

星载遥感短波红外高速高光谱成像仪坏像元识别

刘永征, 杜 剑, 安秦宇宁, 杨凡超, 张 昕, 李洪波

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 为改善干涉成像短波红外高速高光谱成像仪的坏像元对复原光谱的影响, 利用高光谱成像仪测试流程建立了坏像元识别模板, 以提高坏像元识别效率。首先, 按照高光谱成像仪测试流程设置增益模板和帧频模板并采集图像数据, 依据正常像元增益响应设定合理判定阈值 Th_1 , 识别不同增益下异常像元并记录对应坐标值; 再依据正常像元帧频响应灰度值设定合理判定阈值 Th_2 , 识别不同帧频下异常像元并记录坐标值。最后, 对比增益模板和帧频模板判定的异常像元, 融合确定坏像元。实验结果表明基于增益模板和帧频模板的识别方法在不增加设备研制测试成本的同时有效识别出短波红外高光谱成像仪探测器的坏像元, 为可靠识别短波红外高光谱成像仪坏像元提供了一种低成本、高效可靠的新方法, 提高了干涉成像高光谱成像仪光谱反演准确性。

关键词: 坏像元识别; 短波红外; 干涉成像; 高光谱成像仪

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220308

Identification of bad pixels in shortwave infrared high-speed hyperspectral imager for spaceborne remote sensing

Liu Yongzheng, Du Jian, An Qinyuning, Yang Fanchao, Zhang Xin, Li Hongbo

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: To reduce the influence of bad pixels in large-aperture interferometric imaging shortwave infrared high-speed hyperspectral imagers on recovering spectra, a bad pixel identification template was established using a hyperspectral imager test process to effectively raise the efficiency of identification of bad pixels. First, image data were collected based on the gain template and frame-rate template for the hyperspectral imager test. Then, the judgment threshold Th_1 was set reasonably according to the gain response of normal pixels to identify abnormal pixels under different gains and record the corresponding coordinate values, and the judgment threshold Th_2 was set reasonably according to the frame-rate response gray values of normal pixels to identify abnormal pixels under different frame rates and record the coordinate values. Finally, after the abnormal pixels identified by the gain template and those identified by the frame-rate template were compared, they were used together to identify bad pixels. The experimental results show that the identification method based on the gain and frame-rate templates can effectively identify bad pixels in a shortwave infrared hyperspectral imager detector without increasing the cost of equipment development and testing, while providing an economical, practical, efficient, and reliable technical means for correcting bad pixels in a shortwave infrared hyperspectral imager. The method also offers a useful reference to improve the accuracy of inversion of interferometric imaging hyperspectral imager spectral data.

Key words: bad pixel recognition; shortwave infrared; interference imaging; hyperspectral imager

收稿日期:2022-05-05; 修订日期:2022-06-16

作者简介:刘永征,男,高级工程师,硕士,主要从事星载高速高光谱成像仪电子学设计方面的研究。

0 引言

随着我国高光谱成像遥感持续发展,高分辨率高光谱成像仪愈加显得重要。高分辨率短波红外高光谱成像仪,特别是大孔径静态干涉光谱成像仪(Large Aperture Static Imaging Spectrometry, LASIS)在植物覆盖、海岸线检测、矿石分布统计、自然灾害预警、灾后评估、食品及药品检测、军事敏感目标识别等方面发挥着重要作用。

碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride, HgCdTe)为材料的短波红外探测器具有量子效率高、热激发暗电流小的优点,是 LASIS 采用的主流器件^[1]。但其普遍存在坏像元和响应不均匀的问题,影响了光谱复原准确性,需要进行校正。坏像元识别是校正的前提,国内外关于坏像元识别的研究较多,例如 3σ 阈值法、图像差分域识别^[2]、光谱角 β 阈值法^[3]、滑动窗口法^[4]等,但对于 LASIS 坏像元检测识别及其工程应用的研究极少。

作者结合多年来的 LASIS 高光谱成像仪研制经验,提出了适用于 LASIS 高光谱成像仪的基于模板的坏像元检测方法,多个航天项目也验证了本方法具有方法简捷、效果可靠的优点。

1 高光谱成像仪坏像元的识别方法

基于大孔径干涉成像光谱技术的高光谱成像仪系统,集成了时间调制和空间调制的优点,克服了高辐射通量与高稳定性之间的矛盾,实现了较高的高分辨高光谱成像性能。LASIS 成像数据在目标的二维空间影像上同时叠加了包含其光谱信息的干涉图。基于 LASIS 的高分辨率高光谱成像仪原理如图 1 所

示,短波红外谱段 LASIS 获取的实际图像如图 2 所示,要提取出所关注的光谱信息,数据处理的标准流程如图 3 所示。

高光谱图像与普通相机图像对被摄目标关注的侧重点不同,它更关注的是从图像数据所提取出的目标点的光谱信息,故对存在的坏点更为敏感。因此,在提取目标点光谱信息前,必须进行高光谱图像数据的坏像元检测和校正。

高分辨率高光谱成像仪图像数据量巨大,为确保卫星数据传输的可靠性,高光谱图像数据上传前都进行过图像数据压缩。要利用高光谱图像数据,处理的流程如图 3 所示,分别是:图像解压缩、坏像元检测、坏像元均匀性校正、抽成大孔径空间调制谱(Large Spatially Modulated Interference Spectral, LSMIS)图

