

星载空间外差光谱仪探测器筛选测试方法

金 伟^{1,2,3} 陈迪虎^{1,3*} 李志伟^{1,3} 施海亮^{1,3} 洪 津^{1,3}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

²中国科学技术大学研究生院, 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

摘要 提出了一种有利于空间外差光谱仪光谱复原的探测器筛选方法。通过仿真分析确定了影响空间外差光谱仪光谱复原的探测器响应参数, 针对这些参数设计了相应的探测器筛选方法。利用设计的探测器筛选装置进行了探测器筛选实验, 对实验数据进行处理和分析, 从备选探测器中选取了最优性能的探测器。筛选测试后的探测器已经应用于星载空间外差光谱仪, 并通过了一系列实验考核。

关键词 测量; 空间外差; 面阵探测器; 光谱复原; 筛选测试; 航天

中图分类号 TN215; V19

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0904004

Screening and Testing Method of Satellite-Borne Detectors for Spatial Heterodyne Spectrometer

Jin Wei^{1,2,3} Chen Dihu^{1,3} Li Zhiwei^{1,3} Shi Hailiang^{1,3} Hong Jin^{1,3}

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²Graduate School of University 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

Abstract In order to screen a high-performance detector for spatial heterodyne spectrometer, a method of detector screening and testing is proposed. Parameters of detectors which influence the spectral reconstruction of spatial heterodyne spectrometer are determined by simulations, and the screen method based on these parameters are obtained. The experiments are conducted with the designed screening and testing setup. Through processing and analyzing the experimental data, the optimal array detector is chosen from the alternate detectors. The satellite-borne detector obtained by screening and testing has already been used in the spatial heterodyne spectrometer and passed a series of test evaluations.

Key words measurement; spatial heterodyne; array detector; spectral reconstruction; screening test; aerospace

OCIS codes 120.4820; 230.0040; 040.3060; 070.4790

1 引 言

空间外差光谱技术(SHS)将光栅及空间调制干涉技术合为一体,是一种新型超分辨光谱技术^[1-2]。其主要技术优点有无运动部件及高信噪比等,可精确探测大气微量气体浓度,在星载大气遥感方面具有广泛的应用潜力^[3-4]。目前,中国科学院安徽光学精密机械研究所开展了基于该技术的大气主要温室气体的遥感探测研究^[5-8]。

随着我国载人航天工程的发展,宇航级或相当等级的关键元器件的进口受到越来越严格的限制^[9]。因

收稿日期: 2016-03-14; 收到修改稿日期: 2016-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(41301373)

作者简介: 金 伟(1992—),男,博士研究生,主要从事光电信息获取技术方面的研究。E-mail: ustcjinw@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 洪 津(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事光谱偏振遥感技术和航天遥感工程技术方面的研究。

E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: dhchen@aiofm.ac.cn

此,当没有合适的探测器时,需要根据载荷任务的具体要求和探测器的具体情况,对工业级塑封器件进行升级筛选,剔除具有缺陷或潜在缺陷的器件^[10],确保器件较高的可靠性^[11]。空间外差光谱仪采用空间干涉类型的新型超光谱分光方案,利用面阵探测器对所有干涉数据点同时进行采集,减少了数据采集时间,减轻了仪器装调压力以及降低了对卫星平台稳定性的要求^[12]。由于空间外差光谱仪获取的原始数据均是经过面阵探测器采样、量化后的灰度值,所以面阵探测器的响应特性直接决定了最初级的干涉数据质量,且空间外差光谱仪无法进行平场的相对辐射定标^[13],因此在研制阶段对空间外差光谱仪的备选探测器进行筛选有利于提高后期获得的数据质量。

目前国内关于探测器筛选的相关报道很少,参考文献^[14-16]是针对大视场空间相机的电荷耦合器件(CCD)筛选方法,适用范围有限。余达等^[17]讨论的 CCD 筛选方法适合从大量低等级探测器中筛选出光电参数符合基本需求的探测器。以上筛选工作均是从大量工业级探测器中筛选出满足工程需求的产品。本文的备选探测器都是满足工程基本需求的。为了获得更好的干涉数据,通过仿真分析,确定了对空间外差光谱仪后期光谱复原影响显著的探测器响应参数,针对这些参数设计了相应的筛选方法,选出性能最优的探测器。

