \nu)] + \exp[i(\omega t - 2\pi x_2 \nu)] \}, \quad (2)$$

式中,  $x_1$ 、 $x_2$  为经动镜和定镜光束的光程,  $r$  和  $R_t$  分别为分束器的反射率和透过率。

探测器接收的入射辐射强度  $I$  是光程差  $\delta$  的函数,可表示为

$$I(\delta) = \frac{1}{2} \epsilon_0 c |E(\delta)|^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 c |rR_t E_0(\nu)|^2 \cdot 2 \{ (1 + \cos\{[2\pi(x_2 - x_1)]\nu\}) \} = \frac{1}{2} I(0) [1 + \cos(2\pi\nu\delta)]. \quad (3)$$

式中,  $\epsilon_0$  为介电常数,  $c$  为光速,  $E(\delta)$  为光程差  $\delta$  时的电磁辐射,  $I(0)$  为零光程差处的干涉光强度。由(3)式可知,探测器的输出信号中包含直流项和交流项。

连续光谱入射时,探测器输出干涉信号的积分形式为

$$I(\delta) = \frac{1}{2} \int_0^\infty B(\nu) d\nu + \frac{1}{2} \int_0^\infty B(\nu) \cos(2\pi\nu\delta) d\nu, \quad (4)$$

式中,  $B(\nu) d\nu$  为与入射辐射的波数相关的能量谱密度。对于非理想干涉仪,这一函数受非理想光学系统、探测器响应和电子学系统等的影

响。由于探测器输出的直流项不包含有效光谱信息,去掉(4)式中的直流分量,有

$$I(\delta) = \frac{1}{2} \int_0^\infty B(\nu) \cos(2\pi\nu\delta) d\nu. \quad (5)$$

由于  $B(\nu) = B(-\nu)$ , 探测器输出的交流信号  $I(\delta)$  关于零光程差对称,故(5)式可表示为

$$I(\delta) = \frac{1}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} B(\nu) \cos(2\pi\nu\delta) d\nu = \frac{1}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} B(\nu) \exp(i2\pi\nu\delta) d\nu. \quad (6)$$

由此可得采样干涉数据与入射辐射满足

$$\begin{cases} I(\delta) = \mathcal{F}[B(\nu)] \\ B(\nu) = \mathcal{F}^{-1}[I(\delta)] \end{cases} \quad (7)$$

的傅里叶变换关系,目标光谱可由傅里叶逆变换算出。

实际上进行光谱测量时以  $\Delta\delta$  为周期对干涉条纹进行采样,从而得到以  $1/\Delta\delta$  为周期的光谱

$B_{\Delta\delta}(\nu)$ , 即

$$B_{\Delta\delta}(\nu) = B_{\Delta\delta}\left(\nu - \frac{k}{\Delta\delta}\right), \quad (8)$$

式中,  $k$  为周期常数。

## 2.2 毛刺检测/校正算法

干涉数据中存在的单点毛刺如图 2(a) 所示, 星载傅里叶红外光谱仪的探测器可能会受到宇宙高能射线等的影响, 导致探测器输出信号中包含脉冲干扰信号。美国同步轨道卫星 (GOES) 的空间监测数据显示, 宇宙射线引发的 X 射线大概为  $2000 \text{ 次}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$  (60 keV X 射线)。红外大气探测干涉仪 (IAIS) 在轨监测数据表明, 大概 1% 的干涉图受到毛刺影响。另外仪器电子学系统的单粒子数翻转等系统异常、光学组件缺陷、数据下传错误等也会引起毛刺<sup>[12]</sup>。该类毛刺的特点是单点或几点, 且幅值非常大, 对于反演光谱质量影响最大, 是需要进行检测校正的主要毛刺类型。图 2(b) 为连续毛刺, 主要由干涉仪光学元件 (如分束器/补偿器)、光学窗口、探测器等光机系统组件间的反射引起。此外, 仪器的电子学系统, 如数据采集系统、运放、数传接口等的低频噪声也会引入连续毛刺。连续毛刺的特点表现为在获得的干涉数据的某些位置上会叠加一段幅值很小的额外干涉图, 出现位置有很强的规

