第 29 卷第 6 期
2010 年 12 月

红 外 与 毫 米 波 学 报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. 29, No. 6
December, 2010

文章编号:1001 - 9014(2010)06 - 0419 - 06

热红外高光谱成像系统的背景抑制和性能优化

王建宇, 徐卫明, 袁立银, 林 颖, 何志平, 刘 军
(中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083)

摘要:在分析热红外高光谱成像系统主要技术参数之间的制约关系的基础上,针对热红外高光谱成像系统目标能量微弱、背景热辐射严重等难点,提出了几种有效抑制背景辐射的措施,并建立了一套高背景抑制的热红外高光谱推帚式成像实验装置,实现了地面试验成像.根据冷背景实验结果,分析了热红外高光谱成像系统的性能和各种影响因素的关系,并提出了系统性能优化的可行性.

关 键 词:热红外高光谱成像系统; 背景辐射抑制; 性能优化
中图分类号:TN21 **文献标识码**:A

BACKGROUND RADIATION SUPPRESSION OF A THERMAL INFRARED HYPERSPECTRAL IMAGING SYSTEM

WANG Jian-Yu, XU Wei-Ming, YUAN Li-Yin, LIN Ying, HE Zhi-Ping, LIU Jun
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Based on primary parameter analysis of the thermal infrared hyperspectral imaging system, several methods were proposed to overcome the difficulties in detecting objects with low signal energy, serious thermal infrared background radiation and other problems. A pushbrooming infrared hyperspectral imaging system was developed, which can suppress the high background radiation effectively, and the ground-based imaging experiment was realized. Based on the low background experimental results, the relationship of the system performance with different factors was analyzed, and feasibility to optimize the system performance was comfirmed.

Key words: thermal infrared hyperspectral imaging system; background radiation suppression; performance optimization

引言

热红外高光谱成像系统,由望远物镜、光谱仪、背景抑制模块、探测器和辅助电路组成,工作波段一般在 8 ~ 14μm,兼具成像和精细光谱分析功能.广泛应用于化学气体流分析、水下目标探测等领域.1998 年,美国夏威夷大学研制出 AHI(airborne hyperspectral imager)[1],主要用来从空中探测地雷;1996 年,美国航空宇宙公司研制出 SEBASS(spatially-enhanced broadband array spectrograph system)[2],接收 2 ~ 14μm 的红外光谱波段辐射信息来进行固体、液体、气体以及化学蒸汽的物质识别;2006 年,美国 JPL 实验室(jet propulsion laboratory)继研制印度 Chandrayaan-1 月球卫星之 M3(Mine Mineralogical Mapper)[3]科学载荷之后,开始研制 QWEST(quantum well infrared photodetector earth science testbed)量子阱红外成像光谱仪[4].此外,还有其它一些比较有代表性的仪器[5~7].国内针对这一领域的研究开展相对滞后,主要受制于该类系统背景辐射十分严重、缺少优性能热红外面阵探测器.

1 热红外高光谱指标分析和系统设计

热红外高光谱成像系统的主要技术指标之间的制约关系可以用噪声等效温差(NETD)来表示,见式(1)[8].它是系统灵敏度的主要判据之一,集中体现系统中探测器电路、背景辐射抑制和分光等设计的优劣.

$$\mathrm{NETD} = \frac{\Delta T}{\mathrm{SNR}} = \frac{4\sqrt{ab\Delta f_n}}{\alpha\beta D_O^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^* \dfrac{\partial W_\lambda(T)}{\partial T} \tau_a \tau_O \mathrm{d}\lambda} \quad , \quad (1)$$

收稿日期:2009 - 10 - 25,**修回日期**:2010 - 06 - 04
Received date: 2009 - 10 - 25, **revised date**: 2010 - 06 - 14
基金项目:国家 863 高技术研究发展计划(2007AA12Z104)资助
作者简介:王建宇(1959-),男,浙江宁波人,研究员,博士生导师,主要研究领域为光电遥感系统,信息获取与处理技术,E-mail:jywang@ mail.sitp. ac. cn.

