

提高短波红外光谱仪信噪比的均衡曝光技术

王礼庆^{1,2}, 陈小文¹, 李春来¹, 李飞飞¹

(1. 中科院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对短波红外焦平面光谱仪传统曝光方式在一大类应用场景中的不足之处, 提出了一种提高短波红外焦平面光谱仪成像信噪比的均衡曝光技术: 即给予焦平面上不同光谱维以不同的积分时间来提高整个焦平面的成像信噪比。实验系统包括中科院上海技术物理研究所自主研制的短波红外焦平面探测器、探测器驱动电路、信号采集与处理电路、上位机软件等。实验对比了 3.31 ms、5.76 ms、8.22 ms、10.68 ms、13.14 ms 这 5 档积分时间的信噪比及其对比, 经过测试, 在忽略驱动及读出电路噪声的情况下, 实验值与理论值接近, 该技术有效提高了红外光谱仪成像信噪比。

关键词: 短波红外; 光谱仪信噪比; 均衡曝光

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2020)07-0618-06

A Balanced Exposure Technique to Improve the Signal to Noise Ratio of a Shortwave Infrared Spectrometer

WANG Liqing^{1,2}, CHEN Xiaowen¹, LI Chunlai¹, LI Feifei¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The traditional exposure methods of shortwave infrared focal plane spectrometer have shortcomings in a variety of applications. This paper proposes a balanced exposure technique to eliminate these shortcomings. To improve the signal to noise ratio of the spectrometer, different spectral dimensions are given different integral times. We built an experiment system that included a shortwave infrared focal plane detector, a driver circuit, a signal acquisition and processing circuit, and PC software. The results of five different integral times (3.31 ms, 5.76 ms, 8.22 ms, 10.68 ms, 13.14 ms) and the contrast between them are close to the theoretical values. We conclude that this exposure technique can significantly improve the signal to noise ratio.

Key words: short-wave infrared, signal to noise ratio of spectrometer, balanced exposure technique

0 引言

短波红外 (short-wave infrared, SWIR) 一般是指波长范围在 0.9~1.7 μm 的红外光, 有些文献中也把 0.7~2.5 μm 的红外波段称为短波红外^[1-2]。在光谱分析技术中经常使用物质的红外光谱, 其中用来获取目标物体短波红外光谱分布的仪器就是短波红外成像光谱仪。目前常用的红外光谱仪在焦平面上置的光学系统中通常会有一个分光系统, 是红外光谱仪中的关键部件。

入射辐射经过分光器件之后, 在红外焦平面上以波长顺序分布。同时, 红外焦平面上的探测元对入射

辐射积分, 激发形成信号电子, 由读出电路收集后得到信号电平, 这样便得到了入射到红外焦平面上的光谱图像。

光谱分析需要的数据由成像光谱仪获取, 因此获取的数据的精确性对成像光谱仪的性能要求较高, 评价红外光谱仪性能的参数主要有: 光谱响应范围、光谱分辨率、动态范围、信噪比等。其中信噪比是一个非常重要的参数, 它直接反映了红外光谱仪对入射辐射响应的灵敏度, 因此提高红外光谱仪的信噪比具有非常重要的意义^[1], 本文针对传统红外光谱仪在曝光阶段的缺点提出了一种均衡曝光技术, 旨在提高短波红外焦平面光谱仪的成像信噪比。

收稿日期: 2018-02-08; 修订日期: 2020-07-06.

作者简介: 王礼庆 (1992-), 男, 浙江衢州人, 硕士研究生, 主要研究方向为短波红外焦平面信息获取技术。E-mail: 1007443819@163.com.

通信作者: 陈小文 (1975-), 男, 副研究员, 主要从事红外成像及信息获取方面的研究, 长期进行探测器驱动、信号获取及大数据量采集方法等方面的工作。E-mail: chenxiaowen@mail.sitp.ac.cn.