律性。将干涉仪零光程差位置的杂散光降至最低, 是仪器光机设计需重点考虑的内容。因此, 连续毛刺一般不会出现于干涉图的中央条纹区, 而是多出现在干涉图的其他区域, 在光谱域表现为光谱上出现纹波。毛刺的存在会严重降低获取的光谱数据的信噪比, 导致光谱失真, 影响后续物理参数的反演和应用。

干涉数据的有效采样点数为  $N$ , 光程  $x$  处幅值为  $A$  的毛刺会在复原光谱中引起相位为常数、幅值为  $A/N$  的三角函数形式的光谱纹波, 导致光谱信噪比降低。在星载观测、目标探测等需要进行实时光谱反演, 以得到实时目标光谱的应用场合, 通过对高幅值脉冲毛刺进行检测和校正, 即可消除获取的光谱中的大部分虚假干扰光谱信号来源, 有效改善反演光谱的质量。连续毛刺等其他类型的毛刺, 可通过优化光机系统设计、后续的定标过程等进行剔除, 可忽略其对反演光谱的影响。例如, 干涉数据中存在的毛刺会引起目标光谱的相位和幅值等异常。本文主要针对高幅值脉冲毛刺进行检测校正, 而对于本文毛刺检测未考虑的连续毛刺、低频噪声等异常信号, 以及本文简单采用均值校正毛刺可能引入的误差等, 通过后续光谱反演环节的相位修正都能进行有效抑制和消除, 从而实现全部毛刺干扰的抑制, 有效改善获取光谱的质量。

需要进行检测和校正的高幅值毛刺如图 2(a) 所示, 毛刺幅值和出现位置的差异很大, 为实现高精度的毛刺检测, 可以设计很多复杂算法, 但考虑到星上处理等实时处理场合, 检测算法在保证检测精度的同时应尽量简便, 以避免占用过多的资源。干涉数据中央条纹区幅值变化剧烈, 如果直接使用阈值法, 则这一区域的毛刺很难检出, 本文采用先滤波、后阈值检测的方法, 可较好地解决这一问题。

毛刺校正的方法为采用毛刺左右临近点均值代替毛刺点。毛刺检测算法的基本原理如下: 在光谱域, 有用光谱信息为仅分布在有限宽度的低波数光谱带内的光谱信号, 干涉图上的毛刺则分布在整个光谱带上; 而有效带内光谱信号, 是获取以零光程差点为对称点且幅值以余弦包络形式变化的干涉数据的主要来源, 这使得毛刺难以检测。因此, 通过对干涉图进行低通滤波, 滤除有效带内光谱, 可降低干涉图的幅度变化, 从而凸显出毛刺, 特别是原先被中央条纹区大幅度的幅值变化所遮盖的毛刺, 从而降低检测的难度。由于毛刺在干涉图上表现为幅值异常的采样点, 通过设置合理的阈值, 采用幅值比较的方