式(1)中,ΔT 为背景与目标的温度差,ab 为探测器敏感元面积,Δf_n 为噪声等效带宽,$\alpha\beta$ 为探测器敏感元的瞬时视场,D_0 为光瞳口径,D^* 为探测器探测率,$W_\lambda(T)$为目标光谱辐射出射度,T 为环境温度,τ_a 为大气透过率,τ_0 为光学系统传输效率.

该实验装置技术指标见表(1).

表 1 热红外高光谱成像实验装置指标

Table 1 Specifications of the infrared hyperspectral imaging system

指标名称	预期指标	设计指标
光谱范围	8.0 ~ 12.0μm	7.7 ~ 9.3μm(依探测器响应光谱范围而定)
波段数	≥32	32
光谱分辨率	≤80nm	约 54nm
瞬时视场	≤1mrad	0.75mrad
总视场	≥10°	12°
光学口径		20mm
系统等效焦距		40mm
等效噪声温差 NETD	0.3K	0.3K(经计算和实验多数波段可以达到)

系统以推帚方式成像,并采用法国 Sofradir 制冷型面阵探测器,主要指标见表 2.

表 2 碲镉汞制冷型面阵探测器参数

Table 2 Parameters of the HgCdTe FPA

光谱范围	像元数	像元大小	冷屏 F 数	像元填充率
7.7 ~ 9.3μm	320 × 256	30μm × 30μm	2	90% 以上

计算得出系统大多数波段的噪声等效温差优于 0.3K.

2 提高热红外高光谱系统性能的方法

依据普朗克定律,得到单位时间和面积发射的 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段的辐射能为

$$W_{\Delta\lambda}(T) = \varepsilon \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda \quad , \qquad (2)$$

式中,辐射常量 $c_1 = 3.742e\text{-}4 W \cdot \mu m^2$, $c_2 = 1.439e4 \mu m \cdot K$,$\varepsilon$ 为表面发射率. 以下的仿真计算以此为依据,进行热红外高光谱系统的背景辐射分析.

2.1 热红外背景抑制

2.1.1 冷屏设计

热红外探测器组件不设置冷屏时,结构背景辐射示意图如图 1 所示. 经计算,常温下,光敏面接收到的背景辐射(7.7 ~ 9.3μm)约为 2.4×10^{-3} W/cm^2.

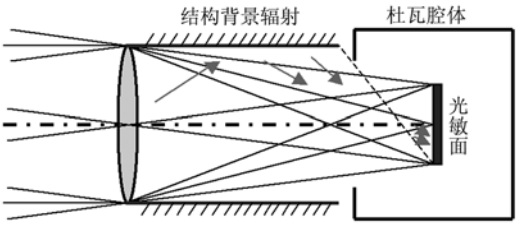


图 1 无冷屏时结构背景辐射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of background radiation without cold shield

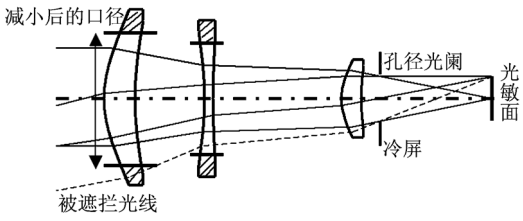


图 2 减小前方镜片尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reducing glass diameter

红外探测器组件的冷屏 F 数为 2,口径Ø10.6mm. 为尽量少接收到背景辐射,系统出瞳与探测器冷屏匹配. 光学系统加入冷屏后,见图 2,光敏面接收到的其前方可视结构件在热红外(7.7 ~ 9.3μm)波段所产生的背景辐射可降低约为 7.2×10^{-4} W/cm^2,是无冷屏时的 30%.

为降低光学系统复杂性,减小光学件尺寸,提高光学效率,系统出瞳与探测器冷屏位置完全匹配后,适当减小光学镜片口径,允许轴外视场有部分渐晕,如图 2 所示.

2.1.2 降低光机表面的发射率

当机械件内壁表面发射率从 0.9 到 0.1,光敏面上的平均辐照度与机械件内壁的表面发射率成线性关系,光机内表面的吸收率越低,背景辐射越低,但只在同一数量级内变化,如图 3 所示. 可对机械件内壁抛光亮化处理,并镀金膜.

