

文章编号: 1672-8785(2014)05-0007-06

制冷型热红外焦平面成像系统 数据处理的关键技术

王湘波 陈小文 李春来 姬弘桢 王建宇*

(中国科学院上海技术物理研究所中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 长波红外 (8~12.5 μm) 焦平面的性能在很多方面弱于中短波红外器件, 其非均匀性及盲元状况较严重。本课题首次在国内引进了法国 Sofradir 公司的 320×256 像元 HgCdTe 长波红外焦平面探测器 MARS VLW RM4, 其波长响应范围为 7.7~12 μm 。基于一套高帧频低噪声信息获取系统, 经过动态范围标定, 实现了一套动态范围为 250~330 K、噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 小于 50 mK 的热红外成像系统。针对焦平面各像元的响应特性, 研究了适用于热红外成像系统的非均匀性及盲元校正方法, 提出了基于辐射定标的非均匀性校正和盲元检测。经实验验证, 其校正效果优于两点定标法, 且易于工程实现, 基于辐射定标的结果可实现精确的温度反演。

关键词: 热红外焦平面; 热红外成像系统; 辐射定标; 盲元检测; 非均匀性校正

中图分类号: TP311.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.05.002

Key Techniques of Data Processing for Cooled Thermal Infrared Focal Plane Array Imaging System

WANG Xiang-bo, CHEN Xiao-wen, LI Chun-lai, JI Hong-zhen, WANG Jian-yu

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A long wave infrared (8–12.5 μm) focal plane array can not operate better than medium and short wave ones in many respects. Its non-uniformity and blind-pixel problems are quite serious. A MARS VLW RM4 320×256 HgCdTe long wave infrared focal plane array detector with a wavelength response range from 7.7 μm to 12 μm is imported from Sofradir Company in France. On the basis of a high frame frequency and low-noise information acquisition system of which the dynamic range is calibrated, a thermal infrared imaging system is developed. Its dynamic range is from 250 K to 330 K and Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) is less than 50 mK. According to the response characteristics of the pixels in the array detector, the non-uniformity and blind-pixel correction method suitable for thermal infrared imaging systems are studied. A non-uniformity and blind-pixel detection method based on radiation calibration is put forward. The experimental result shows that the method is better than the two-point method. It is easy to be implemented in engineering. The result based on radiation calibration is useful for more precise temperature inversion.

收稿日期: 2014-03-27

基金项目: 国家高技术发展计划 (863 计划) 课题 (2012AA121102)

作者简介: 王湘波 (1989-), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要研究热红外成像系统图像处理、辐射定标技术。

E-mail: wxiangbo1989@gmail.com

* 通讯作者 E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn

Key words: thermal infrared focal plane; thermal infrared imaging system; radiation calibration; blind pixel detection; non-uniformity correction

0 引言

长波红外谱段 (8~12.5 μm) 也称热红外谱段, 地球表面的物体在 300 K 左右时所发出的热辐射的绝大部分能量都位于该波段。热红外波段位于大气窗口, 该波段的辐射大气穿透能力强、作用距离远且抗干扰能力强, 实际中已广泛用于目标识别、地质勘探、地表温度探测、环境监测等军事及民用领域。

高性能热红外焦平面器件的研制难度较大, 近年来才逐渐实用化。其性能在很多方面依然弱于中短波器件, 如均匀性以及盲元状况均较为严重; 热红外成像系统的响应极易受光学系统背景辐射的影响, 对成像系统本体温度的变化非常敏感。国内可见光和短波红外成像系统的研究和应用已趋于成熟, 但对热红外谱段的成像, 特别是高性能热红外焦平面成像系统的研究还较少。“十二五”期间, 国家 863 项目

“星载热红外高光谱成像仪工程样机研制”首次在国内引进了法国 Sofradir 公司生产的 320×256 元制冷型热红外面阵探测器 MARS VLW RM4, 其响应截止波长可至 12 μm 以上。

本文基于高帧频低噪声信息获取系统实现一套高性能热红外成像系统。针对各像元的响应特性研究适用于热红外成像的盲元补偿、非均匀性校正等数据处理技术, 提出基于辐射定标的非均匀性校正及盲元检测方法, 并对系统温度反演精度进行验证。