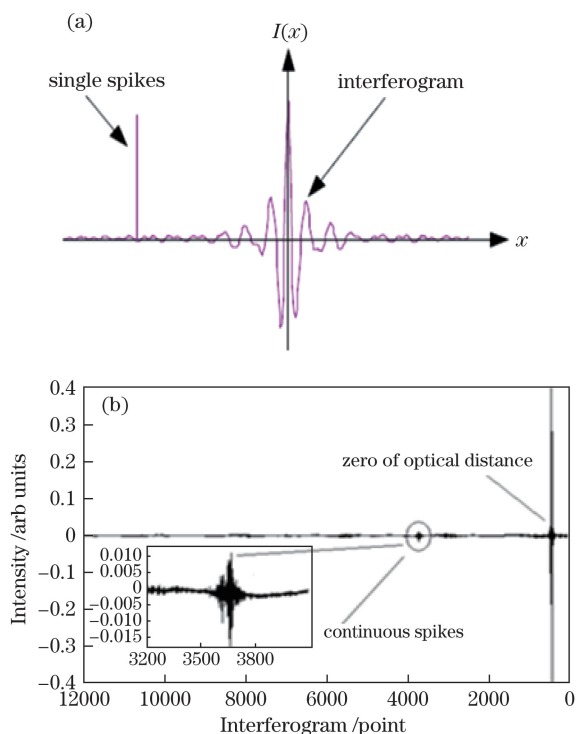


图 2 干涉数据中的毛刺。(a) 单点毛刺; (b) 连续毛刺  
Fig. 2 Spikes in interferogram. (a) Single spikes; (b) continuous spikes

法,即可将毛刺检测出来。

基于滤波方法进行毛刺检测的两个前提条件如下:

1) 与奈奎斯特采样定理相比,干涉数据已经被过采样;

2) 获取的干涉数据中出现毛刺是小概率事件,且呈单点分布(需要注意的是,数据采样过程使用的抗混叠滤波器可能会将单点毛刺扩散到邻近几个点)。

基于滤波和阈值检测方法的毛刺检测算法模型如下:

1) 采样干涉数据  $I(p)$  中央条纹区的毛刺检测,是中央条纹区采样点与  $N_{CF}$  阶滤波器滑动卷积的结果  $I_{CF}(m)$ ,

$$I_{CF}(m) = \sum_{p=m-(N_{CF}-1)/2}^{m+(N_{CF}-1)/2} I(p) \times W_{CF}(p-m), \quad (9)$$

式中,  $W_{CF}$  为滤波器的滤波系数,  $p$  和  $m$  为干涉图采样点的索引号。

与检测阈值  $T_{CF}$  逐点比较,如果  $I_{CF}(m) > T_{CF}$ , 则给出毛刺标志。

采样干涉数据中央条纹区的均值  $\bar{I}_{ACF}$  为

$$\bar{I}_{ACF} = \frac{\sum_{i=N_{\text{firstSpikCF}}}^{N_{\text{lastSpikCF}}} I(i)}{N_{\text{lastSpikCF}} - N_{\text{firstSpikCF}}}. \quad (10)$$

采样干涉数据中央条纹区的标准差  $S_{CF}$  为

$$S_{CF} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{lastSpikCF}} - N_{\text{firstSpikCF}}} \sum_{i=N_{\text{firstSpikCF}}}^{N_{\text{lastSpikCF}}} [I(i) - \bar{I}_{ACF}]^2}. \quad (11)$$

检测阈值  $T_{CF}$  可参照标准差倍数选取,为

$$T_{CF} = a_{CF} \times S_{CF} + O_{CF}, \quad (12)$$

式中,  $I(i)$  为待检测采样干涉数据,  $N_{\text{firstSpikCF}}$  为采样干涉数据中央条纹区起始点,  $N_{\text{lastSpikCF}}$  为中央条纹区结束点,  $a_{CF}$  为标准差系数,  $O_{CF}$  为干涉图偏置量。滤波器的阶次  $N_{CF}$  及对应的滤波系数  $W_{CF}$ 、检测阈值  $T_{CF}$  需要根据具体干涉仪器、应用场合、用途等进行调整选择。对于星上处理等场合,则需要根据毛刺检测/校正效果,对检测阈值和滤波器所用阶次进行及时更新。

2) 干涉数据其他区域的毛刺检测。将其他区域的采样干涉数据与  $N_{CFO}$  阶滤波器作滑动卷积,并将卷积结果  $I_{CFO}(m)$  与阈值  $T_{CFO}$  逐点比较。

$$I_{CFO}(m) = \sum_{p=m-(N_{CFO}-1)/2}^{m+(N_{CFO}-1)/2} I(p) \times W_{CFO}(p-m), \quad (13)$$