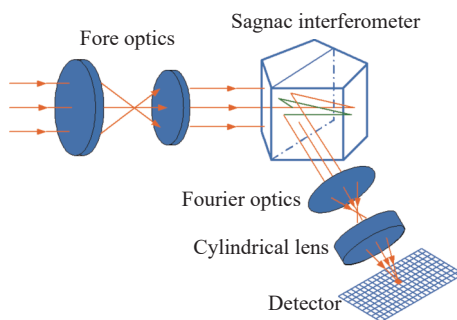


图 1 高分辨率高光谱成像仪原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the high-resolution hyperspectral imager

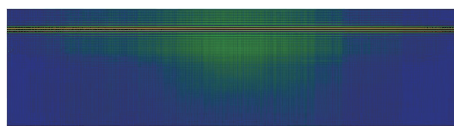


图 2 短波红外谱段 LASIS 图像

Fig.2 LASIS image in shortwave infrared waveband

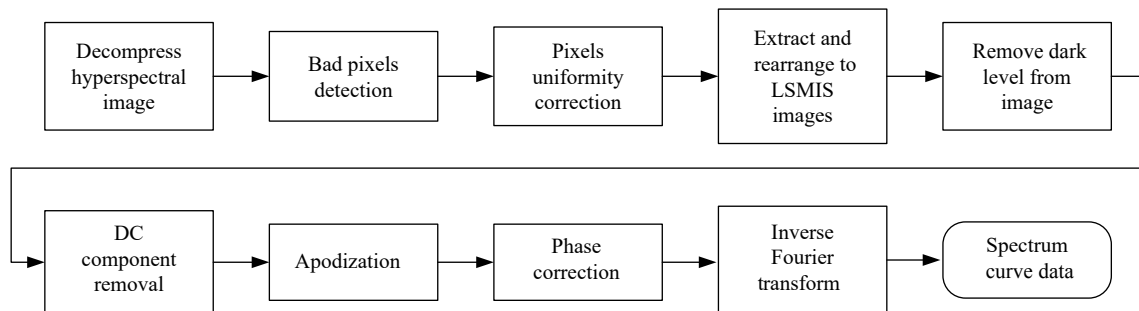


图 3 干涉成像高光谱图像数据的处理流程

Fig.3 Function diagram of the procedure of interferometer imaging hyperspectral data

像、去除暗电平、干涉图直流去除、切趾、相位修正、傅里叶逆变换,最终获得光谱数据曲线。

可以看到,坏像元检测是整个高光谱成像仪图像数据进行应用的最前端步骤,对光谱复原影响最为直接。

高光谱图像数据从最初的 LASIS 图像到最终的输出光谱,将所有预处理环节省略掉,数据处理可概括为 LASIS 图像选取某列干涉曲线到光谱曲线的逆向傅里叶变换^[5]。

传统的短波红外成像系统坏像元检测方法是计算整个成像系统均匀光照下的平均响应,将那些响应值小于平均响应值 1/10 的像元识别为坏像元,并归入死像元类;再计算整个成像系统所有像元的噪声电压,将噪声电压大于 10 倍的整个探测器像元数平均后的平均噪声电压的像元也识别为坏像元,并归为过热像元类^[6]。

目前有研究人员在传统坏像元检测方法的基础上,从应用自动识别算法的角度进行了研究性尝试^[7-11],取得了一定效果,但往往仅能在实验室使用,处于科研探索的阶段,并不能应用在成熟稳定的业务化的高光谱图像数据应用中。

作者根据长期在高光谱成像仪工程项目研发中积累的经验基础上,结合大孔径干涉光谱成像遥感应流程的特点,提出了一套实用有效的坏像元识别及分类方法,有效解决了多个星载遥感用的干涉成像高光谱成像仪的坏像元识别和分类问题。

从电子学实现的角度看高光谱图像数据,红外探测器光电转换获取的模拟视频信号,首先经过模拟前端进行信号调理和放大,放大倍数以 $G=1.4^N(N=-2,-1,0,1,2)$ 为常规设置,目的是为了匹配不同太阳光高度角照射下及不同反射率时进入星载成像光谱仪光学系统的辐照能量。另外,星载遥感系统往往有变化轨道以适应不同分辨率和幅宽的具体需求,这也要求高光谱成像仪帧频可调以匹配速高比。