2 探测器筛选依据

空间外差光谱仪采用面阵探测器同时采集所有干涉数据点,面阵探测器的响应特性直接决定了最初级的干涉数据质量,进而影响后期信息处理过程中的光谱复原质量。

2.1 探测器坏像元对光谱复原的影响

空间外差光谱仪面阵探测器往往由几十万至上百万个像元组成,材料和制造工艺的限制导致某些像元响应极大偏离正常值,这些像元即坏像元。面阵探测器的坏像元可以分为死像元和过热像元两大类。死像

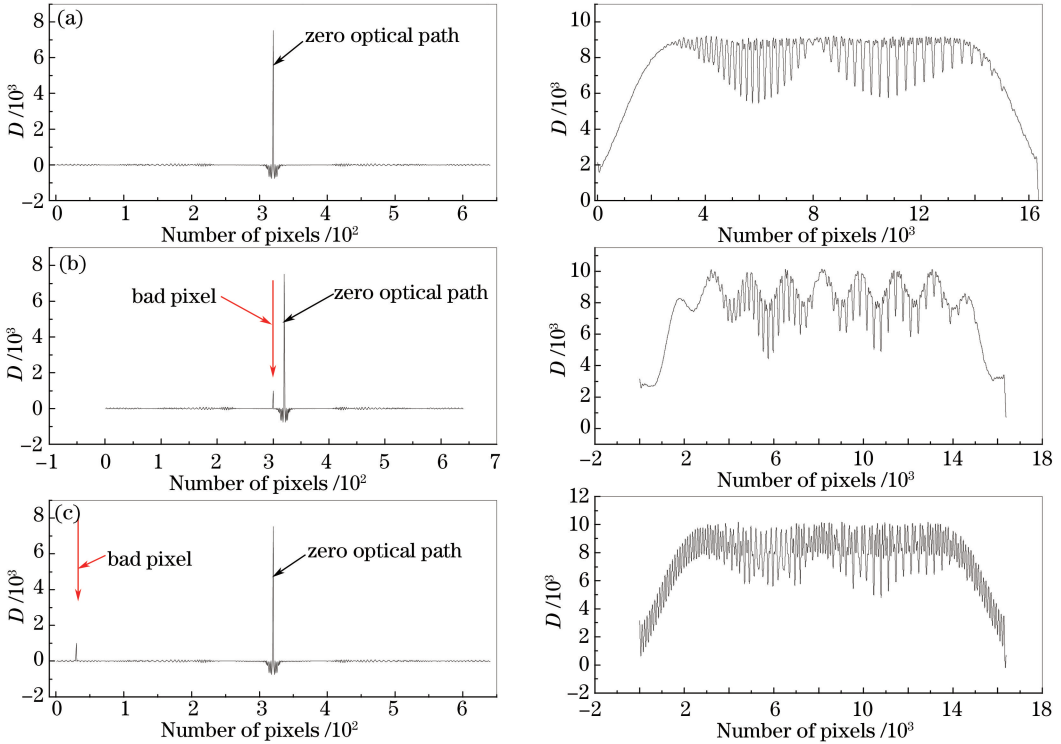


图 1 坏像元对复原光谱的影响仿真,干涉图(左)和对应光谱(右)。

(a) 理论; (b) 坏像元出现在零光程差位置; (c) 坏像元出现在远离零光程差位置

Fig. 1 Simulation of influence of bad pixels on spectral reconstruction, interference patterns (left) and corresponding spectra (right). (a) Theoretical; (b) when bad pixel is near the zero optical path difference point; (c) when bad pixel is away from the zero optical path difference point

元指像元响应率小于平均响应率的 1/10 的像元;过热像元指像元噪声电压大于 10 倍平均噪声电压的像元。坏像元对光谱复原的影响可以通过在理论干涉图中加入异常数据点来进行仿真,图 1(a)是理论干涉图和对应的光谱,图 1(b)为坏像元出现在零光程差点附近的干涉图及对应的光谱,图 1(c)是坏像元出现在远离零光程差位置的干涉图及对应光谱。零光程差点附近的坏像元引起的是光谱包络的变化(低频),而远离零光程差位置的坏像元造成的是光谱细节的变化(高频)。在其他参数不变的情况下,光程差越大光谱分辨率越高(细节明显),因此离光程差越远的点对光谱的高频影响越严重,反之则是对光谱低频影响较大。

2.2 探测器响应非均匀性对光谱复原的影响分析

探测器响应非均匀性 U 表示为

$$U = \frac{1}{\bar{D}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^N [D(x) - \bar{D}]^2}{N}}, \quad (1)$$

