

一种具有衬底温度补偿功能的非制冷红外读出电路

周云, 吕坚, 廖宝斌, 蒋亚东

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

摘要:针对非制冷红外探测器系统,设计了一种无需衬底温度稳定器——热电制冷器(TEC)的读出电路(ROIC)结构.首先分析了衬底温度对微测辐射热计的特性影响,利用ROIC对衬底温度变化引起的微测辐射热计特性的变化进行补偿,实现ROIC的输出信号与衬底无关.该ROIC已在 $0.5\ \mu\text{m}$ CMOS工艺下成功流片,并应用到了阵列大小为 320×240 的非制冷微测辐射热计焦平面上.测试结果表明:在衬底温度变化 $20\ \text{K}$ 时,ROIC输出信号仅变化 $2\ \text{mV}$,实现了去除TEC后衬底温度补偿的功能,有效地降低了系统功耗.该ROIC在低功耗,小体积的非制冷红外探测器上有着广泛的应用.

关键词:非制冷;微测辐射热计;热电制冷器(TEC);读出电路(ROIC)

中图分类号: TN432 **文献标识码:** A

An uncooled infrared readout circuit with substrate temperature compensation

ZHOU Yun, LV Jian, LIAO Bao-Bin, JIANG Ya-Dong

(State key Laboratory of Electronic Thin Film and Integrated Devices,

University of Electronic Science and Technology of China (UESTC), Chengdu 610054, China)

Abstract: A new read-out IC (ROIC) architecture with substrate temperature compensation was introduced for the uncooled microbolometer detector. The influence of responsivity on the substrate temperature was evaluated. Numerical simulation and measurement of the proposed ROIC architecture demonstrated high quality of signal over wide temperature range without using multiple corrections. A 320×240 uncooled microbolometer focal plane array (FPA) based on the proposed circuit was implemented on silicon using a $0.5\ \mu\text{m}$ CMOS technology. The measurement data show that the maximum difference of the output voltages is only $2\ \text{mV}$ over the change of $20\ \text{K}$ in the substrate temperature. This architecture is expected to allow removal of the thermoelectric cooler (TEC) from uncooled systems. Thus it is ideally suited for low-cost, low-power, and low-weight production applications.

Key words: uncooled; microbolometer; TEC; ROIC;

PACS: 42.30.-d

引言

相对于需要制冷的光子型探测器,非制冷的红外探测器具有无需制冷装置、成本低、响应波段宽等明显的优势^[1].其中微测辐射热计是一种有代表性的非制冷红外探测器.在军事、工业、医药、科研等领域有着广泛的应用.

但是对于传统的非制冷红外探测器工作时,其

衬底温度必须为一个恒定的温度(比如 30°C).目前普遍采用TEC来实现这一要求. TEC在工作时往往具有较高的功耗,一般在 $500\sim 2000\ \text{mW}$ 左右^[2],而阵列大小为 320×240 的焦平面阵列本身往往只需消耗 $150\ \text{mW}$ 的功耗,所以TEC的功耗为整个探测器系统的主要功耗.同时控制TEC工作的电路也占据了很大的空间.因此去除TEC以降低功耗和体积成为了非制冷红外探测器的一个重要的发展方向.

收稿日期:2012-04-08,修回日期:2013-01-08

基金项目:国家自然科学基金(61235006)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61235006)

作者简介 (Biography):周云(1984-),男,浙江衢州人,博士,主要研究领域为主要研究领域为非制冷红外探测器读出电路的研究. E-mail: zhouy@uestc.edu.cn

Received date: 2012-04-08, **revised date:** 2013-01-08

对于微测辐射热计非制冷红外探测器工作时需要一个恒定的衬底温度,其主要原因有以下 3 个方面^[2]:

- (1) 红外焦平面阵列的非均匀性;
- (2) 微测辐射热计的阻值随衬底温度的非线性变化;
- (3) 像元的输出信号会随衬底温度的变化发生漂移。

对于一个利用恒压或者恒流驱动的微测辐射热计焦平面阵列来说,像元之间的阻值,热容(C),热导(G)不尽相同,同时自热效应也会使得焦平面上各个像元之间的工作温度不一致.图 1 分别给出了像元的电阻及电阻温度系数(TCR)与衬底温度的关系。