1 均衡曝光的概念及适用场景

在参考文献[1]和[2]中,我们可以看到,红外光谱仪的成像信噪比随积分时间增大而增大。那么,在设计光谱仪时,我们总是希望积分时间尽可能大,使得成像信噪比也尽可能大。然而,在传统的短波红外焦平面光谱仪设计中,整个焦平面的所有探测元:不管是接收波长较长的辐射的探测元还是接收波长较短的辐射的探测元,它们都具有一样的积分时间。

众所周知,太阳光谱在短波红外波段能量随着波长增加而降低,如图 1(a) solar (太阳光谱) 所示。

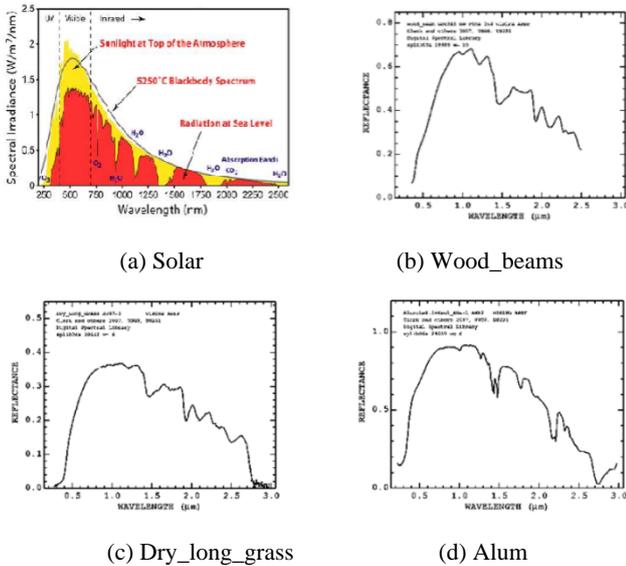


图 1 太阳、新松木梁、干燥草地和明矾石光谱图^[3]

Fig.1 Spectrum of Solar, wood beams, dry grass and alum

在部分应用场景中,需要探测的是反射太阳辐射的物质的光谱,例如星体表面物质的红外光谱:常见的地表、月球表面、火星表面的矿物质和植被等。这些物质的红外光谱大多来源于反射太阳辐射,因此这类光谱在短波红外波段的总体趋势总是接近于太阳光的光谱,即在短波红外波段能量也是随着波长增加而减少,只是不同的物质之间的波峰波谷位置存在差异。美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)曾对许多地物和矿物进行了光谱反射率测量并且制作成了光谱谱库,通过谱库可以看到,许多地物和矿物在短波红外波段的光谱总体趋势是和太阳光谱一致的。比如图 1(b)所示的 wood_beams (新松木梁光谱),图 1(c)所示的 dry_long_grass (干燥草地光谱),图 1(d)所示的 alum (明矾石光谱)等^[3](更多样本见 USGS 网站: <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html>)。

由中科院上海技术物理研究所担任研制的火星矿物光谱分析仪也是应用在上述场景中,光谱仪在火

星轨道上探测火星表面矿物质的光谱,和地表矿物一样,火星表面矿物质的光谱也来源于对太阳光的反射,因此其大多数光谱也具有上述特征。那么,在分光后,光谱各个波段在焦平面不同的光谱维同时积分,在焦平面各个光谱维的积分时间相同的情况下,就产生了一个不尽人意的缺点:若是焦平面的积分时间过长,波长长的波段信噪比如我们希望的那样提高了,但是波长短的波段则会产生过饱和;相反,若焦平面的积分时间过短,那么波长长的波段信噪比就不够高。在这种情况下,我们只能选择一个适中的积分时间:在保证波长短的波段不产生过饱和的前提下,尽量提高积分时间。针对这一缺陷,本文提出一种均衡曝光技术:即在焦平面不同的光谱维区域给予探测元不同的积分时间,接收波长较短波段的区域积分时间较短,接收波长较长波段的区域积分时间较长,使得各个光谱维区域最终积分得到的能量趋于平衡,同时也增加了波长较长区域的积分时间,提高了这些区域的信噪比,进而有效增加短波红外光谱仪的成像信噪比。