式中 \bar{D} 为面阵探测器输出灰度值的均值, $D(x)$ 为探测器第 x 个像元灰度值, N 为面阵探测器的像元数。探测器响应的非均匀性对干涉数据的影响可以看作乘性噪声,即每个干涉数据点乘以一个系数。对于空间外差光谱仪而言,探测器的每一行像元采集一条完整的干涉数据^[18]。对不同非均匀性噪声 U 产生的光谱数据噪声进行仿真,结果如图 2 所示。从图中可以看出,随着非均匀性噪声的增大,对光谱复原产生的偏差就越大,且空间外差光谱仪的干涉数据光谱复原对非均匀性噪声非常敏感,约 1% 的响应非均匀性噪声就会造成复原光谱平均 5% 以上的偏差。

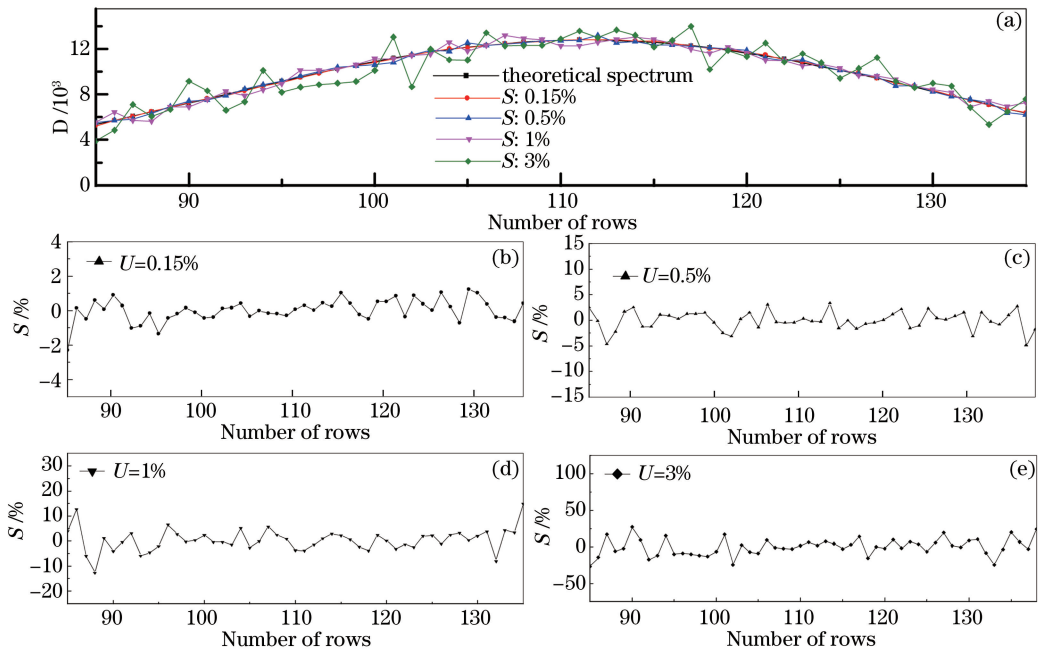


图 2 不同非均匀性噪声下的(a)光谱和(b)~(e)光谱复原产生的偏差

Fig. 2 (a) Spectra and (b)-(e) spectrum reconstruction deviations under different non-uniform noises

从以上分析可以发现,空间外差光谱仪具有超高分辨率,对探测器的非均匀性噪声异常敏感。为了降低后期光谱复原引入的噪声,必须尽可能选择非均匀性系数小的探测器。

通过上述仿真分析可知,探测器的盲元率和响应非均匀性对空间外差光谱仪后期光谱复原影响显著,因此将这两项探测器指标作为探测器筛选的重要内容。考虑到暗电流响应对系统的辐射定标精度及探测性能影响显著,在相同入射光下的响应是对探测器性能最直观的评价指标,因此将探测器的暗电流响应和特定入射光能量下的响应也作为筛选的内容。由于备选探测器均是经过挑选的高等级芯片,在出厂测试时已经通过基本的光电参数测试,因此本文将不再对探测器其他光电参数进行筛选测试。

3 探测器筛选装置及方法

3.1 探测器筛选装置

探测器筛选装置如图 3 所示,主要由高低温交变箱、避光箱、内置卤钨灯的积分球、滤光片、转接板、积分球电源以及电脑组成。高低温交变箱可以提供探测器正常工作的环境要求,温度范围为 $-70\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$;利用避光箱减小杂散光对待测探测器造成的影响;转接板用来固定待测探测器;积分球系统提供不同辐射亮度等级的均匀辐射源。