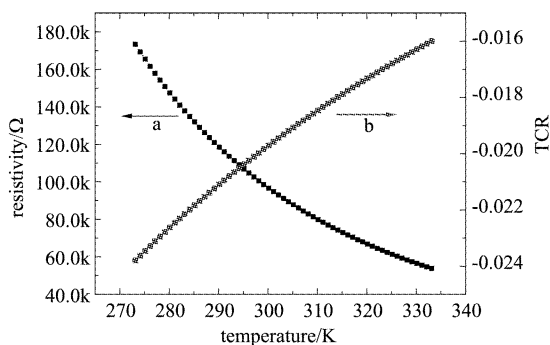


图 1 电阻(a)和 TCR(b)与工作温度的关系图
Fig. 1 (a) Resistance and (b) TCR versus temperature

从图 1 中可以看出当工作温度不一致时,像元的阻值和 TCR 也会不一致.最终导致了焦平面阵列的非均匀性,当衬底温度发生变化时,焦平面阵列的均匀性进一步变差。

另外当衬底温度发生变化时单个像元的输出信号也会随衬底温度发生变化.主要原因有以下两点:

- (1) 像元和参比电阻之间 TCR 的失调,当衬底温度发生变化时,像元和参比的阻值变化不一致,导致输出信号的漂移。
- (2) 像元和参比电阻的阻值随衬底温度发生变化,使得 ROIC 的放大倍数发生变化,当有红外辐射的时候,输出信号发生漂移。

目前解决上述问题的方法有以下几种:文献^[2]提出了利用逐点偏置的方法(BEQ),每个像元都对应一个单独的偏置,以此方法降低焦平面阵列的非均匀性.偏置电压由 DAC 提供,DAC 的数字信号为与衬底温度相关的校正数据.图 2 给出了传统的衬底温度补偿读出电路结构。

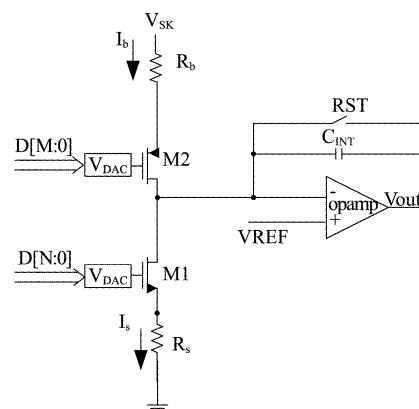


图 2 传统的读出电路结构
Fig. 2 The conventional ROIC architecture

如图 2 所示: R_s 为与衬底热隔离的像元电阻. R_b 为与衬底热短路的盲像元——参比电阻. V_{DAC1} 用于为各个像元提供不同的偏置电压,该偏压主要提供以下几个衬底温度变化导致的非均匀性补偿^[3]:

- (1) 像元的阻值;
- (2) 像元的热容;
- (3) 像元的 TCR.

V_{DAC} 主要为参比电阻提供不同的偏压,该偏压主要提供以下两个方面的衬底温度变化导致的非均匀性补偿^[3]:

- (1) 参比电阻的阻值;
- (2) 运算放大器的失调。

从上述方法中可以使得焦平面阵列中的各个像元的 TCR 保持一致,并且保证了所有像元在无红外辐射照射时的输出保持在同一个固定值上(比如 VREF),有效地降低了焦平面的非均匀性.但该方法无法解决参比电阻和像元之间的 TCR 失调。

文献^[4]给出了利用片外校正的方法,根据衬底温度对输出信号直接进行片外补偿,但无法实现对输出信号动态范围的补偿.文献^[5]将传统的与衬底热短路的参比电阻变成与像元类似的与衬底热隔离的结构,并且与外界热隔离.但由于自热效应的存在,该参比电阻需要做成若干行交替使用以保证工作时不被烧毁。