1 热红外成像系统介绍

基于 MARS VLW RM4 制冷型热红外焦平面探测器的成像系统主要由光学镜头、焦平面探测器、制冷机、探测器驱动电路、信号处理电路、数据采集与控制时序和图像传输处理等部分组成^[1], 总体结构如图 1 所示。

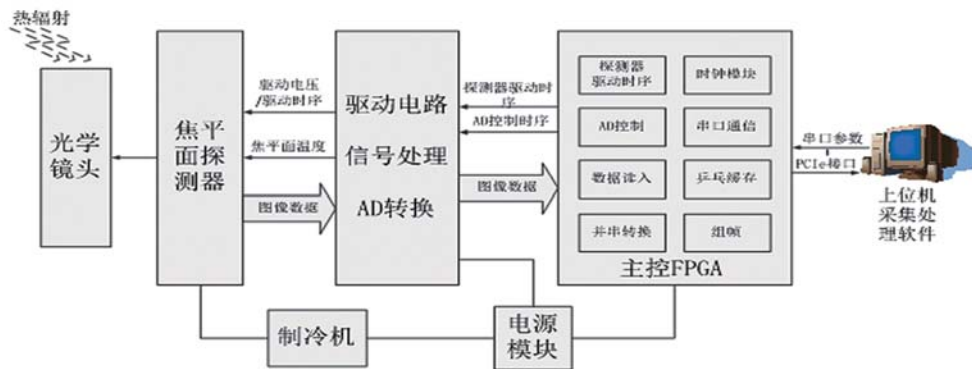


图 1 热红外成像系统框图

MARS VLW RM4 热红外焦平面探测器内置集成探测器杜瓦制冷机, 响应波长范围为 7.7~12 μm , 如图 2 所示。调整驱动电压, 设置焦平面工作在四路并行输出模式; 四路模拟信号分别经放大、偏置调整后被输入至 AD, 经 A/D 转换后在 FPGA 中完成组帧、乒乓读写等; 通过 PCIe-6537 接口传输到上位机软件中进行图像显示、存储及处理。焦平面工作的积分时间可调, 成像系统

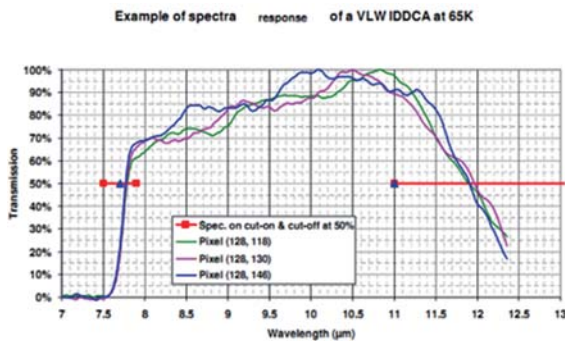


图 2 MARS VLW RM4 的光谱响应曲线

输出图像帧频最高可达 200 帧/s。整套成像系统的实物如图 3 所示。

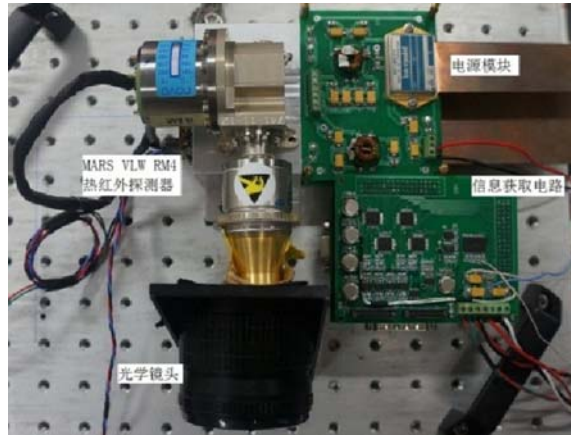


图 3 热红外成像系统实物图

2 成像系统动态范围的标定

成像系统动态范围的标定是通过信息获取电路增益及偏置的调整使输入辐射通量密度与系统的输出 DN 值范围线性匹配完成的。

MARS VLW RM4 有 GAIN1 和 GAIN0 两种增益模式。通过驱动电压设置使焦平面工作在 GAIN1 模式。在该模式下, 焦平面输出的模拟信号的总电压范围为 1.6~4.35 V。根据此范围可初步设置信号处理电路的增益和偏置, 使信号与 A/D 的输入电压范围匹配。