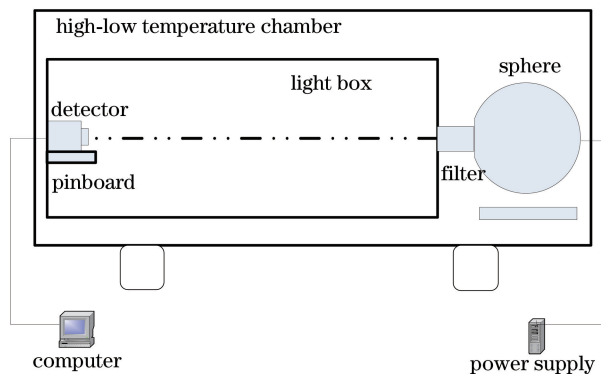


图 3 探测器筛选装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of screening of detectors

3.2 探测器筛选方法

结合空间外差光谱仪对探测器主要性能指标的需求,对近红外波段的备选探测器开展了暗电流响应、盲元率、像元响应非一致性以及特定入射能量下的响应等指标测试,响应波段截止到 $1.7\text{ }\mu\text{m}$,需考虑背景辐射。探测器测试包括无光照下测试以及特定亮度光照下测试。无光照测试流程如下:首先设置高低温交变箱的控制温度,保持温度不变;待高低温箱内温度稳定后,配置探测器参数,设置探测器积分时间为典型值;待探测器制冷稳定后,开始测试,采集 50 帧无光照下探测器输出图像。特定亮度光照下测试流程如下:探测器设置为典型积分时间,测量特定积分球输出能量下探测器输出数值;待积分球稳定后,采集 50 帧数据。保证同一类型芯片无光照及有光照的测试条件相同且探测器配置参数相同,直至所有类型芯片测量完成,具体测试流程如图 4 所示。



图 4 探测器筛选流程图

Fig. 4 Flowchart of screening of detectors

3.2.1 暗电流响应测试

暗电流响应定义为无光照条件下探测器输出 D 值。对每个芯片在无光照条件下采集到的 50 帧图像取平均,去除噪声影响,得到暗电流响应数值。

3.2.2 盲元率测试

目前,大部分盲元检测方法都是基于参考辐射源的,较常用的有基于背景和黑体的检测方法、基于双参考源的差值检测方法。考虑到空间外差光谱仪的复原光谱对坏像元极其敏感,此处采用 50% 饱和数据加窗 3δ 检测^[19]、暗电流数据与饱和数据阈值判断这三种数据综合判别坏像元坐标。

3.2.2.1 50% 饱和数据加窗 3δ 检测

均匀辐射能量照射下探测器输出的灰度图像接近正态分布,由数理统计中的 3δ 准则可知

$$p = 0.9974, \quad -3\delta \leq D(i) \leq 3\delta, \quad (2)$$

式中 p 为 3δ 值之内的概率, δ 为标准差。因此,基于这一统计特性可以把响应在平均响应灰度值 3δ 之外的

像元判断为坏像元。

具体检测步骤如下。

1) 原图像进行镜像延拓,保证探测器边缘像元也可以检测。

2) 以 (i, j) 为中心进行加窗,其中 i 为探测器像元行数, j 为探测器像元列数。滑动窗口一般是以某一像元为中心,取一个大小为 $(2n+1) \times (2n+1)$ 的矩形窗,其中 n 为半窗宽。经反复实验,在 $n=4$ 时检测精度最高,因此此处选用 9×9 的窗口,分别计算以 (i, j) 为中心像元时窗内像元均值

$$\bar{D}(i, j) = \frac{1}{9 \times 9} \sum_{k=i-4}^{i+4} \sum_{l=j-4}^{j+4} D(k, l), \quad (3)$$

和标准差

$$\delta(i, j) = \sqrt{\frac{1}{9 \times 9} \sum_{k=i-4}^{i+4} \sum_{l=j-4}^{j+4} [D(k, l) - \bar{D}(i, j)]^2}. \quad (4)$$