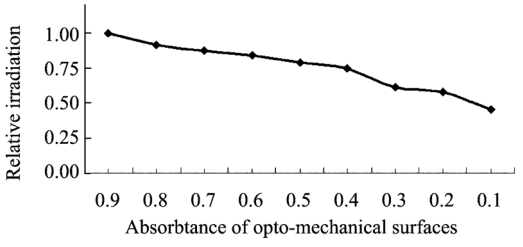


图 3 不同表面吸收率对应的背景辐射

Fig. 3 Background irradiation as different surface absorbance

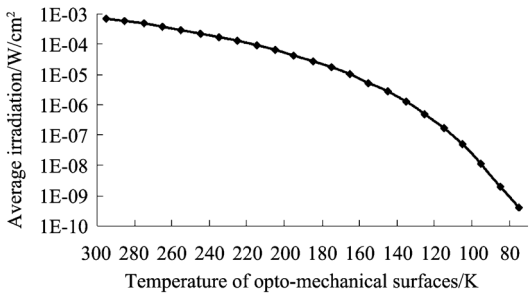


图 4　不同光机系统温度对应的背景辐射
Fig. 4　Background irradiation at different temperature

2.1.3　系统制冷

光机系统降温过程中,探测器光敏面上的平均辐照度由 300K 时的 7.24e-4W/cm^{2}降低到 150K 时的 0.06e-4W/cm^2,约降低至 300K 时的 1/120,如图 4 所示. 温度对背景辐射的影响很大,制冷光机系统是抑制系统背景辐射最有效的手段.

2.1.4　滤光片滤波

红外焦平面接收到的目标信号的辐射是经过光栅色散开的很窄的光谱带内的信号,而接收到的背景辐射主要来自前方光机系统内表面的全光谱热红外辐射,杂乱无序. 探测器窗口前置入窄带滤光片,若其中心波长与光谱通道的中心波长一致,带宽接近系统光谱分辨率,则这个光谱通道上的背景辐射会大大削弱. 半带宽为 54nm 的热红外带通滤光片,对应中心波长的光谱通道所接收的目标信号的辐射会减弱到原来的 80%(透过率),而接收的背景辐射会减弱到原来的 5.3%,即信号与背景比值会提高 15 倍. 半带宽为 120nm 的热红外带通滤光片,信号与背景比值会提高 6.7 倍.

2.2　探测器性能提高

用探测器比探测率 D^* 衡量探测器性能,它可真实反映探测器工艺的优劣. 光伏型探测器单色 D^* 的理论极大值是

$$D_\lambda^* = \frac{\sqrt{2}\lambda}{2hc}\left(\frac{\eta}{Q_b}\right)^{1/2} = 3.56\times10^{18}\lambda\left(\frac{\eta}{Q_b}\right)^{1/2}, \quad (3)$$

式(3)中,h 为普朗克常数,c 为光速,λ 为波长,η 是量子效率,Q_b 是半球背景光子辐射发射量. 通过制冷降低背景光子辐射发射量,提高探测器性能,有利于降低系统 NETD 值.

式(1)中 ab 为探测器敏感元面积,若系统的空间分辨率恒定不变,单个敏感元的面积减小,则系统 NETD 值降低. 另外,相同探测器光敏面面积内的敏感元数量增多,系统视场增大.

2.3　数据预处理

2.3.1　背景消除

焦平面敏感元的输出包含暗电压、目标信号、背景辐射及探测器偏置四个部分. 常温下,除去探测器偏置,暗电压和背景辐射是探测器输出电压的主要成份,目标信号与其相比十分微弱,几乎被淹没在背景中. 而暗电流、背景辐射与积分时间是线性关系,在一定温度和一定积分时间的条件下暗电流和背景辐射能量是固定的,因此可以考虑用“减背景”的方法去除背景辐射的影响,突出目标信号.

2.3.2　基于光谱通道的非均匀性校正

(1) 坏点去除

在校正前剔除以下几种情况的坏点像元(1)响应率过高或者过低的点;(2)响应波动太大的点;(3)响应不变的点,即盲点.