式中,  $W_{CFO}$  为滤波器的滤波系数。

如果  $I_{CFO}(m) > T_{CFO}$ , 则给出毛刺标志。

检测阈值  $T_{CFO}$  计算过程为取邻近中央条纹区的一个包络计算检测阈值,包络采样起始点为  $n_1$ , 结束点为  $n_2$ 。

包络的均值  $\bar{I}_{CFO}$  为

$$\bar{I}_{CFO} = \frac{\sum_{i=n_1}^{n_2} I(i)}{n_2 - n_1 + 1}. \quad (14)$$

包络的标准偏差  $S_{CFO}$  为

$$S_{CFO} = \sqrt{\frac{1}{n_2 - n_1 + 1} \sum_{i=n_1}^{n_2} [I(i) - \bar{I}_{CFO}]^2}. \quad (15)$$

检测阈值  $T_{CFO}$  可参照标准差倍数选取,可表示为

$$T_{CFO} = a_{CFO} \times S_{CFO} + O_{CFO}, \quad (16)$$

式中,  $a_{CFO}$  为标准差系数,  $O_{CFO}$  为干涉图偏置量。

相比干涉数据中央条纹区采样点幅值的剧烈变化,干涉数据其他区域采样点的幅值变化较为平缓,因此所用滤波器阶数  $N_{CFO}$  要低于中央条纹区所用滤波阶数。滤波器所用阶次  $N_{CFO}$  及对应的滤波系数  $W_{CFO}$ 、检测阈值  $T_{CFO}$ , 同样也需要根据具体干涉仪器、应用场合、探测任务与精度要求等进行选择调整。

3) 毛刺校正。对于检测出的高幅值毛刺,用左右临近点的均值代替,即可消除毛刺对反演光谱的主要影响,并将校正误差控制在实际获取光谱数据自身的噪声水平以下,取得不错的校正效果。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 毛刺检测算法实验与分析

毛刺检测校正算法流程图如图3所示。取一幅由星载干涉仪器获取的存在高幅值毛刺的长波通道 ( $700 \sim 1130 \text{ cm}^{-1}$ ) 干涉数据,并参考获取的系列干涉数据中存在高幅值毛刺的特点,在选取的干涉数据上,人为添加数个毛刺,以使得中央条纹区和其他区域均存在不同幅值的毛刺,如图4所示。参考激光波数为  $6451.6 \text{ cm}^{-1}$ , 采用双过零点法的等效参考采样波数为  $12903.2 \text{ cm}^{-1}$ 。中央条纹区采用13阶有限脉冲反应(FIR)滤波器,其他区域则采用5阶FIR滤波器。高通FIR滤波器的归一化截止频率为0.3,阻带衰减为-50 dB,通带起伏为-1 dB,使用MATLAB计算相应的滤波器系数。