设定热红外成像系统的测温动态范围为 250~330 K, 该范围包括了地物热辐射的绝大部分能量。首先需要确定成像系统的积分时间, 通常提高积分时间能提高成像系统的信噪比, 但积分时间过高时焦平面在温度动态范围内的输出易饱和。为同时保证信噪比和测温精度, 最终成像系统的积分时间选为 300 μ s。

积分时间确定后不再改变。对成像系统进行初步辐射定标, 获取多个不同温度点的标准面源黑体图像, 通过最小二乘法线性拟合确定当前成像系统的输出 DN 值与光学镜头入瞳处辐射通量密度 (单位 W/cm²) 之间实际的关系曲线:

$$DN = a_1\phi(T) + b_1 \quad (1)$$

黑体的辐射通量密度 $\phi(T)$ 可由普朗克公式得出:

$$\phi(T, \lambda_1 \sim \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \quad (2)$$

为使焦平面输出充分利用 A/D 的量化范围, 减小量化噪声, 还需调整电路的增益与偏置。选择温度动态范围高低端所对应的 AD 量化值, 即:

$$\begin{cases} DN_{max} = a_2\phi(T_{max}) + b_2 \\ DN_{min} = a_2\phi(T_{min}) + b_2 \end{cases} \quad (3)$$

可确定期望的系统输出响应曲线:

$$DN = a_2\phi(T) + b_2 \quad (4)$$

根据式 (1) 和式 (4) 的实际曲线与期望曲线, 可得到电路所需增益为现有增益的 a_2/a_1 倍。再结合 A/D 本身的电压量化关系:

$$DN = pV_{in} + q \quad (5)$$

式中, V_{in} 为经过放大、偏置后的信号即 AD 的输入电压, DN 为输出数字值, 可推出电路新的偏置应为

$$B_2 = \frac{b_2 - q - \frac{a_2}{a_1}(b_1 - pB_1 - q)}{p} \quad (6)$$

式中, B_1 为调整前的电路偏置电压。

调整电路增益和偏置后再对成像系统进行二次辐射定标, 确定系统的实际响应曲线。若未达预期, 则还需进行多次调整和标定, 最终实现一套测温动态范围为 250~330 K, 在 300 K 环境温度下系统 NETD 小于 50 mK 的热红外成像系统。

3 热红外图像校正的处理方法

3.1 像元响应特性

经过动态范围标定, 绝大部分像元在 250~330 K 温度范围内的输出与光学系统入瞳处的辐射通量密度为正相关线性关系, 其线性拟合相关度可达 0.999 以上。但不同像元的响应特性不同, 如图 4 中曲线 1 和 2 所示。在均匀辐照

下,焦平面各像元的输出相差较大,这就是红外焦平面的非均匀性问题。

除此之外,红外焦平面还存在少部分非正常像元。与其他像元相比,其输出明显偏高或偏低,保持在近饱和输出电压处。非正常像元的响应率偏低,响应曲线线性度差,如图4中的曲线3和4所示。这部分像元即为盲元,在热红外图像中表现为明显的暗点或亮点,严重影响图像性能。