(2) 非均匀性校正

假设探测器的响应象元是线性的,各敏感元的响应特性可描述为

$$S_{ij}(\varphi) = K_{ij}\varphi + Q_{ij}, \quad (4)$$

φ 为投射到第(i,j)探测单元上的辐照度,K_{ij}和 Q_{ij}分别表示探测器响应特性的增益系数和偏移. 非均匀性即是由于各探测单元参量 K_{ij}、Q_{ij}不同所致.

两点校正法是选定两个辐照度 φ_1,φ_2 作为校正定标点,用高低温黑体进行定标后,计算得出$\overline{S_1}$和$\overline{S_2}$,对每个探测器单元得到 $S_{ij}(\varphi_1)$和 $S_{ij}(\varphi_2)$,以($S_{ij}(\varphi_1)$,$\overline{S_1}$)和($S_{ij}(\varphi_2)$,$\overline{S_2}$)确定的直线求出 K_{ij}和 Q_{ij},得出输出值与校正值的关系为

$$S'_{ij}(\varphi) = K_{ij}S_{ij}(\varphi) + Q_{ij}, \quad (5)$$

其中$K_{ij} = \dfrac{S_{ij}(\varphi_2) - S_{ij}(\varphi_1)}{\overline{S_2} - \overline{S_1}}$,

$$Q_{ij} = \frac{S_{ij}(\varphi_2)\,\overline{S_1} - S_{ij}(\varphi_1)\,\overline{S_2}}{\overline{S_2} - \overline{S_1}}.$$

3　实验系统的设计和试验验证

3.1　热红外高光谱实验系统的设计

系统结构三维图如图 5 所示,图 5(a)为系统光机结构的三维设计图,图 5(b)是光机系统安装在用于冷环境实验的真空罐内的示意图.

3.2　热红外高光谱背景辐射的计算机仿真

利用软件进行背景辐射的仿真分析,从理论上计算出达到成像要求时的最高光机系统制冷温度,分析出背景杂散辐射的主要来源. 为系统的结构设计、制冷方式和探测器成像电路设计提供理论上的设计依据.

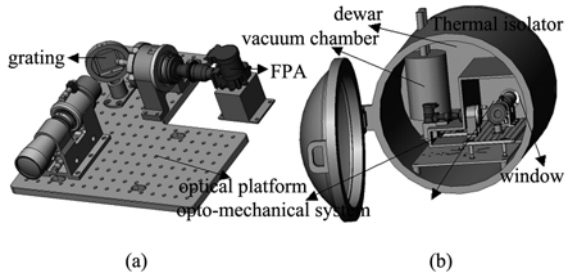


图5 系统结构三维图(a)光机子系统 (b)制冷试验系统
Fig. 5 System 3D layout (a) Opto-mechanical system (b) dewa experimental instrument

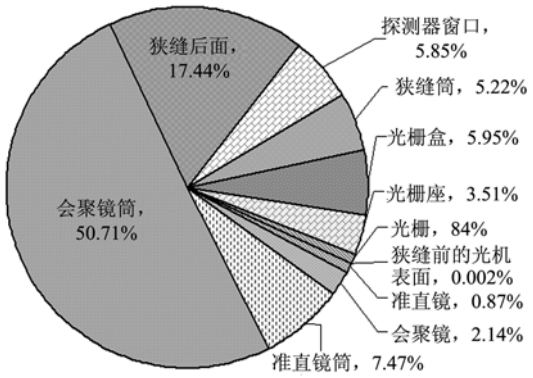


图6 全波段各辐射面源对背景辐射的贡献分量(300K)
Fig. 6 Surface's contribution to entire waveband background irradiation

当考虑光机系统温度保持300K恒定不变,取光学件和机械结构件内表面的反射率 ε 为0.8,考察全波段各个辐射面源对背景辐射的贡献分量.分光计内相对于光敏面张角较小、面积较大、发射率较高的面对背景辐射的贡献较大,如图6所示.