2 红外光谱仪信噪比与积分时间的关系

目前有 3 种常用方法可以计算光谱仪探测器的信噪比,分别是比探测率法、基于电流的信噪比计算法以及基于量子效率的计算方法——等效电子法。比探测率法通过探测器的比探测率计算信噪比,适用于传统的基于单元和多元的光导型探测器的成像光谱仪的信噪比计算;基于电流信噪比的计算方法使用探测器的信号电流和噪声电流之比来计算信噪比,适用于传统的基于单元和多元的光伏型探测器(如光电二极管)的成像光谱仪的信噪比计算;等效电子法则是通过计算探测器产生的信号电子数和噪声电子数之比来计算信噪比,比较适用于 CCD 探测器和本文实验中所用的红外焦平面探测器的成像光谱仪信噪比计算^[2]。下面详细介绍等效电子法。

等效电子法需要计算出红外焦平面探测器工作时产生的总的信号电子数和总的噪声电子数,其中总的信号电子数由式(1)^[1-2]计算得出:

$$N_{\text{signal}} = \frac{P(\lambda)T_{\text{int}}\lambda\eta(\lambda)}{hc} \tag{1}$$

式中: $P(\lambda)$ 表示焦平面像元上接收到的光谱辐射功率; T_{int} 表示焦平面探测元的积分时间; $\eta(\lambda)$ 表示焦平面的光谱量子效率; h 是普朗克常数; c 为光速。由式(1)可得出,总的信号电子数与积分时间成正比。总的噪声电子数则由两部分组成,分别是散粒噪声电子数和读出噪声电子数,两者是不相关的,所以总的噪声电

子数可以表示成这两种噪声电子数的如式(2)^[1-2]的形式:

$$N_{total} = \sqrt{N_{shot}^2 + N_{read}^2} \quad (2)$$

式中: N_{read} 表示读出噪声电子数, 是由红外焦平面探测器读出电路以及后续的实验中的信号采集、处理电路引进的噪声电子数, 与积分时间无关; N_{shot} 表示探测器的散粒噪声电子数, 是由照射到红外焦平面上的光子起伏以及光生载流子流动的不连续性和随机性而形成载流子起伏变化引起的, 其包括目标信号光的光子噪声, 背景光的光子噪声和暗电流的散粒噪声。因此散粒噪声电子数可表示为如式(3)^[1-2]:

$$N_{shot} = \sqrt{N_{signal} + N_b + N_{dark}} \quad (3)$$

式中: N_b 是由背景光产生的电子数, 其表达式与式(1)相仿, 只是将 $P(\lambda)$ 改成由背景辐射产生的光谱辐射功率即可; N_{dark} 表示暗电流产生的电子数, 可由式(4)^[1-2] 得出:

$$N_{dark} = \frac{I_{dark} T_{int}}{q} \quad (4)$$

式中: I_{dark} 为暗电流; T_{int} 表示焦平面探测元的积分时间; q 表示电量。

因此, 由式(1)~(4)就可以得到等效电子法计算信噪比的公式^[1-2]如式(5):

$$SNR = \frac{N_{signal}}{N_{total}} = \frac{N_{signal}}{\sqrt{N_{signal} + N_b + N_{dark} + N_{read}^2}} \quad (5)$$

由以上分析可以看出, N_{signal} 、 N_b 和 N_{dark} 均与 T_{int} 成正比关系, 而 N_{read} 与 T_{int} 无关, 则由式(5)可以得出: SNR 随着 T_{int} 增大而增大, 并且若是忽略 N_{read} 即读出噪声电子数时, SNR 与 $T_{int}^{1/2}$ 成正比关系。文献[4]中图3也给出了某国产 640×512 中波凝视型制冷焦平面探测器的积分时间与信噪比之间的关系。