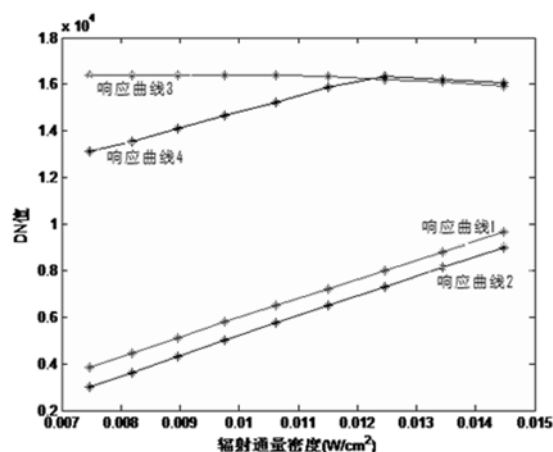


图4 像元响应特性曲线

3.2 非均匀性校正方法

非均匀性校正是红外焦平面研究面临的比较多的问题。常用的非均匀性校正算法主要包括两类:基于参考辐射源定标的算法和基于场景的算法^[9]。

基于参考辐射源定标的算法通常是通过对于若干不同温度点的均匀黑体辐射源成像获取定标数据,再由定标数据得到各像元的校正参数,使所有像元的响应特性趋于同一条曲线的。这类算法在工程上已经得到广泛的应用。基于场景的校正算法不需要定标,并且可自适应焦平面响应参数漂移的情况,是近年来非均匀性校正算法的主要研究趋势。场景法能够保证图像的显示质量,但通常依赖于场景的运动,且会破坏图像的测温精度。由于热红外成像的应用场合对测温精度要求较高,使用定标法更加合适。

以两点定标法为例,对动态范围内高低两个温度点 T_1 、 T_2 的标准面源黑体成像。焦平面

第 i 、 j 像元的输出 DN 值为 $DN_{ij}(T_k)$, 对所有像元求平均得:

$$\overline{DN}(T_k) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N DN_{ij}(T_k) (k=1,2) \quad (7)$$

第 i 、 j 像元经两点法校正后的 DN 值为

$$DN_{ij}^* = G_{ij} \times DN_{ij} + O_{ij} \quad (8)$$

由高低两温度点的定标数据可得校正增益参数 G_{ij} 和校正偏置参数 O_{ij} :

$$G_{ij} = \frac{\overline{DN}(T_2) - \overline{DN}(T_1)}{DN_{ij}(T_2) - DN_{ij}(T_1)} \quad (9)$$

$$O_{ij} = \frac{\overline{DN}(T_1)DN_{ij}(T_2) - \overline{DN}(T_2)DN_{ij}(T_1)}{DN_{ij}(T_2) - DN_{ij}(T_1)} \quad (10)$$

两点定标法只考虑了两点的定标数据,在小动态范围内,当像元响应曲线的线性度较好时,可以得到较好的非均匀性校正结果,但在温度范围变大时校正效果会变差。本文使用了一种多点定标法,基于热红外成像系统响应的物理意义,根据系统的辐射定标结果进行校正。

获取动态范围内多个不同温度点的标准面源黑体的热红外图像,对光学系统入瞳处的辐射通量密度 ϕ_k 与系统输出 DN_k 的关系进行最小二乘线性拟合,得到各像元的实际响应特性曲线:

$$DN_{ij} = A_{ij}\phi(T) + B_{ij} \quad (11)$$

根据各像元的平均响应情况,设定一条期望响应曲线:

$$DN_{ij}^* = A_{ij}^*\phi(T) + B_{ij}^* \quad (12)$$

为使所有像元的响应曲线都趋于该期望曲线,校正增益参数 G_{ij} 和校正偏置参数 O_{ij} 应分别为

$$G_{ij} = A_{ij}^*/A_{ij} \quad (13)$$

$$O_{ij} = \frac{A_{ij}B_{ij}^* - A_{ij}^*B_{ij}}{A_{ij}} \quad (14)$$

这种方法直接建立在热红外焦平面响应的物理意义之上,综合了较大温度动态范围内的多点辐射定标数据,且校正所需参数少,运算简单,易于在工程中实时实现。在辐射定标中所得的参数可用于焦平面盲元位置的检测。

3.3 盲元检测与补偿方法

根据红外焦平面国标中的定义, 盲元包括死像元和过热像元。死像元为像元响应率小于平均响应率 1/10 的像元, 过热像元为像元噪声电压大于平均噪声电压 10 倍的像元。结合盲元的定义以及前文所分析的盲元响应特性, 本文基于多个参数对热红外焦平面中盲元的位置进行检测。