3.3 冷背景实验系统设计

冷背景实验系统的设计主要是降低系统内壁的表面发射率,对光机系统进行真空制冷,滤光片减小背景带宽;冷背景实验系统的工作原理,如图7所示.该系统通过液氮制冷可以使试验系统的背景温度下降到160K.

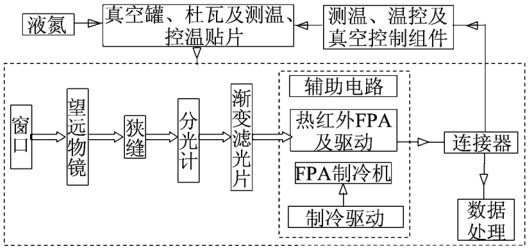


图7 冷背景工作原理图
Fig. 7 Schematic diagram of dewa experimental system

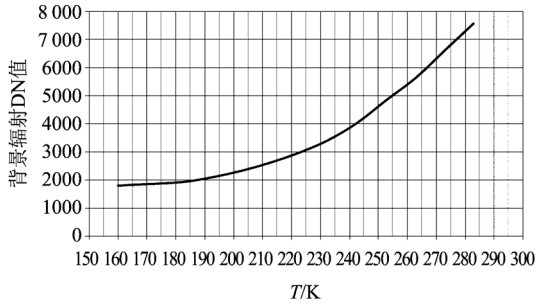


图8 系统背景辐射随环境温度变化趋势
Fig. 8 Background irradiation at different temperature

3.4 实验结果分析

系统共设计了32个波段,每个波段以320个像元推扫,下面的实验数据以系统的第17波段所在的一列象元为例.

3.4.1 系统背景辐射和温度的关系

从283K开始每10K作为一个温度点,设置积分时间为300μs,采集系统在降温过程中各温度点的数据,此数据中包括器件电压偏置、暗电压和背景辐射.除去暗电流和电压偏置约1700DN值以后,163K时的背景辐射约降低至283K时的1/78,并且下降速率减缓,如图8所示.背景辐射变化趋势与理论分析的趋势基本一致.

3.4.2 系统最长积分时间和温度的关系

若敏感元接收的辐射通量恒定不变,则信号电荷积累与积分时间成正比,且噪声积累也越多.由于是随机噪声,其积累的倍数与信号积累的倍数不同.由图9可知,系统环境温度从303K下降至173K过程中,最大积分时间从700μs上升至3500μs,积分时间延长了5倍,计算得到功率信噪比SNR是原来功率信噪比 SNR_0 的2.3倍.

3.4.3 带通滤光片对背景辐射的抑制

选用半带宽为120nm的滤光片,其中心波长为8.155μm,与系统第17个光谱通道中心波长接近.

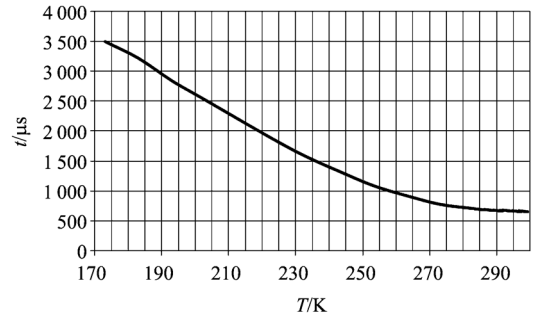


图9 最长积分时间随环境温度变化曲线
Fig. 9 Saturated integral time at different temperature

表 3　滤光片抑制背景
Table 3　Background irradiation suppressed by filter

	目标 DN 值	背景 DN 值	目标/背景	背景衰减	信号衰减
无滤光片	1131	6997	16.2%	15.4%	80.3%
有滤光片	908	1076	84.4%		

常温下,借助高温黑体做背景辐射抑制验证试验. 分别采集有和无滤光片时的信号与背景辐射值. 由表 3 可知,加滤光片后,目标信号与背景信号的比值为加滤光片前的 5.2 倍,与 2.1.4 中理论分析的 6.7 倍接近. 因此,中心波长与仪器的某光谱通道中心波长接近,半带宽与系统光谱分辨率接近的滤光片,可抑制背景辐射.