针对航天遥感使用中的变化模拟视频放大倍数(即模拟视频的增益)和变化帧频的使用特点,笔者设计了一种依据设计模板来识别坏像元的方法。操作流程如图 4 所示。

根据高光谱成像仪响应辐照亮度范围所对应确定的成像电路需设置的增益级数,设计最小均匀照度

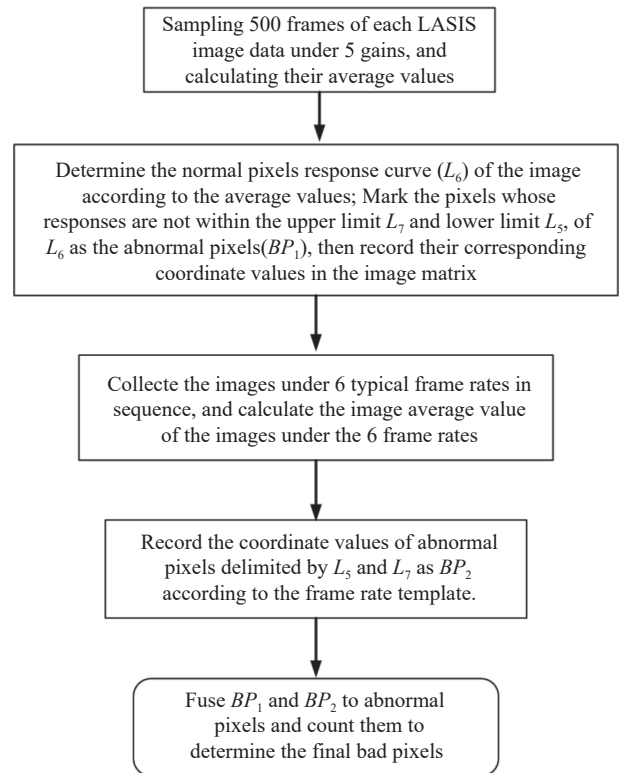


图 4 模板法检测坏像元技术流程

Fig.4 Technology flow chart of detecting bad pixels according our templates

(太阳模拟器辐照度设置不使高光谱成像仪饱和)下,依次增大各级增益时的成像电路响应的图像,计算各档增益下 1000×256 面阵各像元相应响应的平均值。

确认是否在模板 1 划定范围内?对不在划定范围内的灰度值进行标记其对应像元,并进行分类。

根据高光谱成像仪需要响应不同轨道高度下所应摄影的辐照亮度范围所对应确定的成像电路的帧频设置,设计最小帧频时,确定辐射亮度下,依次增大帧频时的成像电路响应的图像,计算各级帧频下 1000×256 面阵各像元相应给定辐照亮度响应的平均值。

确认是否在模板 2 划定范围内?对不在划定范围内的灰度值进行标记其对应的像元,并进行分类。

1.1 设计增益模板下坏像元识别

航天遥感为获取高的空间分辨率和宽的的对地遥感幅宽,所选用短波红外探测器图像面阵为 1000×256 面阵,像元尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,最高帧频为 390 fps。

高光谱成像仪设计的 5 档增益中,对应的曝光时间控制范围从 2.6~5.6 ms。在星载系统中,卫星平台根据观测目标,及时修正高光谱成像仪的增益,故此,

增益设置指令模块是发射前例行且必须检查的检测和演练项目。设计增益模板来对高光谱成像仪短波红外谱段的坏像元进行识别和分类,没有增加高光谱成像仪研制过程的额外工作量和检查项目及流程。其过程为依次设定高光谱成像仪工作在 5 档增益下,并相应记录对应的图像数据;计算各档增益下的图像多帧平均灰度值,作为该增益下对应的正常响应;根据各档增益下图像响应值,设计增益响应模板,作为界定非正常响应的灰度响应界限;按照模板,逐档增益判读异常像元。将响应值未落入增益模板内的像

元,记录其位置,识别为坏像元。

图 5 中以最简单的增益模板,高光谱成像仪设计为从增益 1 依次增大到最高档增益,图像响应值从平均值 989~3 800,在此过程中,计算出正常图像平均响应服从响应曲线 L_6 ,考虑测量误差及图像面阵的不一致性容限,模板刻画为曲线 L_5 (相对 L_6 , DN 值低 30) 和 L_7 (相对 L_6 , DN 值高 30) 内为正常响应像元 (L_5 、 L_7 容限值 10 DN);按照增益 1 到增益 5 增大响应时,实际响应未落入模板内的即为异常像元,标记异常像元的响应曲线,并按其特征进行分类。