利用上述方法可以在一定程度上有效地降低焦平面阵列的非均匀性.但如式 1 所示,衬底温度引起输出信号的变化仍然无法得到解决:

$$V_{out} = \left(\frac{V_b}{R_b(T_{sub})} - \frac{V_s}{R_s(T_{sub})(1 + \alpha\Delta T)} \right) \times \frac{T_{INT}}{C_{INT}}, \quad (1)$$

其中 V_{out} 为输出电压, V_b 为参比电阻的偏压, R_b (T_{sub}) 为参比电阻, V_s 为敏感单元的偏压, R_s (T_{sub})

为敏感单元阻值; T_{INT} 为积分时间, C_{INT} 为积分电容, α 为像元的 TCR. 从式(1)中看出, 前述方法的输出电压都是与衬底温度相关的, 无法实现去除 TEC 后对输出电压进行衬底温度无关化的补偿. 针对上述问题, 提出了一种新型的衬底温度补偿 ROIC.

1 带衬底温度补偿的读出电路设计

图 3 给出了新型的衬底温度补偿 ROIC 结构. 其中 R_b 为与衬底热短路的参比电阻, R_{ts} 为与衬底热短路的衬底温度补偿电阻, R_s 的结构与参比电阻 R_b 相同. R_s 为敏感单元, 其结构与 R_b 相同, 但与衬底热隔离. R_A 为对衬底温度不敏感的半导体电阻, R_{DAC2} 为阻值可调的半导体电阻.

根据图 3 所示, 积分器的输出 V_{INT} 可由下式得到:

$$V_{INT} = \frac{V_B - V_A}{R_A} \times \frac{T_{INT}}{C_{INT} + C_{INT_SH1}} + V_B \quad (2)$$

其中 T_{INT} 为积分时间; C_{INT} 为积分电容; C_{INT_SH1} 为积分和采样复用电容, V_B 为图中 B 点的电压值.

式(2)中 B 点的电压值 V_B 在通过采样后消除, 所以最终的采保电路输出电压 V_{OUT} 可由式(3)得到:

$$V_{OUT} = \frac{V_B - V_A}{R_A} \times \frac{T_{INT}}{C_{INT} + C_{INT_SH1}} \quad (3)$$

由于流过半导体电阻 R_A 的电流 (100 nA-200 nA) 相对于 I_{sink2} 可 (20 μ A) 以忽略不计, 那么 A 的电压值 V_A 为一个定值. 另外 I_{sink2} 为正温度系数的电流, 而 M3 的阈值电压为负温度系数, 所以 VA 的温

度系数很小. 式(3)中除 V_B 外的其余几项与衬底温度的变化关系不大, 所以输出电压和衬底温度的关系取决于 V_B 与衬底温度的关系. 式(4)为 V_B 的表达式:

$$V_B = \left(\frac{V_{SK} - V_{eb}}{R_b + R_{DAC}} - \frac{V_{fid}}{R_s} \right) \times R_{ts} + V_{r1} \quad (4)$$

其中 V_{r1} 由 I_{sink1} 和 V_{DAC3} 的值决定; 由于流过参比电阻 R_{ts} 的电流 (100 ~ 200 nA) 相对于 I_{sink1} (20 μ A) 可忽略不计, 所以 V_{r1} 可视为一个定值. 另外 I_{sink1} 为正温度系数的电流, 而 M4 的阈值电压为负温度系数, 所以 V_{r1} 的温度系数很小.

考虑到红外辐射以及衬底温度的变化, V_B 可由式(5)表示:

$$V_B = \left(\frac{V_{SK} - V_{eb}}{(R_{b,0} + R_{DAC,0}) \times (1 + \int_{T_1}^{T_1 + \Delta T_{sub}} \alpha_1(T_{sub}) dT_{sub})} - \frac{V_{fid}}{R_{s,0} \times (1 + \int_{T_2}^{T_2 + \Delta T_{sub}} \alpha_2(T_{sub}) dT_{sub}) \times (1 + \alpha_2(T_{sub}) \Delta T)} \right) \times R_{ts,0} \left(1 + \int_{T_1}^{T_1 + \Delta T_{sub}} \alpha_3(T_{sub}) dT_{sub} \right) + V_{r1} \quad (5)$$