那么, 未使用均衡曝光时, 在引言中所述的应用场景下, 某个积分时间 T_{int} 下得到的信噪比为 $SNR(\lambda)$,

且随 λ 增大而递减, 即 $SNR(0.7)$ 最大, $SNR(2.5)$ 最小。使用均衡曝光后, 在理想情况下, 即各个光谱维的积分时间均根据其波长不同设置不同的值, 使之满足各个光谱维积分得到的能量同时到达饱和, 此时的信噪比最高。例如在一种较为简单的理想情况下: 忽略读出噪声, 并且未使用均衡曝光时在 T_{int} 时原始信噪比 $SNR(\lambda)$ 与 λ 成反比。此时, 设置积分时间 $T(\lambda)$ 使之满足如式(6)所示:

$$0.7\sqrt{T(\lambda)} = \lambda\sqrt{T_{int}} \quad (6)$$

此时, 得到的仿真后的信噪比如图2所示。

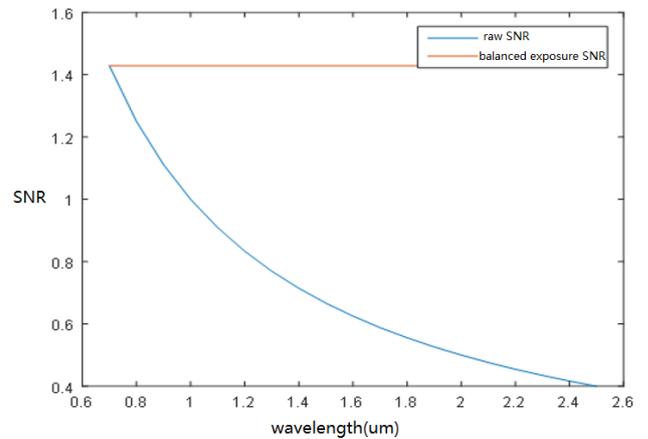


图2 理想状态下的仿真图

Fig.2 Simulated result under ideal conditions

3 实验方案

实验方案框架^[5-7]如图3所示。

实验系统主要由光学镜头、分光器件、红外焦平面组件、FPGA 测试板、FPGA 软件和上位机组成。红外焦平面组件使用的是中国科学院上海技术物理研究所自主研发的 CQ1301-640×512 型短波组件, 波长响应范围 0.9~2.5 μm , 输出信号路数为 4、2、1 可选, 中心距为 25 μm , 电荷容量为 0.2 Me 和 2.5 Me 两档。并且可以选择开窗操作, 读出任意位置和大小矩形窗口图像。在实验中采用分帧采集然后合成的技