3.4.4　噪声等效温差和波段波长的关系

仿真得到低温下,光谱通道背景辐射往长波方向增加. 在系统制冷到 163K 时,设置 303K 和 323K 黑体源为定标高低温黑体. 图 10 是实验测得的 NETD 值,全光谱通道的平均 NETD ≤0.3K. NETD 值在中间波段较低,在两端尤其是后端波段升高,这是探测器光谱响应非均匀性和低温背景辐射光谱非均匀性的综合效果.

3.4.5　热红外高光谱图像的背景消除

整机制冷至 163K 时,得到的图片信息包含了探测器偏置、探测器暗电压、背景辐射和目标信号辐射. 同样条件下,在系统入射窗放置一黑体,得到的图片信息包含了探测器偏置、探测器暗电压和背景辐射. 将两者相减得到的图像质量明显改善,对比度明显提高,但图像中仍然存在一些明暗横条纹.

3.4.6　热红外高光谱图像的非均匀性处理

减背景后再做非均匀性校正,校正后的第 17 通道图片如图 11 所示. 图像质量有进一步的提高.

红外焦平面的非均匀性值指的是焦平面阵列各有效像元响应信号电压均方根偏差与平均响应信号电压的百分比.

$$U_R = \frac{1}{\overline{R}}\sqrt{\frac{1}{N-d}\sum_{i=1}^{N-d}[R(i)-\overline{R}]^2}\quad , \qquad (6)$$

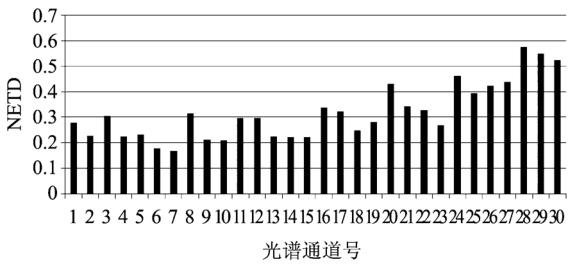


图 10　各光谱通道光谱 NETD
Fig. 10　Spectral NETD of each channel



图 11　校正后的 163K 环境温度下第 17 通道图像
Fig. 11　Spectral image at 163K after correction

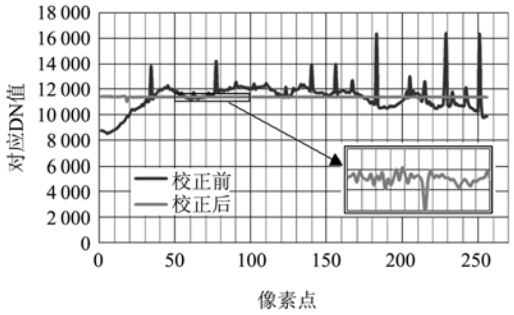


图 12　第 17 通道校正前后非均匀性对比图
Fig. 12　Nonuniformity of a channel before and after correction

式(6)中$\overline{R}$为器件剔除坏点后的平均响应电压,N 为焦平面的像元数,d 为焦平面的盲元个数. 该光谱通道各像元校正前后的响应值分布见图 12. 该光谱通道校正前非均匀性约为 9.56%,校正后约为 0.24%.

4　结论

从光机设计、系统制冷、背景带宽滤波、探测器性能提高和数据处理等方面出发,提出了几种通用有效的背景辐射抑制措施. 根据理论分析和实验结果表明:

(1) 背景辐射是该类仪器的主要噪声来源,必须进行背景抑制和处理. 经计算机仿真和实验测试,当对视场光阑后的光机部分的温度降到 170K 以下时,成像系统多数通道的 NETD 可降至 0.3K 以下.

(2) 红外探测器组件加冷屏,能阻止视场以外的大部分背景辐射,但低温下,这种抑制背景能力会下降;通过对部分结构件亮化处理,也可抑制部分背景辐射.

(3) 选择合适的红外带通滤光片,有利于提高红外高光谱系统的 NETD.

(4) 积分时间由 t 延长至 $mt(m>1)$,功率信噪比提高到原来功率信噪比的$\sqrt{m}$倍.