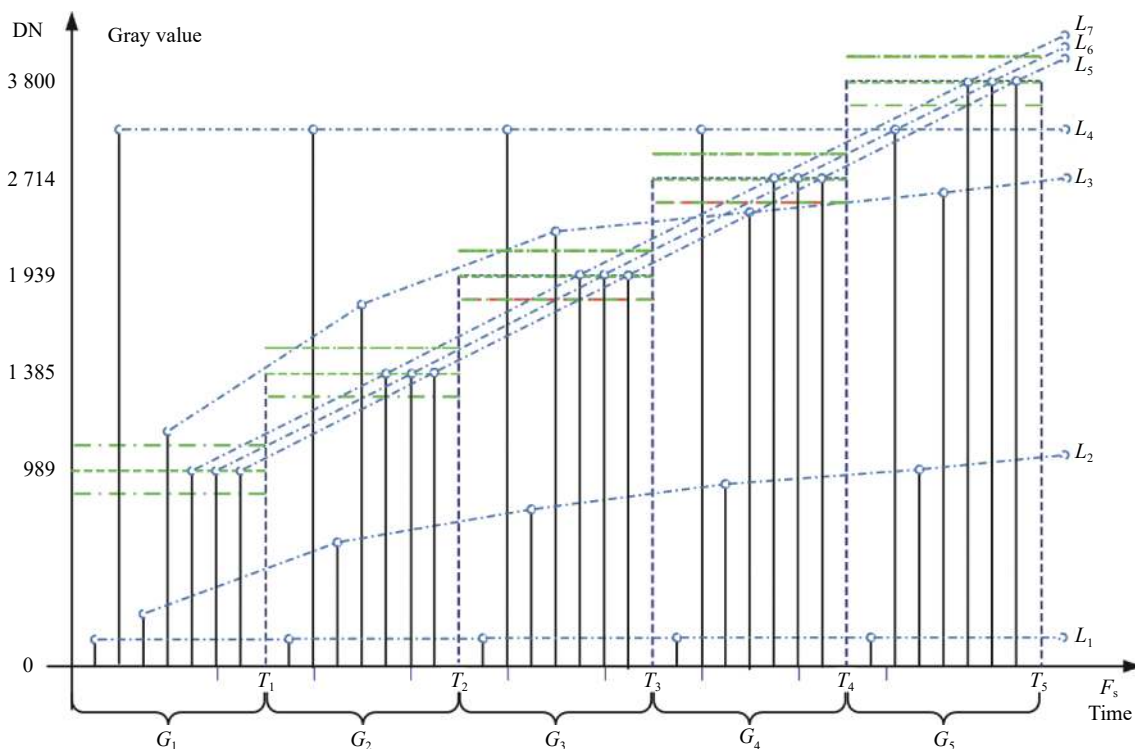


图 5 增益设计模板

Fig.5 Gain design template

高光谱成像仪的短波红外图像中,出现 1 类异常像元(简称第 1 类)为响应在各档增益下整体偏低,且其灰度值不随增益增大而增大(固定为暗背景值),其响应特征曲线为 L_1 ,定义为暗点像元,简称暗点;图像中还出现了 1 类像元(记作第 2 类),随增益增大时整体响应偏低,但灰度值在增益增大时会略微增大,其响应特征曲线为 L_2 ,称之为弱响应像元;图像中也大量出现了一类像元(记为第 3 类),其表现为在前三档增益下,其响应值高于正常像元响应值,在后两档增

益下,其响应值高于正常响应值,响应特征曲线表现为 L_3 ,称之为非线性响应像元;图像中第 4 类像元,其在各档增益下,灰度值均很高,且不随积分时间增大而变化,其响应特征曲线表现为 L_4 ,现象比较典型,如图 6 所示,简单描述为常亮,称之为亮点。绝大多数像元响应灰度都值服从随着增益增大而增大,响应特征曲线可以被 L_5 、 L_6 、 L_7 三条曲线所表征,这些都是正常像元。

以往坏点去除研究的不足主要是坏点的漏判和

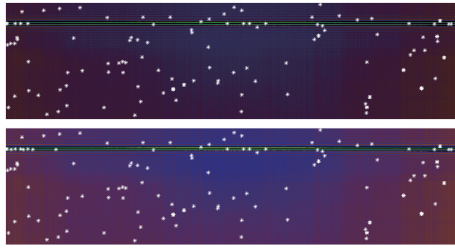


图 6 增益 4 和增益 5 下的亮点坏像元

Fig.6 Bad pixels in image on Gain4 and Gain5

多判比较严重,漏判是指对探测器坏点识别不全面,多判是指将探测器的部分非坏像元识别为坏像元,导致出现误判和漏判现象的主要原因是坏像元检测算法不适用。

1.2 设计帧频模板下坏像元识别

星载高光谱成像仪要满足在轨变轨条件下任务

需求,需测试不同帧频下的成像能力,故帧频响应能力是必测项目,作者充分利用装星及发射前必测项目设计了帧频检测模板来识别坏像元。

在星载遥感高速高光谱成像仪中,设计短波红外高光谱成像仪在 1000×256 图像幅面下依次工作帧频为 230、260、290、320、350、380 fps,采集并记录连续帧图像数据;计算连续帧图像中各个像元的不同帧频时响应灰度值。

在此设计模板下,短波红外光谱通道 ($0.8 \sim 3.0 \mu\text{m}$) 图像数据量高达 $1000 \times 256 \times 12 \text{ bit} \times 390 \text{ fps} = 1.14 \text{ Gbps}$ 。在每个工作帧频下,计算每个像元灰度值是指计算该帧频下采集到图像的每个像元的灰度响应。以帧频数值为横坐标,以灰度值为纵坐标,对所有像元进行画图,即可得到成像仪各像元的帧频响应分布,如图 7 所示。

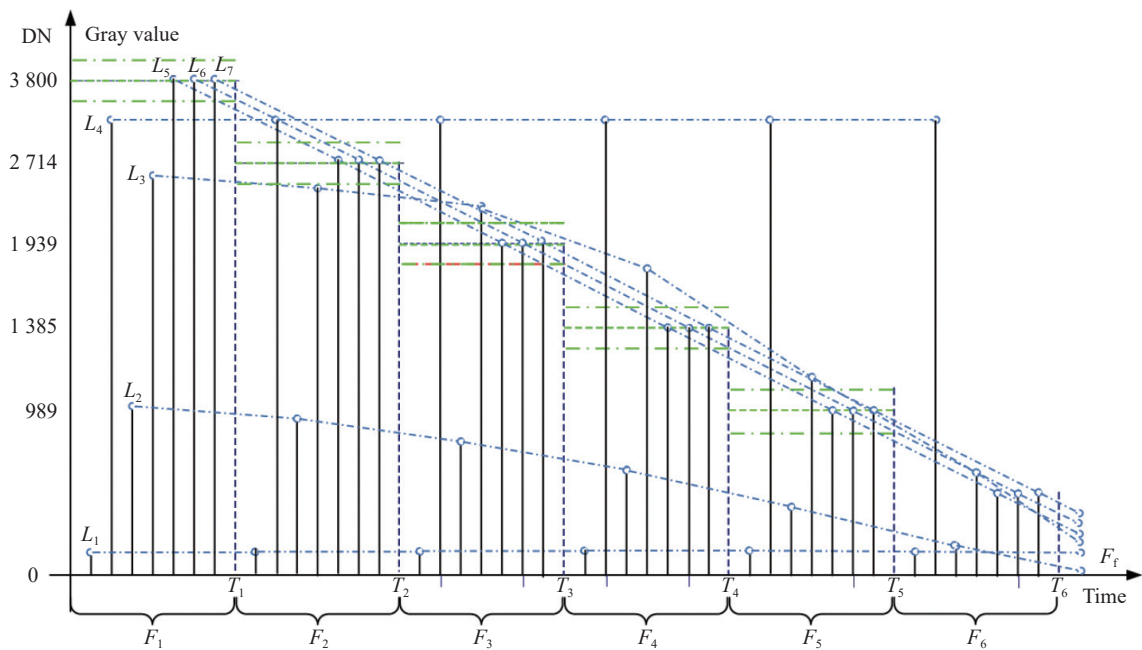


图 7 短波红外图像中各像元的帧频响应值

Fig.7 The frame rate response value of each pixel in the shortwave infrared image