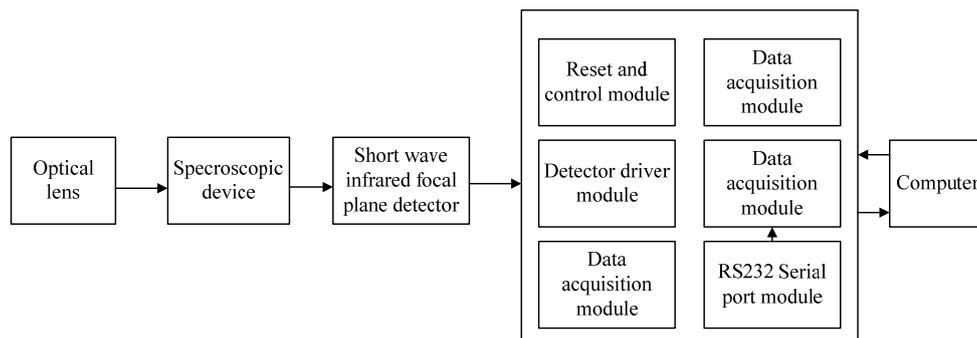


图3 实验方案框图

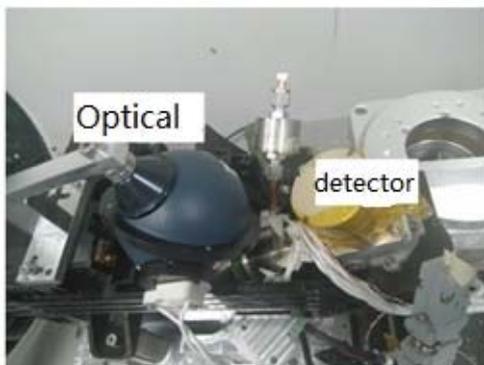
Fig.3 Experimental scheme block diagram

术手段模拟上述提到的均衡曝光,即连续3帧为一个周期,在一个周期中第一帧、第二帧、第三帧给予探测器3个不同的积分时间,并在每一帧中分别读取焦平面上相应的1/3帧图像,最后在FPGA软件的RAM里通过拼帧操作将3部分拼成一整帧图像。实验中采用的帧周期为50ms,因此采用上述的方案验证,实际的帧周期为150ms,如图4所示(上方的是FSYNC帧同步信号,低电平为积分时间,下方的是探测器输出图像模拟信号)。图5为探测器、光学系统、FPGA测试板实物图。



图4 FSYNC和探测器输出图像模拟信号

Fig.4 FSYNC and detector output image analog signals



(a) Optical system and detector



(b) FPGA test board

图5 探测器和光学系统以及FPGA测试板实物图

Fig.5 Detector and optical system and FPGA test board physical map

分光方式选择光栅分光方式(双闪耀光栅),利用光栅的衍射效应分光。FPGA测试板包括探测器驱动电路、信号采集与处理电路等,探测器驱动电路产生探测器所需的供电、偏压以及驱动时序脉冲,探测器输出图像模拟信号经双运放调理后使用ADC转换为14bit并行数字信号,再由FPGA采集图像数字信号,经过拼帧缓存等操作,最后输出到上位机上。对应的FPGA软件系统也包括6大模块:①探测器驱动时序模块(FSYNC、LSYNC、DATA、CLK、RESET_B);②ADC驱动及数据采集模块,ADC采用TI公司的THS1408,最高采样速率为8MSps,转换结果为14bit并行输出,模拟信号输入端为差分输入,范围为-2V~+2V,实验中采用4个ADC4路并行转换输出;③RAM缓存及数据处理模块,4路ADC输出图像数据在这个模块里面进行拼帧缓存等操作;④VHDCI68接口数据传输模块,此接口是与NI公司的PCIe-6537B图像采集卡匹配的数据传输接口;⑤RS232串口模块,用来发送控制指令:探测器上电、下电及积分时间(FSYNC低电平即为积分时

间)等;⑥全局复位及控制模块。

上位机系统实现图像数据的保存显示,以及盲元补偿^[8]和非均匀性校正等处理。

4 实验结果与分析

相关实验结果如图6和表1所示。实验中使用火星矿物光谱分析仪验证件产品,分别测试3.31ms、5.76ms、8.22ms、10.68ms、13.14ms这5档积分时间的信噪比及其对比。信噪比计算方案为:首先采集100帧图像数据,计算100帧图像中同一位置的像素点的平均值为信号值(去除背景后),然后计算100帧图像中同一位置的像素点的标准差为噪声值,然后信号值除以噪声值得到信噪比^[9]。由于光谱仪所用的探测器存在瑕疵:即随着入射光的增强,图像四边会快速饱和并向中心区域快速扩散,如图7所示,造成第3块积分时间区域(图7中从上到下第3块区域)图像有效区域太小,并且由于视场较小的原因有效的光谱区域并未充满整个焦平面,因此只计算第一块和第二块积分时间中接收到光谱辐射信号的部分区域的结果。