(下转 430 页)

单安全等优点,可用于大批量合成,为制备白光LED器件提供材料基础.

REFERENCES

[1] Bergh A, Craford G, Duggal A, *et al.* The promise and challenge of solid-state lighting[J]. *Physics Today*, 2001, **54**(12):42—47.

[2] Alivisatos A P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots[J]. *Science*, 1996, **271**(5251):933—937.

[3] Murray C B, Norris D J, Bawendi M G. Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1993, **115**(19):8706—8715.

[4] Hines M A, Guyot-Sionnest P. Synthesis and characterization of strongly luminescing ZnS-capped CdSe nanocrystals [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1996, **100**(2):468—471.

[5] Rogach A L, Gaponik N, Lupton J M, *et al.* Light-emitting diodes with semiconductor nanocrystals [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2008, **47**(35):6538—6549.

[6] Li Y Q, Rizzo A, Cingolani R, *et al.* Bright white-light-emitting device from ternary nanocrystal composites[J]. *Advanced Materials*, 2006, **18**(19):2545—2548.

[7] Anikeeva P O, Halpert J E, Bawendi M G, *et al.* Electroluminescence from a mixed red-green-blue colloidal quantum dot monolayer[J]. *Nano Letters*, 2007, **7**(8):2196—2200.

[8] Yue Y, Ge M Y, Liu Y, *et al.* Highly stable CdSe/CdS/ZnS fluorophores in acidic environment: facile preparation and modification of core/shell/shell nanocrystals [J]. *Chemical research in Chinses universities*, 2010, accepted.

[9] Cordero S R, Carson P J, Estsrook R A, *et al.* Photo-activated luminescence of CdSe quantum dot monolayers[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2000, **104**(51):12137—12142.

[10] Zhong X H, Han M Y, Dong Z L, *et al.* Composition-tunable $Zn_xCd_{1-x}Se$ nanocrystals with high luminescence and stability[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2003, **125**(28):8589—8594.

[11] Sung Y M, Lee Y J, Park K S. Kinetic analysis for formation of $Cd_{1-x}Zn_xSe$ solid-solution nanocrystals[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, **128**(19):9002—9003.

[12] Bae W K, Cha K, Hur H, *et al.* Single-step synthesis of quantum dots with chemical composition gradients [J]. *Chemistry of Materials*, 2008, **20**(2):531—539.

(上接423页)

(5) 通过对光谱图像采用减背景方法和基于光谱通道的校正算法进行非均匀性校正,背景和非均匀性从10%左右可降低到1%以下.

以上结论对热红外高光谱系统的性能优化具有一定的指导意义.在目前的技术条件下,把以上改进措施综合应用,热红外高光谱系统的性能还可以进一步提高,并进入实际应用阶段.

REFERENCES

[1] Lucey P G, Williams T J, Mignard M, *et al.* AHI: an airborne long wave infrared hyperspectral imager[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, **3431**:36—43.

[2] Johnson W R, Hook S J, Mouroulis P Z, *et al.* QWEST: Quantum well infrared earth science testbed[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **7086**:06-1-10.

[3] Hackwell J A, Warren D W, Bongiovi R P, *et al.* LWIR/MWIR imaging hyperspectral sensor for airborne and ground-based remote sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, **2819**:102—107.

[4] Mouroulis P Z, Sellar R G, Wilson D W, *et al.* Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(6):063001-1-9.

[5] Yokoyama K E, Harold Miller J, Hedman T, *et al.* NGST long-wave hyperspectral imaging spectrometer system characterization and calibration[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **5159**:262—274.

[6] Gat N, Subramanian S, Ross S, *et al.* Thermal infrared imaging spectrometer (TIRIS) status report[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, **3061**:284—291.

[7] Whitbourn L B, Cudahy T J, Huntington J F, *et al.* Airborne and laboratory remote sensing application of the CSIRO CO2 laser spectrometer 'MIRACO2LAS'[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, **3059**:109—118.

[8] ZHANG Jing-Xian. Technology of low light and infrared imaging[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (张敬贤. 微光与红外成像技术. 北京:北京理工大学出版社), 1995.