1.3 短波红外高光谱成像仪坏像元分类

碲镉汞短波红外焦面探测器是干涉成像高光谱成像仪的核心器件,技术水平与制作工艺的限制使得 HgCdTe 短波红外焦面探测器仍普遍存在坏像元和感应非均匀性的像元,且坏像元的数量会随着探测器开关机次数的增加而增加,因此对 HgCdTe 短波红外焦面探测器进行坏像元识别非常必要。

通过前述的两种识别模板,对 HgCdTe 短波红外焦面探测器的所有像元遍历模板涉及的所有测试点响应后,可有效识别出所有坏像元,通过对其进行分类,可以为采取有效的坏像元校正方法提供有效的参考依据。

通过对碲镉汞短波红外焦面探测器的异常响应像元的响应特征进行分析,可以将碲镉汞短波红外焦

面探测器的坏像元分为以下几类:

(1) 暗点像元, 其对两类检测模板的增益和帧频变化时的输入光照能量变化没有响应上的变化, 图像上表现为常暗, 灰度值在暗背景灰度值附近, 图像灰度值响应曲线如模板 1(增益模板) 和模板 2(帧频模板) 中的 L_1 曲线。

(2) 弱响应像元, 其对两类检测模板的增益和帧频变化时的输入光照能量变化有响应, 但响应均较大多数正常像元的灰度值偏暗, 灰度值总是低于大多数像元, 图像灰度值响应曲线如模板 1 和模板 2 中的 L_2 曲线。

(3) 非线性响应像元, 其对两类检测模板中的增益和帧频变化时输入的能量变化有响应, 且其比大多数正常像元的响应差异小。只有仔细比对完整响应范围才能发现其与大多数线性响应的像元有响应特征上的差异, 表现为输入能量不强时, 其响应比正常像元的响应值高; 输入能量强时, 其响应却比正常的像元响应值低, 其响应特征曲线如模板 1 和模板 2 中的曲线 L_3 所示。

(4) 亮点像元, 其对两类检测模板中的增益和帧频变化没有响应上的变化, 上电即常亮。其响应特征表现为模板 1 和模板 2 中的曲线 L_4 所示。

HgCdTe 短波红外焦面探测器的多数像元均在模板 1 和模板 2 的测试中表现出线性变化, 其在图像上灰度值的特征表现为曲线 L_6 所示。因为像元响应值的分布误差, 会表现为部分像元响应特征在 L_6 附近, 以曲线 L_5 为响应下限边缘, 曲线 L_7 为响应上限边缘, 也就是说大多数在 L_5 和 L_7 划定边界的模板内。

坏像元修正和非均匀性修正都是红外探测器投入高光谱遥感应用前必须的修正过程, 坏像元识别和分类是进行修正的前提。通过坏像元校正将坏像元的错误输出值校正为合理的输出值, 通过非均匀性校正来校正像元的响应曲线, 使他们对同样强度的红外辐射具有趋于正常像元的响应值。

2 SWIR 高光谱成像仪坏像元检测

在高光谱成像仪电子学设计技术流程中, 筛选短波红外探测器阶段在组装之前, 对短波红外高光谱成像仪的坏像元进行识别后, 然后按其特征进行分类,

这样为有效的修正提供了便利。短波红外高光谱成像仪采用定制大面阵制冷型探测器(外观如图 8 所示)。

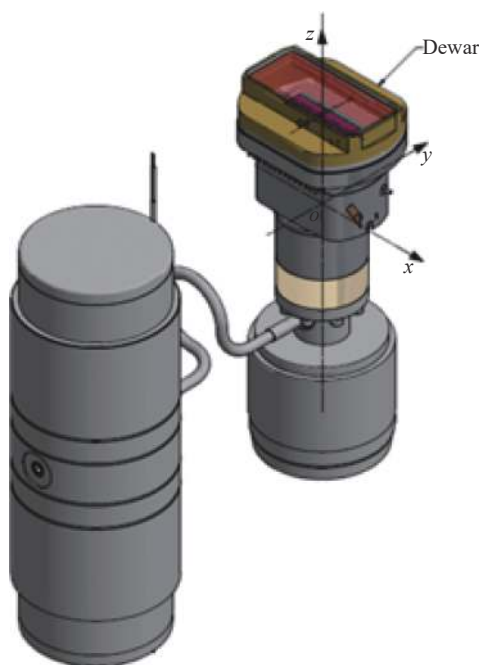


图 8 制冷型 1000×256 大面阵高速短波红外探测器

Fig.8 Outline drawing of 1 000×256 refrigerated large area array shortwave infrared detector