3) 计算中心像元灰度值 $D(i, j)$ 与均值 $\bar{D}(i, j)$ 的偏差

$$\Delta D(i, j) = |D(i, j) - \bar{D}(i, j)|, \quad (5)$$

若 $\Delta D(i, j)$ 大于 $3\delta(i, j)$,则判断此像元为坏像元。

4) 将窗口中心移到下一个像元,重新上述检测过程,直到所有探测器像元均判断完毕。

3.2.2.2 暗电流数据、饱和数据阈值检测

暗电流是指探测器在无光照条件下探测器的输出数值,而饱和数据是指探测器在满阱情况下探测器的输出数值。因此可以通过暗电流数据判断高值热像元、饱和数据判断低值死像元。此外以暗电流平均值的2倍和饱和数值的1/2分别作为高低阈值。

3.2.3 响应非均匀性(PRNU)测试

为了准确测量不同波段的像元响应非均匀性 P_{NU} ,在测量不同亮度光照条件下探测器数据时匹配相应波段的滤光片。选择特定亮度光照条件下输出的50帧图像,对这50帧图像的 D 值取平均,平均后图像减去对应无光照条件下探测器输出数据,扣除暗电流;分别计算扣除暗电流后,计算图像中间所有有效像元(盲元不参与)计算数值的方差 s_y^2 和均值 μ_y ,然后计算探测器整个感光面的非均匀性:

$$P_{\text{NU}} = \frac{\sqrt{s_y^2}}{\mu_y} \times 100\%. \quad (6)$$

3.2.4 特定入射能量下的响应

平均响应率是指探测器各有效像元响应率的平均值,在测试中用探测器各像元输出灰度值均值(去除盲元后)表示。选择特定亮度光照条件下输出的50帧图像,对这50帧图像的 D 值取平均,平均后图像减去对应无光照条件下探测器输出数据,扣除暗电流;扣除暗电流后,计算图像中间所有有效像元数值(盲元不参与)的灰度均值,将灰度均值作为特定入射能量下该芯片的响应。

4 实验结果与分析

利用上述探测器筛选装置和测试方法对4片备选探测器进行了详细的测试、分析和比较。表1所示为4片备选探测器筛选结果。在获取备选探测器的暗电流响应、响应非均匀性、盲元率以及相同入射能量下响应4项指标后,首先剔除暗电流响应和相同入射能量下响应这两个参数较差的器件,然后在剩余的备选探测器中挑选出响应非均匀性和盲元率参数较好的作为最终筛选出的探测器。因此从表1中选出编号为

表1 探测器筛选结果

Table 1 Screening results of detectors

No.	Response of dark current	Non-uniformity / %	Blind rate / %	Response
151550	2086.84	2.71	0.34	9818.61
151552	2112.56	2.58	0.36	9247.86
151554	1282.91	2.45	0.31	9802.70
151880	1397.56	2.83	0.33	9659.46

151554 的探测器作为最终应用于空间外差光谱仪的探测器,其响应非均匀性为 2.45%,盲元率为 0.31%,暗电流响应为 1282.91,相同入射能量下响应为 9802.70。

5 结 论

为了从工业级面阵探测器芯片中筛选出满足航天级要求的器件,结合空间外差光谱仪对探测器主要性能指标的需求,设计了一种探测器筛选装置,提出了一种有利于空间外差光谱仪光谱复原的探测器筛选方法。利用该装置和该筛选方法对备选探测器进行了筛选实验,通过对实验数据进行处理和分析,筛选出综合性能最优的探测器,其响应非均匀性为 2.45%,盲元率为 0.31%,暗电流响应为 1282.91,相同入射能量下响应为 9802.70。筛选出的探测器已经应用于星载空间外差光谱仪中,并通过了一系列实验考核。结果表明,筛选出的探测器满足航天应用要求。