存在毛刺干涉数据的滤波结果如图5所示,存



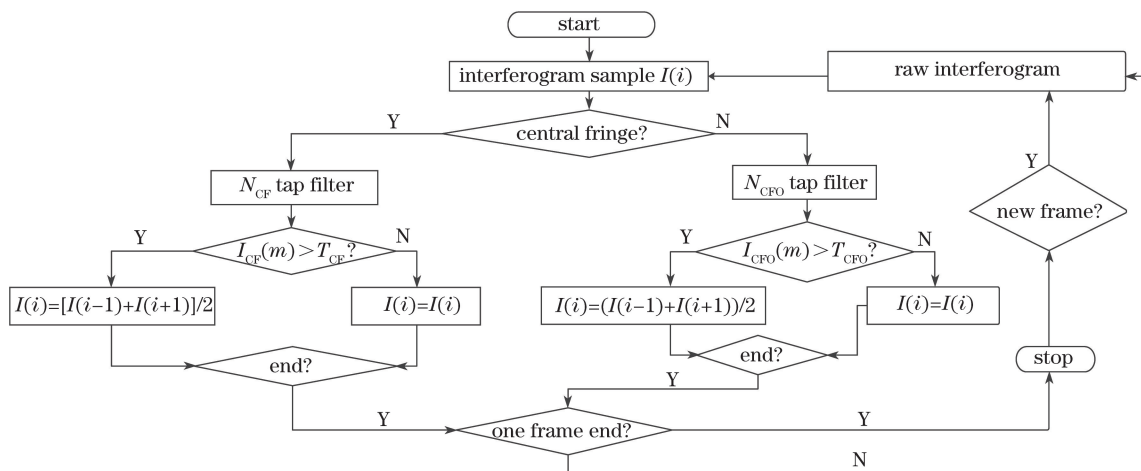


图 3 毛刺检测校正算法流程图

Fig. 3 Flowchart of detection and correction algorithm for spikes

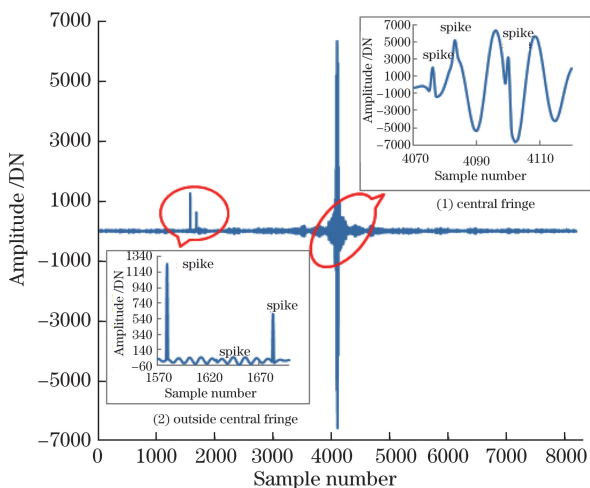


图 4 存在毛刺的干涉数据

Fig. 4 Interferogram with spikes

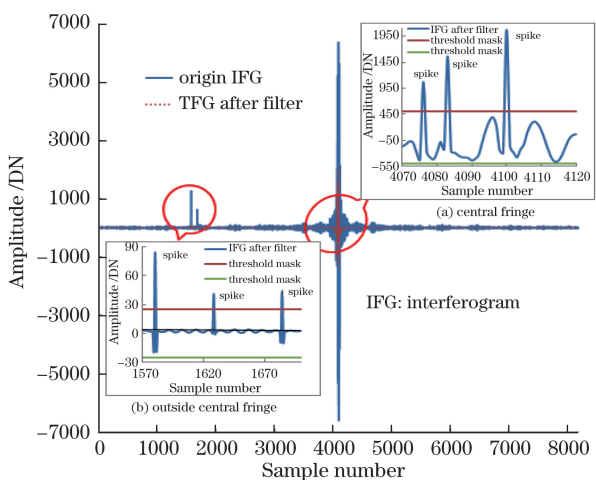


图 5 经滤波后存在的毛刺干涉数据

Fig. 5 Interferogram with spikes after filtering

在毛刺的干涉数据在未滤波和滤波后,反演得到的目标光谱如图 6 所示,可见,通过滤波可消除大部

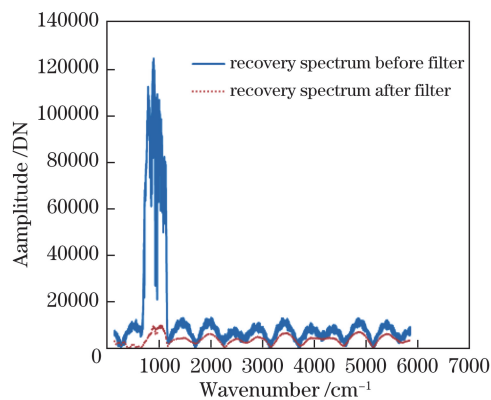


图 6 存在毛刺干涉数据滤波前后的复原光谱

Fig. 6 Recovery spectra with spikes before and after filtering

分有效光谱信息,从而避免目标光谱信息对毛刺检测的影响。干涉数据中央条纹区的滤波结果如图 5(a)所示,由于残余光谱信息的存在,滤波数据仍具有类似干涉图的特征,但是可能存在的毛刺则被凸显出来。对于可能在中央条纹区的波峰位置出现的毛刺,经滤波处理去掉有效光谱信息后,使得毛刺特征更为突出,有效降低了波峰位置对毛刺检测的干扰,从而提高了后续毛刺检测的精度;对于位于波谷、波峰和峰谷间的毛刺,经滤波处理后,可将原先被中央条纹区剧烈的幅值波动淹没掉的毛刺凸显出来,而这些位置的毛刺会影响干涉数据毛刺检测,同时也会影响反演光谱质量。