按照短波红外高光谱成像仪的设计工作模式, 测试增益模板中其不同增益 (G 表示 Gain, 分别取值 G_1, G_2, G_3, G_4, G_5) 下的图像, 统计面阵图像中的坏像元数量; 再按照帧频模板中工作模式, 测试帧频变化范围内图像的响应值, 特别保留选取模板帧频为 180、220、260、300、340、380 fps 的图像, 复核增益模板。对两次模板统计出的坏像元, 按类分别筛查其面阵坐标位置, 生成坏像元坐标文件。图 9 是设计模板检测坏像元的流程图。

暗背景下采集图像, 识别亮点像元如图 10 所示。

通过增益模板的检测, 可检测出短波红外高光谱成像仪图像中亮点像元、暗点像元、弱响应像元、非线性响应像元^[12]。

通过对星载干涉成像短波红外高光谱成像仪进行亮点及暗点像元检测, 在 12 bit 量化下, 在增益 4 下, 图像响应灰度值在 2500 附近时, 检测结果最为准确。

一般用来表示坏像元检测准确率的参数有两个, 分别是: 漏检测系数 (Detection Missed Factor): 定义为

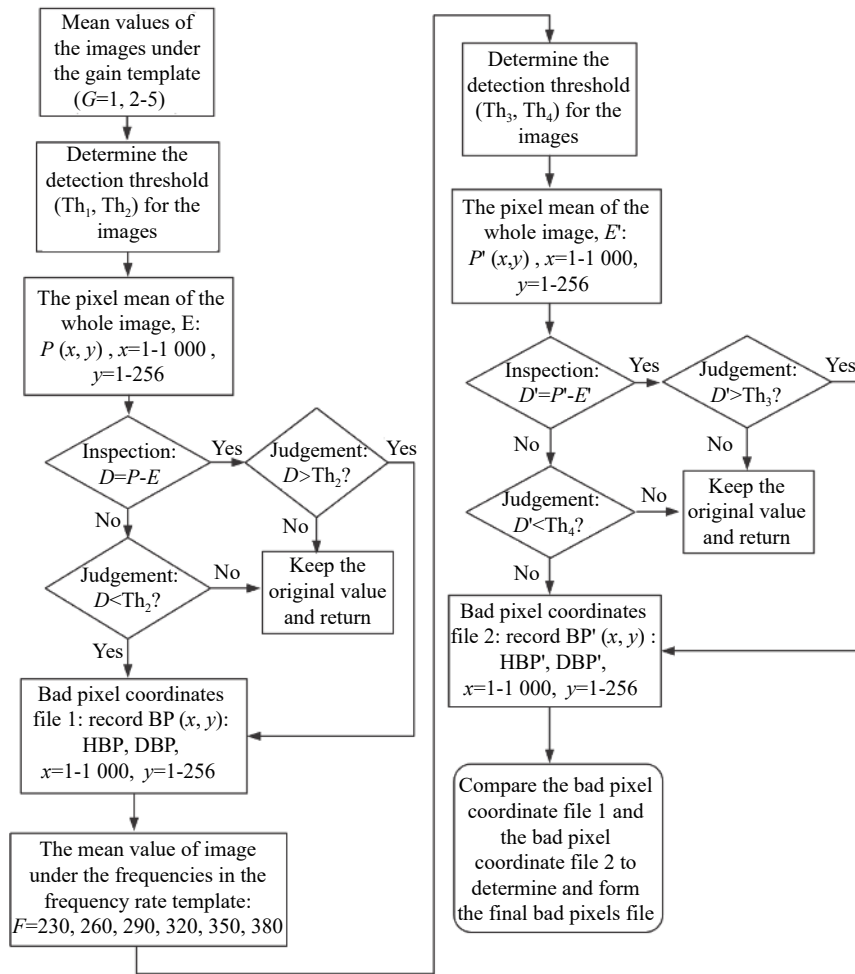


图 9 基于增益模板和帧频模板的坏像元识别流程图

Fig.9 Flow chart of bad pixel identification based on gain template and frame rate template

漏检坏像元数占比实际坏像元数的百分比。虚假检测系数 (Detection False Factor): 定义为虚假检测坏像元数占比实际坏像元数的百分比。

$$N_{\text{miss}} = \left(1 - \frac{b}{d+h+w}\right)\% \quad (1)$$

式中: b 代表所采用方法检测到的坏像元; d 表示实际没有任何响应的暗点像元; h 表示响应值过高的亮点像元; w 表示有响应但响应辐照不随正常像元随曝光时间增加呈现线性响应的像元。

$$N_{\text{err}} = \left(\frac{a}{M \times N - d - h - w}\right)\% \quad (2)$$

式中: a 代表被所用方法检测出的坏像元; d 表示实际没有任何响应的暗点像元; h 表示响应值过高的亮点像元; w 表示对光照有响应但响应辐照不随正常帧

长像元呈现线性响应的像元; 分母中 M 表示图像面阵行数, N 表示图像列数^[13], 在文中项目中 $M=256$, $N=1000$ 。

为了比对本方法的便捷性, 通过对比同一图像数据处理工程师编写实现的三个方法在对相同的 5 组图像数据进行坏像元识别时所附加消耗的时长 (见表 1, 运算用计算处理平台相同), 考核处理防范的便捷性。方法 1: 记作 M_1 , 代表文中提出的模板法; 方法 2: 记作 M_2 , 同一软件设计师参考标准流程编写的“滑动窗口法”; 方法 3: 记作 M_3 , 同一设计师参考标准流程编写“图像差分域识别法”。附加时间指的是, 软件不识别短波红外图像用时与读入并遍历显示一遍对应图像数据进行坏像元识别所额外占用的附加时间, 所增加的额外附加时间。