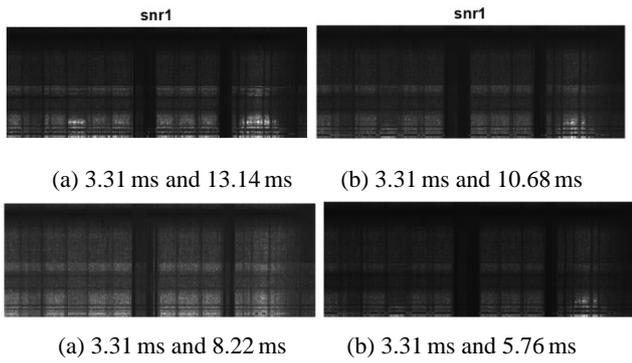


图6 4种积分时间和信噪比关系

Fig.6 Four integration time and signal to noise ratio relationship

表1 4个区域的积分时间和信噪比关系

Table 1 Integration time and signal-to-noise ratio of four regions

Integration time/ms	Signal to noise ratio
3.31 and 13.14	The upper part is 3.31 ms
	The lower part is 13.14 ms
	SNR in 3.31 ms area: 93.3818
	SNR in 13.14 ms area: 203.5633
3.31 and 10.68	The upper part is 3.31 ms
	The lower part is 10.68 ms
	SNR in 3.31 ms area: 102.3270 SNR in 10.68 ms area: 190.3640
3.31 and 8.22	The upper part is 3.31 ms
	The lower part is 8.22 ms
	SNR in 3.31 ms area: 112.4494 SNR in 8.22 ms area: 180.7088
3.31 and 5.76	The upper part is 3.31 ms
	The lower part is 5.76 ms
	SNR in 3.31 ms area: 102.3270 SNR in 5.76 ms area: 135.9743

上述实验时间选择在中午12时~2时,这一时间段太阳光充足,有利于获取足够的信号值。在积分时间为10ms时光谱扫描得到的成像结果如图8所示。

由上述实验结果可以看到:信噪比随着积分时间增长而增长非常明显,由实验得到的积分时间比值与信噪比比值关系图及由式(5)在忽略读出噪声的情况下计算得到的理论值对比如图9所示。

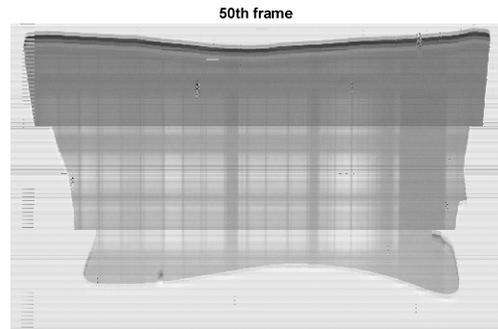


图7 探测器图像

Fig.7 Image captured by the detector

由图8可以看到,实验值与理论值基本相符,但也存在差异,差异的主要原因由两方面造成:①理论值是在忽略了电路读出噪声的情况下计算出来的,与实际情况略有不同;②理论值由式(5)得到,即两个不同积分时间区域的理论值除了积分时间不一样之外,其他的因素包括光谱辐射功率等都是相同的,然而实验中由于光谱仪中存在分光系统,那么两个不同积分时间区域接收到的光谱辐射功率必然存在差异,导致实验结果与理论值略有差异。



图8 光谱扫描成像结果(积分时间10ms)

Fig.8 Results of spectral scanning imaging (10ms)