干涉数据其他区域的滤波结果如图 5(b)所示,由傅里叶光谱仪的原理可知,干涉数据其他区域以一定间隔(与仪器工作波段、光机系统参数等有关)分布着系列类似中央条纹区的包络,且包络幅度随光程差的增加而降低。因此,对于系列包络中可能存在的毛刺,通过滤波同样

可以将位于包络区域的毛刺显现出来,设置合适的阈值,通过逐点比较滤波结果,即可将可能存在的毛刺检测出来。

选取一幅不存在毛刺的长波通道(700 ~ 1130  $\text{cm}^{-1}$ )干涉数据,在采样干涉数据的不同位置,直接利用左右临近点均值替代原始采样点,并计算校正后的反演光谱相对原始干涉数据反演光谱的误差,以对毛刺校正误差进行分析,结果如图7所示。可见,仅当毛刺出现在中央条纹区时会有  $10^{-5}$  量级的校正误差,其他位置的校正误差基本可以忽略,总体校正误差在反演光谱的噪声限以内。可见,对于高幅值单点毛刺,所用校正方法具有较高的校正精度,可满足星上实时数据处理等场合的应用需求。

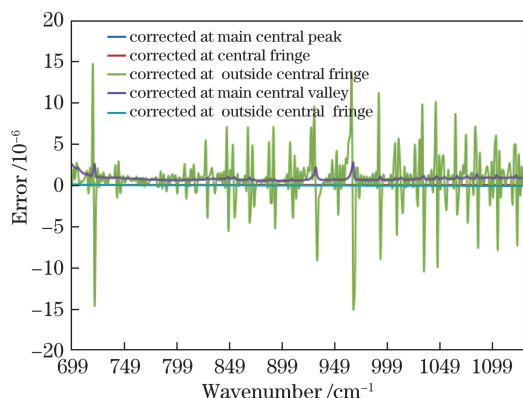


图7 不同位置的毛刺校正误差分析

Fig. 7 Error of spike correction at different positions

图8为存在毛刺的干涉数据在未校正和校正后的反演光谱,可见毛刺的存在,会在带内光谱上引入光谱纹波,造成光谱信噪比降低,影响获取光谱的质量,这与前面的理论分析相吻合。因此,对于星载观测、目标探测等需要实时获取目标光谱的应用场合,