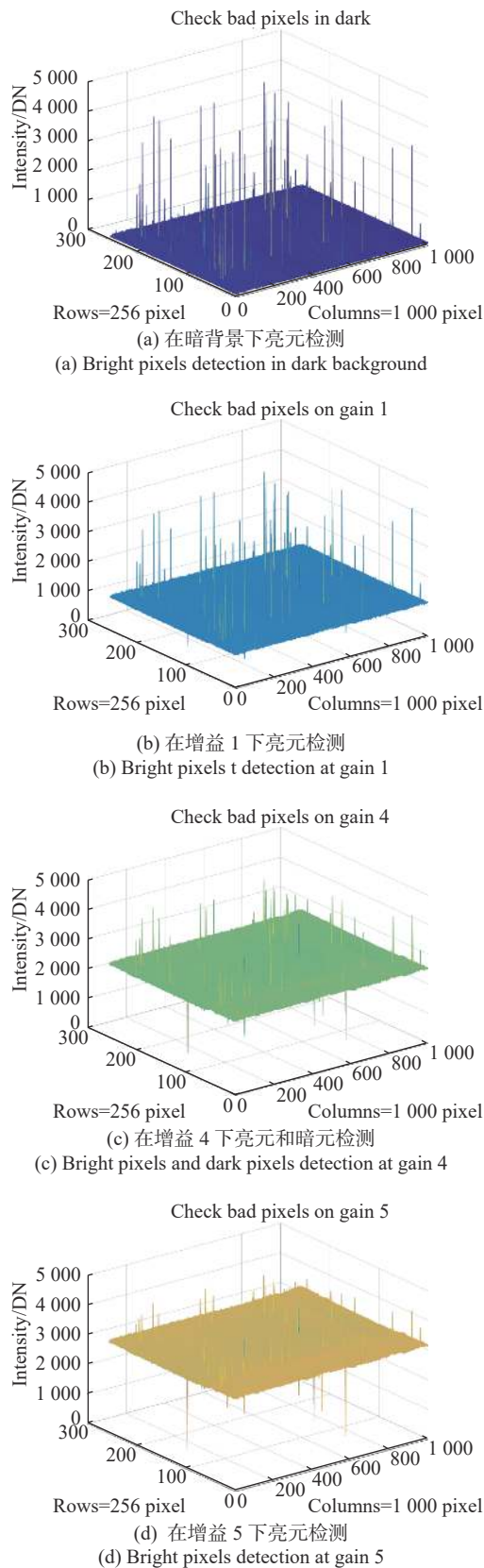


图 10 高速高光谱成像仪不同增益下亮元及暗元检测

Fig.10 Bright pixels and dark pixels recognition for high speed hyperspectral imager at different gains

表 1 采用短波红外图像三种方法检测坏像元的附加用时对比

Tab.1 Comparing additional times of three bad pixels detection methods using in SWIR images

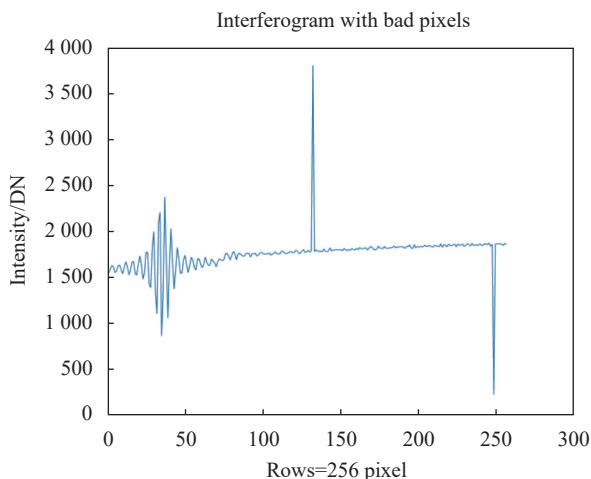
Image data#	Time of M ₁ /s	Time of M ₂ /s	Time of M ₃ /s
Data1	2.283	9.573	12.796
Data2	2.265	9.591	12.889
Data3	2.236	9.599	12.989
Data4	2.267	9.577	12.799
Data5	2.273	9.594	12.896

3 坏像元修正测试

对按照设定模板识别并分类的坏像元中的暗点像元和亮点像元进行了修正,以验证坏像元识别及分类的有效性。

按照之前筛选检测生成的坏像元坐标文件,对图像中暗点像元和亮点像元进行了修正,修正方法选取工程中常用的拟合插值替代法^[14-15]。大孔径干涉成像高光谱图像在修正坏像元时沿干涉曲线方向(列)进行拟合插值替代,采用分段二次函数拟合的方法。

修正前各列典型的坏像元对本列干涉图曲线影响见图 11 (a)~(c),修正后的 LASIS 图像结果见图 11 (b)。图 11 (a) 是增益 3 下识别的第 486 列的两个坏像元(标记为 1#、2#), (c) 是第 605 列的坏像元修正后的列干涉图。测试结果及工程应用表明:文中提出的坏像元检测方法,具有实用性强、工程开支成本低、方法便捷等优点。



(a) 暗点和亮点坏像元影响

(a) The influence of dark spots and bright spots bad pixels on interferogram curve