其中 $R_{b,0}$, $R_{DAC,0}$, $R_{s,0}$, $R_{ts,0}$ 分别为各个阻值的初始状态; $\alpha_1(T_{sub})$ 为 $R_b + R_{DAC}$ 的等效 TCR; $\alpha_2(T_{sub})$ 为 R_s 的 TCR; $\alpha_3(T_{sub})$ 为 R_{ts} 的 TCR; T_1 为衬底的初始温度; T_2 为敏感单元的初始温度; ΔT_{sub} 为衬底的温度变化, ΔT 为敏感单元接受了探测目标红外辐射后引起的温度变化. 一般来说, 探测目标温度变化 1 K, 引起敏感单元的温度变化约为 0.01 K 左右. 假设当衬底温度为 300K 时, TCR 为 -0.02. 当衬底温度从 300 K 变化至 320 K, TCR 的变化不会超过 0.002.

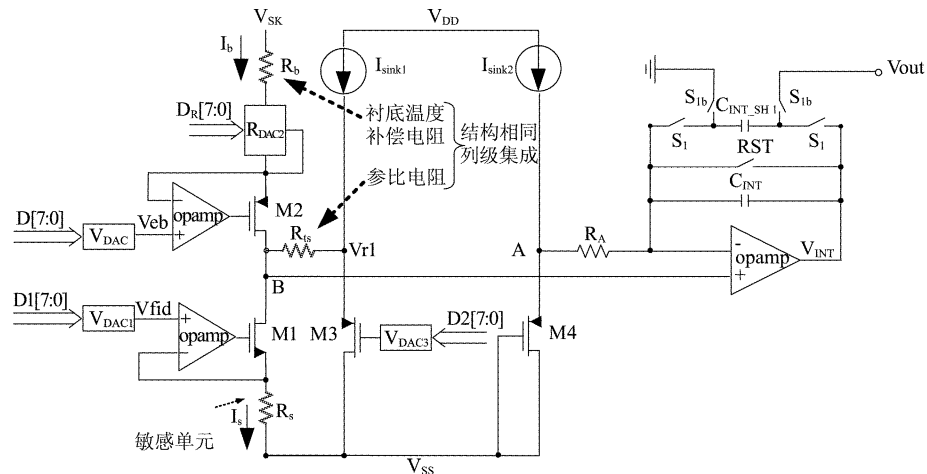


图 3 新型的读出电路结构
Fig. 3 The proposed ROIC architecture

所以, $1/(1 + \alpha_2 \Delta T)$ 可通过泰勒展开简化为:

$$\frac{1}{1 + \alpha_2 \Delta T} = \sum_{n=0}^{\infty} (-\alpha_2 \Delta T)^n \approx 1 - \alpha_2 \Delta T \quad (6)$$

通过调节式(5)中的 V_{eb} , V_{fid} 和 R_{DAC} 的值, 可得到以下结果:

$$\frac{V_{SK} - V_{eb}}{(R_b + R_{DAC}) \times (1 + \int_{T_1}^{T_1 + \Delta T_{sub}} \alpha_1(T_{sub}) dT_{sub})} \approx \frac{V_{fid}}{R_s \times (1 + \int_{T_2}^{T_2 + \Delta T_{sub}} \alpha_2(T_{sub}) dT_{sub})} \quad (7)$$

结合式(5)、(6)、(7), 可得到以下等式:

$$V_B = \frac{R_{is} (1 + \int_{T_1}^{T_1 + \Delta T_{sub}} \alpha_3(T_{sub}) dT_{sub}) V_{fid} \alpha_2(T_{sub}) \Delta T}{R_s \times (1 + \int_{T_2}^{T_2 + \Delta T_{sub}} \alpha_2(T_{sub}) dT_{sub})} + V_{r1} \quad (8)$$