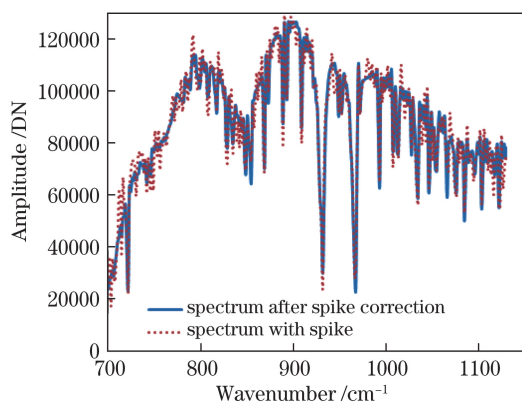


图8 毛刺校正前后的复原光谱

Fig. 8 Spectra before and after spike correction

在进行反演光谱处理前,应先对可能存在的毛刺进行检测和校正,以有效抑制毛刺引起的光谱纹波对带内光谱的影响。

### 3.2 基于现场可编程门阵列的硬件实现

毛刺检测校正算法的硬件实现采用 Xilinx V5 110T FPGA,如图9所示,其中,检测模块1用于中央条纹区的毛刺检测,检测模块2负责其他区域的毛刺检测。校正模块负责毛刺的修正,即读取毛刺左右临近两点的采样值,计算其均值,并用均值代替毛刺点。待检测的干涉数据存储于双口随机存取存储器(RAM)中,由于一个时钟只能对双口RAM读写一次,完成一幅8192点干涉数据图的检测需8194个时钟周期,每发现并校正一个毛刺需额外增加5个时钟周期。毛刺检测校正算法采用现场可编程门阵列(FPGA)实现时,所需硬件资源如表1所示。在实际应用中,可用多路并行模式降低所需时钟周期,提高采样干涉数据的毛刺检测/校正速度,以满足不同应用场合和不同数据采样率仪器的应用需求,不足之处是会增加控制难度和所需FPGA逻

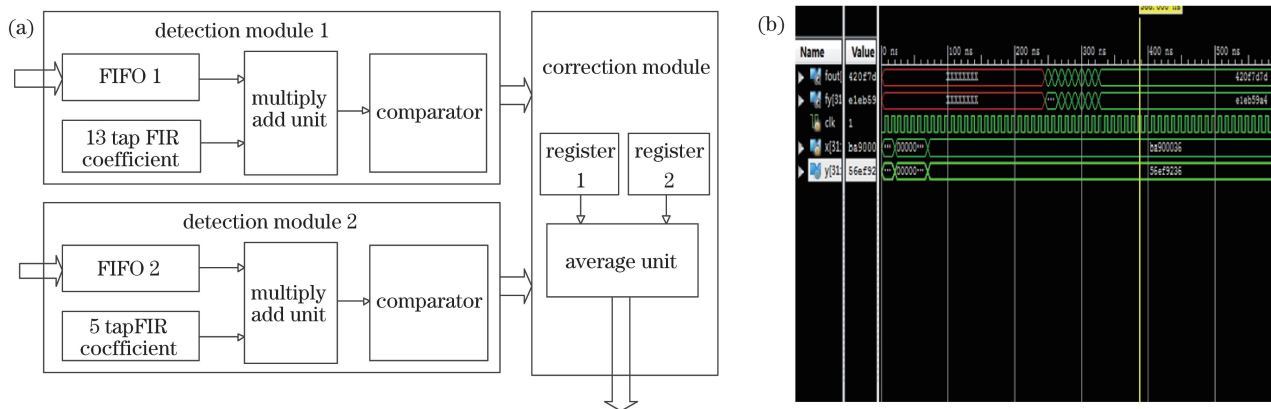


图9 毛刺检测/校正算法的硬件实现。(a)模块框图;(b)仿真结果

Fig. 9 Hardware implement of detection/correction algorithm for spikes. (a) Modular scheme; (b) simulation result

表 1 FPGA 算法实现时所需硬件资源

Table 1 Required hardware resource for FPGA algorithm implementation

Logic resource	Occupied slices	Total number of slices	Logic utilization /%
Slice registers	15	69120	0.021
Slice LUTs	18	69120	0.026
Fully used LUT-FF pairs	1	18	5.555
Bonded IOBs	4	640	6.250
BUFG/BUFGCTRLs	1	32	3.125