参 考 文 献

- 1 Harlander J. Spatial heterodyne spectroscopy: Interferometric performce at any wavelength without scanning [D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 1991.
- 2 Roesler F L, Harlander J. Spatical heterodyne spectroscopy: Interferometric performce at any wavelength without scanning [C]. SPIE, 1990, 1318: 234-243.
- 3 Harris W, Roesler F, Ben-Jaffel L, *et al.* Applications of spatial heterodyne spectroscopy for remote sensing of diffuse UV-vis emission line sources in the solar system[J]. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 2005, 144: 973-977.
- 4 Christoph R E, Babcock D D, Harlander J M. Spatial heterodyne spectroscopy for long-wave infrared: First measurements of broadband spectra[J]. Optical Engineering, 2009, 48(10): 15602.
- 5 Ye Song, Fang Yonghua, Hong Jin, *et al.* System design of spatial heterodyne spectrometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(6): 959-964.
叶 松, 方勇华, 洪 津, 等. 空间外差光谱仪系统设计[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(6): 959-964.
- 6 Xiong Wei, Shi Hailiang, Wang Yuanjun, *et al.* Study on NIR spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1511-1515.
熊 伟, 施海亮, 汪元钧, 等. 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1511-1515.
- 7 Shi Hailiang, Fang Yonghua, Wu Jun, *et al.* Study on spectral calibration of a novel interferometric spectrometer with hyper-spectral capability[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0528002.
施海亮, 方勇华, 吴军等. 新型超分辨干涉型光谱仪光谱定标研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0528002.
- 8 Luo Haiyan, Shi Hailiang, Li Shuang, *et al.* Study on the performance indexes of spatial heterodyne spectrometer influenced by elements tolerances[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0330002.
罗海燕, 施海亮, 李 双, 等. 空间外差光谱仪干涉仪组件的容差分析[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0330002.
- 9 Jiang Xiujie, Sun Huixian, Wang Zhihua, *et al.* Technical overview of the electronic components selection for spacecraft [J]. Chinese Journal of Electron Device, 2005, 28(1): 38-43.
姜秀杰, 孙辉先, 王志华, 等. 航天电子系统中电子元器件选用的途径分析[J]. 电子器件, 2005, 28(1): 38-43.
- 10 Hu Shanwei, Lei Wanxing, Liu Zhe, *et al.* Plastic components for military research industrial file [J]. Electronic Component & Device Applications, 2009, 11(10): 93-95.
胡善伟, 雷婉星, 刘喆, 等. 工业档塑封元器件的军用研究[J]. 电子元器件应用, 2009, 11(10): 93-95.
- 11 Ding Jishan. Domestic semiconductor device reliability screening technique[J]. Semiconductor Technology, 1999, 24(3): 55-57.
丁继善. 国内半导体器件的可靠性筛选技术[J]. 半导体技术, 1999, 24(3): 55-57.
- 12 Hiroshi S, Kuze A, Nakajima M, *et al.* Airborne SWIR FTS for GOSAT validation and calibration[C]. SPIE, 2008, 7106: 71060M.
- 13 Li Zhiwei, Xiong Wei, Shi Hailiang, *et al.* Study on laboratory calibration of spatical heterodyne spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0430002.
李志伟, 熊 伟, 施海亮, 等. 空间外差光谱仪实验室定标技术研究[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0430002.
- 14 Li Jin, Jin Longxu, Han Shuangli, *et al.* Test system for time-delayed integration charge coupled device of remote camera with wide field of view[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2415-2423.

- 李 进, 金龙旭, 韩双丽, 等. 大视场遥感相机的时间延迟积分电荷耦合器件测试系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2415-2423.
- 15 Ye Zhao, Liu Zexun, Li Xiansheng, *et al.* Screening device of CCD spectral conformance for wide field of view space camera[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(2): 265-270.
- 叶 钊, 刘则洵, 李宪圣, 等. 用于宽视场空间相机的 CCD 光谱特性筛选装置[J]. 光电子 • 激光, 2013, 24(2): 265-270.
- 16 Li Xiansheng, Wan Zhi, Liu Zexun, *et al.* Method of CCD test and screening for space camera with wide field of view[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2245-2250.
- 李宪圣, 万 志, 刘则洵, 等. 大视场空间相机 CCD 性能测试及筛选方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2245-2250.
- 17 Yu Da, Zhou Huaide, Long Kehui, *et al.* Screening and testing method for area CCD[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0708001.
- 余 达, 周怀得, 龙科慧, 等. 一种面阵 CCD 的筛选测试方法[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0708001.
- 18 Li Zhiwei, Xiong Wei, Shi Hailiang, *et al.* Correction of detector response error for ultrahigh resolution spatial heterodyne interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0530001.
- 李志伟, 熊 伟, 施海亮, 等. 超光谱空间外差干涉仪探测器响应误差校正[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0530001.
- 19 Li Yanjun, Cui Ruiqing, Zhao Guifang, *et al.* A new method of bad pixel detectin and compensation of IRFPA[J]. Laser and Infrared, 2007, 37(1): 51-52, 65.
- 李言俊, 崔瑞青, 赵桂芳, 等. 一种新的红外焦平面阵列盲元检测方法[J]. 激光与红外, 2007, 37(1): 51-52, 65.