其中 R_s 的 TCR 值 $\alpha_2(T_{sub})$ 和 R_{is} 的 TCR 值 $\alpha_3(T_{sub})$ 之间的差别只要是由于 R_s 的自热效应引起工作温度的变化导致的. 在合理的偏置条件下, 由于自热效应引起像元温度变化量通常小于 1 K. 如在 $R_s = 60 \text{ k}\Omega$, $V_{fid} = 1.2 \text{ V}$, 像元每帧偏置时间为 $20 \mu\text{s}$, 热导 $G = 1 \times 10^{-7} \text{ W/K}$, 热容 $C = 1 \times 10^{-8} \text{ J/K}$ 的条件下, 偏置自热效应引起像元温度变化量为 $\Delta T_{sensor} = (T_2 - T_1) = 0.3 \text{ K}$ 时, 从图 1 中可知, TCR 从 T_1 到 T_2 的变化值仅为 0.2%. 所以, $\alpha_3(T_{sub}) \approx \alpha_2(T_{sub})$; 式(8)可简化为:

$$V_B \approx \frac{R_{is} V_{fid} \alpha_2(T_{sub}) \Delta T}{R_s} + V_{r1} \quad (9)$$

从式(8)可以看出, 由于 $\alpha_2(T_{sub})$ 及 ΔT 随衬底温度的变化十分微弱, 因此 V_B 几乎不随衬底温度变化. 由于输出信号 V_{OUT} 与衬底温度的关系取决于 V_B , 所以新型读出电路结构有效地消除了衬底温度变化对输出信号的影响.

2 仿真结果

根据上述分析, 分别对传统的和新型的读出电路结构进行了仿真. 图 4 为 V_B 与衬底温度的关系图, 当衬底温度从 300 K 上升到 320 K 时, V_B 仅变化了 $54.5 \mu\text{V}$, 即 V_B 基本不随衬底温度发生变化.

图 5(a) 和 (b) 分别给出了传统和新型读出电路的输出信号和衬底温度的关系. 当衬底温度从 300 K 上升至 320 K 时, 新型读出电路的输出信号仅变化 $129 \mu\text{V}$ (如图 5a 所示). 相比之下, 在相同放大条件下, 传统读出电路的输出信号变化了 52 mV

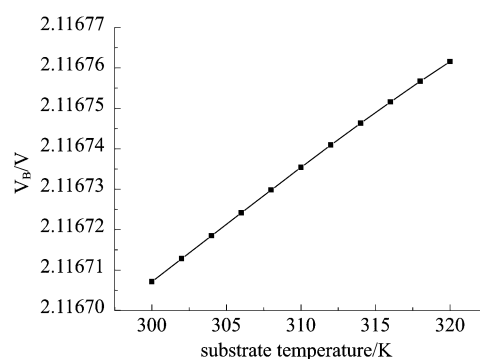


图 4 V_B 与衬底温度的关系图

Fig. 4 The value of V_B versus substrate temperature

(如图 5b 所示). 该仿真结果很好的印证了式(9)的结果.

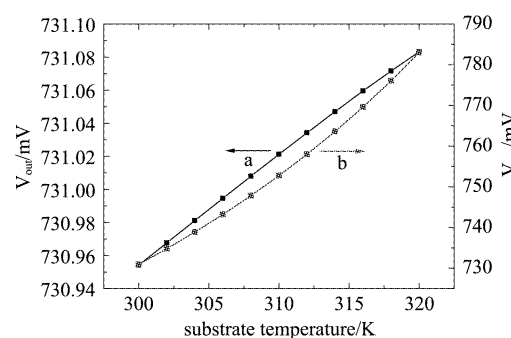


图 5 新型读出电路(a)和传统读出电路(b)的输出信号与衬底温度的关系

Fig. 5 Temperature dependences of the value of output for (a) the proposed ROIC architecture and (b) conventional ROIC architecture

3 新型读出电路测试结果说明

目前该电路已应用到阵列大小为 320×240 的非制冷微测辐射热计焦平面上, 并在 $0.5 \mu\text{m}$ CMOS 工艺下成功制作了试验片. 图 6 为新型读出电路的通道显微照片. 图 7 为焦平面阵列的局部 SEM 照片. 可以看出, 每个敏感单元和读出电路通过金属互联实现电学连接.



图 6 新型读出电路的读出通道(4 通道)

Fig. 6 Photograph of the proposed ROIC architecture (4 column wise)

图 8 为衬底温度变化 20 K 时, V_B 点电压值的波动实测情况, 可以看出 V_B 点的电压值波动范围为 $100 \mu\text{V}$, 符合预期结果.