辑资源。即将单幅干涉图由存储在单个大双口 RAM 中改为存储在  $N$  个小双口 RAM 中,对应使用相同数目的检测模块并行检测,可将处理时间降为原来的  $1/N$ 。

## 4 结 论

针对红外傅里叶光谱仪在星载探测、目标探测等需要进行实时光谱反演的应用场合,提出一种基于滤波和阈值检测的高幅值单点毛刺的实时检测/校正方法,并给出了基于 FPGA 的硬件实现。在使用较少硬件资源的情况下,所提方法可实现较高的检测精度,特别是可对干涉数据中央条纹区域可能存在的毛刺实现有效检测,满足星上实时数据处理等的应用需求。本方法的检测阈值仍需要通过大量的实际观测数据,通过实验的方式确定,并需根据实际应用时的效果,调整预定义检测阈值。下一步将重点研究自适应阈值的确定方法。

## 参 考 文 献

- [1] Persky M J. A review of spaceborne infrared Fourier transform spectrometers for remote sensing[J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(10): 4763-4797.
- [2] Lü J G, Liang J Q, Liang Z Z, *et al.* Wavefront aberration analysis and spectrum correction of microminiature Fourier transform spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0230001.  
吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 等. 微小型傅里叶变换光谱仪波前像差分析与光谱修正 [J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0230001.
- [3] Kozlov D A. Radiometric calibration of the IKFS-2 on-board IR Fourier spectrometer for temperature and

humidity probing of the Earth's atmosphere[J]. Journal of Optical Technology, 2013, 80(2): 110-114.

- [4] Formisano V, Angrilli F, Arnold G, *et al.* The planetary Fourier spectrometer (PFS) onboard the European Mars Express mission [J]. Planetary and Space Science, 2006, 54(13/14): 1298-1314.
- [5] Kuze A, Suto H, Nakajima M, *et al.* Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring [J]. Applied Optics, 2009, 48(35): 6716-6733.
- [6] Revercomb H E, Buijs H, Howell H B, *et al.* Radiometric calibration of IR Fourier transform spectrometers: solution to a problem with the high-resolution interferometer sounder [J]. Applied Optics, 1988, 27(15): 3210-3218.
- [7] Snively C M, Koenig J L. Characterizing the performance of a fast FT-IR imaging spectrometer [J]. Applied Spectroscopy, 1999, 53(2): 170-177.
- [8] Ibrahim A. Spectroscopic study of channel spectra phenomena in the synchrotron-based FTIR spectrometer at the Canadian light source [D]. Alberta, Canada: University of Lethbridge, 2010: 15-30.
- [9] Goddard Space Flight Center. Joint polar satellite system (JPSS) cross track infrared sounder (CrIS) sensor data records (SDR) algorithm theoretical basis document (ATBD) [Z/OL]. (2009-02-20) [2019-05-08]. [http://asl.umbc.edu/pub/reports/external/474-00032\\_CrIS-SDR-ATBD\\_Rev-.pdf](http://asl.umbc.edu/pub/reports/external/474-00032_CrIS-SDR-ATBD_Rev-.pdf).
- [10] Yang M Z, Zou Y P, Zhang L, *et al.* Correction to nonlinearity in interferometric data and its effect on radiometric calibration [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0110002.  
杨敏珠, 邹曜璞, 张磊, 等. 干涉数据中非线性的校正及其对辐射定标的影响 [J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0110002.
- [11] Li P, Yang S S, Ding Z H, *et al.* Research progress in Fourier domain optical coherence tomography [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(2): 0207011.  
李培, 杨姗姗, 丁志华, 等. 傅里叶域光学相干层析成像技术的研究进展 [J]. 中国激光, 2018, 45(2): 0207011.
- [12] Carter S, McLaughlin C, Sabol C, *et al.* Spaceflight dynamics support for the MightySat II. 1 hyperspectral payload operations [J]. Astrodynamics, 2000: 693-709.