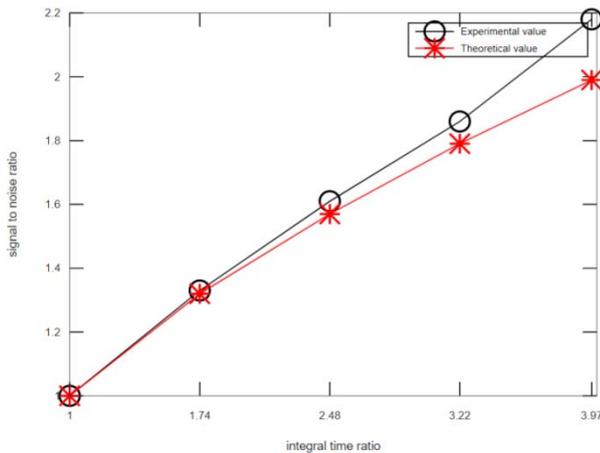


图9 积分时间比值与信噪比比值关系图

Fig.9 The relationship between integral time ratio and signal to noise ratio

5 结论

综上所述,本文的主要工作为:使用中科院上海技术物理研究所自主研发的短波红外探测器、FPGA开发板(包括探测器驱动、ADC、数据采集与处理、上位机显示灯模块的 Verilog 代码编写)和上位机搭建短波红外光谱仪系统,并验证了短波红外光谱仪的信噪比与积分时间的正相关关系,从第4章可以看到,提高系统的积分时间可以有效提高光谱仪的信噪比,因此这一均衡曝光技术(即各个不同波长的光谱段给予不同的积分时间:波长越长,积分时间越长)在探测具有类太阳光谱特性(即在短波红外区域能量随波长增加而减少)的物质的短波红外光谱时具有较高的应用价值,可以有效提高光谱仪的信噪比。

参考文献:

[1] 王建宇,舒嵘,刘银年,等. 光谱成像技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
WANG Jianyu, SHU Wei, LIU Yinian, et al. *Introduction to Spectral Imaging Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2011.

[2] 徐蒙. 短波红外焦平面探测器的信噪比计算[C]//中国空间科学学会空

间遥感专业委员会. 第六届成像光谱技术与应用研讨会文集, 2006:6.

XU Meng. Calculation of Signal-to-Noise Ratio of Short-wave Infrared Focal Plane Detector[C]//China Space Science Society Space Remote Sensing Committee. *The 6th Symposium on Imaging Spectroscopy Technology and Application*, 2006: 6.

[3] USGS. Spectroscopy Lab[EB/OL]. <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html>.

[4] 刘宁, 陈钱, 顾国华, 等. 640×512 制冷探测器积分时间与 SNR 分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 43-48.
LIU Ning, CHEN Qian, GU Guohua, et al. Integration time and SNR analysis of 640×512 refrigeration detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 43-48.

[5] 程高超, 陈小文, 王湘波, 等. 高帧频低噪声红外焦平面信息获取系统[J]. 红外技术, 2013, 35(7): 414-418, 424.
CHENG Gaochao, CHEN Xiaowen, WANG Xiangbo, et al. High frame rate low noise infrared focal plane information acquisition system[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(7): 414-418, 424.

[6] 王海英, 段娟, 任树玮. 基于 FPGA 的红外焦平面信息获取系统设计[J]. 光学与光电技术, 2014, 12(2): 74-78.
WANG Haiying, DUAN Juan, REN Shuwei. Design of infrared focal plane information acquisition system based on FPGA[J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2014, 12(2): 74-78.

[7] 李春来, 林春, 陈小文, 等. 星载长波红外焦平面成像系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2253-2260.
LI Chunlai, LIN Chun, CHEN Xiaowen, et al. Spaceborne Long Wave Infrared Focal Plane Imaging System[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2253-2260.

[8] Boltar K O, Bovina L A, Saginov L D, et al. IR imager based on a 128×128 HgCdTe staring focal arrays[C]//SPIE, 1999, 3819: 92-95.

[9] 鲁新平, 沈振康. 红外焦平面探测器输出图像信噪比计算和分析[J]. 系统工程与电子技术, 2002(4): 111-113.
LU Xinping, SHEN Zhenkang. Calculation and Analysis of Signal-to-Noise Ratio of Output Image of Infrared Focal Plane Detector[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002(4): 111-113.