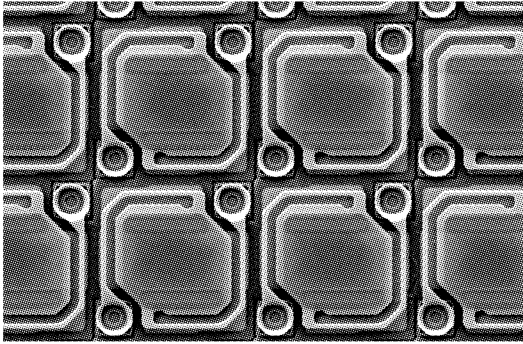


图7 焦平面阵列的局部显微照
Fig. 7 A partial micrograph of the 320 × 240 pixel IRFPA

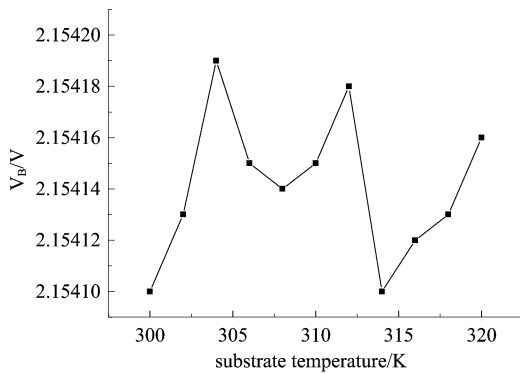


图8 V_B 与衬底温度的关系图
Fig. 8 The value of V_B versus substrate temperature

图9 为在衬底温度分别为 300 K, 310 K, 320 K 时, 输出信号随黑体温度变化的波形图. 从图中可以看出, 在黑体温度为 320 K 时, 衬底温度从 300 K 上升了 320 K, 输出信号变化的最大值为 2 mV.

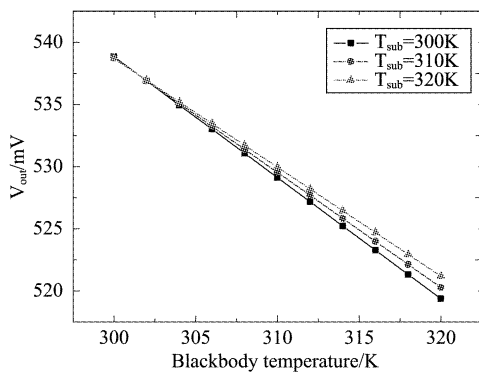


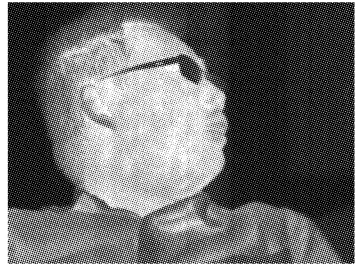
图9 在不同衬底温度下, 输出信号和衬底温度的关系
Fig. 9 The output voltage versus blackbody temperature for different substrate temperatures

图 10(a)、(b) 和 (c) 为在衬底温度分别设为 300 K, 320 K 和 340 K 时的成像效果图, 在不同的衬底温度下使用相同的校正数据, 可以看出图片没有

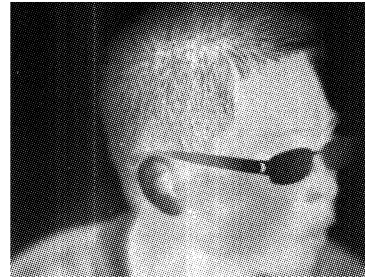
明显的差异. 所以新型读出电路可在无 TEC 的情况下正常工作.



(a) $T_{sub}=300K$



(b) $T_{sub}=320K$



(c) $T_{sub}=340K$

图 10 新型读出电路成像效果图
Fig. 10 IR images captured with the 320 × 240 bolometer-type uncooled FPA using the proposed ROIC architecture

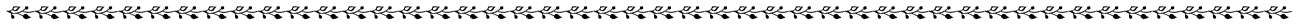
4 结论

提出了一种新型的读出电路结构, 该结构可有效地消除读出信号的温漂, 并降低焦平面的非均匀性. 同时该电路结构可实现无需 TEC 的探测器设计, 并大大降低了后端处理中校正的复杂性. 该读出电路非常适合在低功耗小体积的红外探测器中应用, 具有极大的市场发展潜力.