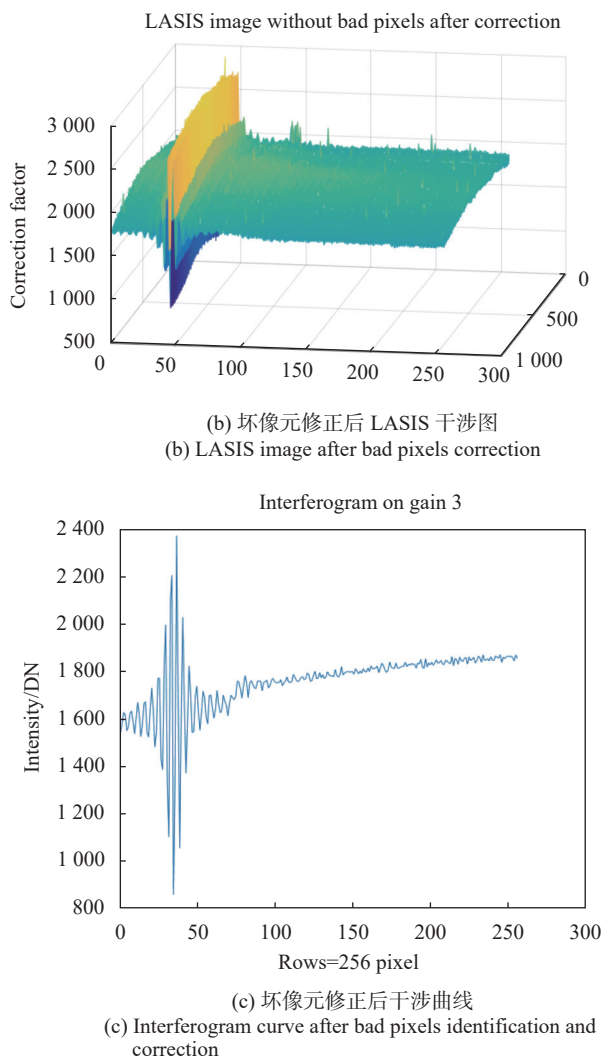


图 11 坏像元对大孔径干涉成像短波红外光谱图像干涉图的影响
Fig.11 The influence of bad pixels on the short wave infrared spectral image of large aperture interference imaging

4 结 论

大面阵制冷型碲镉汞短波红外焦面探测器在星载遥感干涉成像高光谱成像仪中的广泛应用,使得其坏像元对光谱复原的影响问题变得日益显著。文中结合大孔径干涉成像高速高光谱成像仪研制的工程化流程,提出了一种新的低成本的增益模板+帧频模板的坏像元检测方法,经过广泛验证,结果表明该方法效率高成本低,为有效矫正坏像元提供了便利,使得从干涉图到光谱数据立方体的提取更高效准确。目前作者已在具体遥感高光谱成像项目中实际使用该方法,方法的工程化应用大大提升了短波红外干涉

成像高光谱成像仪遥感业务的可靠性,为遥感用干涉成像高光谱成像仪的规范化提供了参考。

参考文献:

- [1] Chen Jianjun, Cui Jicheng, Liu Jianan, et al. Correction technology of HgCdTe short-wave infrared focal plane arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0204001. (in Chinese)
- [2] Li Yingying, Zhao Yongchao, Wu Hao, et al. Detection and correction of bad pixels in large aperture static imaging spectrometer [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, 36(5): 76-82. (in Chinese)
- [3] Yu Yi, Chang Songtao, Wang Min, et al. Fast non-uniformity correction for high dynamic infrared radiometric system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 2315-2319. (in Chinese)
- [4] Huang Fuyu, He Yongqiang, Zhou Bing, et al. A new method of bad pixels detection based on SWIR FPA [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(11): 611-614. (in Chinese)
- [5] Li Qian, Yuan Yan, Cao Jun. Bad pixel correction in temporally and spatially modulated fourier transform imaging spectrometer [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(6): 76-84. (in Chinese)
- [6] Wang Rongbin, Zeng Chao, Jiang Wan, et al. Terra MODIS band 5th stripe noise detection and correction using MAP-based algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 273-277. (in Chinese)
- [7] Huang Fuyu, He Yongqiang, Zhou Bing, et al. A new method of bad pixels detection based on SWIR FPA [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(10): 611-614. (in Chinese)
- [8] Hu Mingpeng, Ma Dongmei, Liu Zhixiang, et al. Study of IRFPA non-effective pixel discrimination [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29(2): 184-187. (in Chinese)
- [9] Zhang Jinyue, Lv Junpeng, Ni Zhenhua. Highly sensitive infrared detector based on a two-dimensional heterojunction [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(1): 87-96. (in Chinese)
- [10] Li Yanjun, Cui Ruiqing, Zhao Guilian, et al. A new method of bad pixel detection and compensation of IRFPA [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(1): 51-52. (in Chinese)
- [11] Lai Rui, Liu Shangqian, Zhou Huixin, et al. A new method of bad pixel detection and compensation of IRFPA [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, 26(3): 51-52. (in Chinese)
- [12] Liang Chao, Ma Tianxiang. Design of infrared imaging

- nonuniformity correction system based on black body calibration [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 385-392. (in Chinese)
- [13] Zhang Changxing, Liu Chengyu, Qi Hongxing, et al. Blind pixel detection algorithm using spectral matching for thermal infrared hyperspectral imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0104002. (in Chinese)
- [14] Zhu Shuangshuang, Wu Yang, Zou Peng, et al. Environmental adaptability analysis and performance optimization of space-borne infrared detector assembly [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0204001. (in Chinese)
- [15] Huang Liang, Li Mingxuan, Lv Hengyi, et al. Large-range and high-resolution temperature measurement system for satellite-borne infrared detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(11): 2315-2319. (in Chinese)