REFERENCES

[1] Lv Jian, Jiang Ya-Dong, Zhang Dong-Lu, *et al.* An ultra low noise readout integrated circuit for uncooled microbolometer[J]. *Analog Integr Circ Sig Process*, 2010, **66**(3): 489 - 494.
[2] Parish W J, Woolaway J T. Improvements in uncooled systems using bias equalization[J]. *Proc. SPIE*, 1999, 3698: 748 - 755.

- [3] Parish W J, Woolaway J T. Low Cost 160×128 uncooled infrared sensor array[J]. *Proc. SPIE*, 1998, 3360: 111 - 119.
- [4] Fraenkel A, Mizrahi U, Bykov L, *et al.* Advanced features of SCD's uncooled detectors[J]. *Opto-Electronics Review*, 2006, 14(1): 47 - 54.
- [5] Michael A. Dem'yanenko. Improved bias equalization method for suppression temperature-induced errors in microbolometer FPA over 20 K substrate temperature change [J], *Proc. SPIE*, 2007, 6542: 654222_1- 654222_9.
- [6] Parish W J. Microbolometer focal plane array methods and circuitry Methods and circuitry [P], United States Patent, 2004, NO. 6812465B2.



(上接 241 页)

的有效视场角;针对光谱响应可编程的特点,设计特殊的光谱定标和辐射定标方法,通过更加精确完善的定标测试提高系统的定量化水平。

REFERENCES

- [1] WANG Jian-Yu, XUE Yong-Qi. Discussion about multi-spectral scanner with programmable spectral bands [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王建宇, 薛永祺. 光谱波段可编程多光谱扫描仪探讨. *红外与毫米波学报*), 1989, 8(4): 263 - 269.
- [2] XIN Gang, YU Yu-Ming. Study on data acquisition system of imaging spectrometer with programmable bands [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing* (忻刚, 于豫民. 成像光谱仪编程选择波段数据采集系统的研究. *航天返回与遥感*), 1997, 18(3): 24 - 27.
- [3] BABEY S K, ANGER C D. A compact airborne spectrographic imager (CASI) [C]. Proceedings of IGARSS 89 and Canadian Symposium on Remote Sensing Vol. 2, 1989: 1028 - 1031.
- [4] CUTTER MIKE A, LOBB DAN R. Design of the compact high-resolution IMAGING spectrometer (CHRIS), and future developments [C]. Proceedings of the 5th International Conference on Space Optics, 2004: 41 - 47.
- [5] BEZY J L, DELWART S, RAST M. MERIS - A new generation of ocean-colour sensor onboard Envisat [R]. ESA, 2000, bulletin 103: 48 - 56.
- [6] BORIS S G, SERGEY V A, ANDREY V B, *et al.* Acousto-optic tunable filter with variable spectral selectivity [C]. Proc. of SPIE Vol. 5828, 2005: 53 - 59.
- [7] JOAN V F, EMILIO R G, CRISTINA I L, *et al.* Configurable-bandwidth imaging spectrometer based on an acousto-optic tunable filter [C]. Proc. of SPIE Vol. 5953, 2005: 1 - 12.
- [8] HAYDEN SMITH. Spectral differential imaging detection of planets about nearby stars [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 1987, 99: 1344 - 1353.
- [9] GUPTA N, DALNNARN R. Multispectral and hyperspectral imaging with AOTF for object recognition [C]. Proc. of SPIE Vol. 3584, 1999: 128 - 135.
- [10] GEORGIEV G, GLENAR D A, HILLMAN J J. Spectral characterization of acousto-optic filters used in imaging spectroscopy [J]. *Applied optics*, 2002, 41(1): 209 - 217.
- [11] GLENAR D A, HILLMAN J J, SAIF B, *et al.* Acousto-optic imaging spectropolarimetry for remote sensing [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(31): 7412 - 7424.