基于响应率的盲元检测是根据辐射定标线性拟合的结果式 (11) 以响应曲线斜率 A 为判断标准的。由于盲元响应率小于正常像元, 甚至为负, 因此若有

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y A_{ij}}{XY} \quad (15)$$

$$|A_{ij} - \bar{A}| > 90\% \times \bar{A} \quad (16)$$

则认为第 i 、 j 像元为盲元。

基于噪声的盲元检测首先需求出各像元的时域噪声, 即采多帧图像求像元响应的时域标准差 σ_{ij} 。若某像元的噪声远大于其他像元, 如式 (14) 和式 (15) 所示, 则认为该像元为盲元:

$$\sigma_{ij} - \bar{\sigma} > 10 \times \bar{\sigma} \quad (17)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y \sigma_{ij}}{XY} \quad (18)$$

另外根据盲元响应特性的分析可知, 盲元的响应曲线线性度较差, 可以以多点辐射定标时线性拟合的线性相关度的平方 R_2 即拟合优度作为判断标准:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \bar{\phi})(DN_i - \overline{DN})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \bar{\phi})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (DN_i - \overline{DN})^2}} \quad (19)$$

式中, N 为辐射定标的拟合点数。若第 i 、 j 像元的线性相关度的平方 R_2 小于 0.9, 则认为是盲元。

综合以上三种标准的盲元检测结果, 对于被标记为盲元的像元进行补偿, 这样对于图像中的正常区域不会造成退化。常用的算法有相邻像元替代法、线性插值法和中值滤波法等。本文采用中值滤波法, 即对盲元加 5×5 的矩形窗, 取窗口中非盲元像素 DN 值的中间值替代中心盲元像素的 DN 值。

4 实验结果及分析

实验中确定积分时间为 $300 \mu\text{s}$, 温度动态范围为 $250 \sim 330 \text{ K}$, 分别采集 10° 、 15° 、 $\dots$ 、 45° 、 50° 的标准面源黑体的图像。为减少光学系统背景辐射变化对定标精度的影响, 成像过程中必须使光学系统的本体温度在室温下保持稳定不变。对成像系统的输出 DN 值和光学镜头入瞳处的黑体辐射通量密度进行线性拟合辐射定标。

用两点定标法和多点拟合法分别对 25° 、 30° 的黑体成像结果进行非均匀性校正, 其中两点法采用 15° 和 40° 作为定标点。再检测焦平面的盲元位置。测得的焦平面盲元率约为 0.267%。进行盲元补偿后, 计算图像的剩余非均匀性, 所得结果见表 1。根据国标中的定义, 对于一个 M 行 N 列的红外焦平面探测器, 其非均匀性 UR 为

$$U_R = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d + h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (R(i, j) - \bar{R})^2} \quad (20)$$

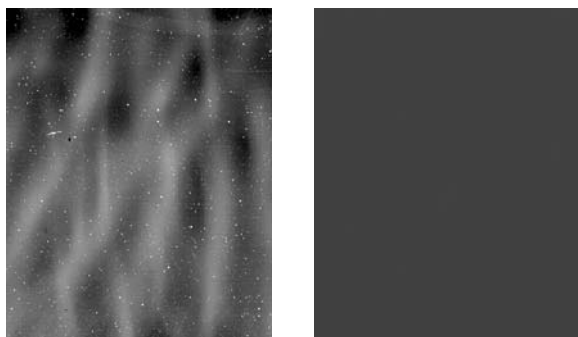
式中, d 和 h 分别为死像元和过热像元个数。

表 1 非均匀性校正结果

		校正前	校正后
25°C 黑体	两点定标法	11.699%	0.432%
	多点拟合法		0.0921%
30°C 黑体	两点定标法	10.874%	0.256%
	多点拟合法		0.0938%

由实验结果看出, MARS VLW RM4 焦平面的非均匀性大于 10%, 较为严重。与波长响应范围为 $7.7 \sim 9.3 \mu\text{m}$ 的 MARS LW K508 热红外焦平面组件相比, 其非均匀性及盲元数量有所恶化。实验证明, 基于辐射定标的多点拟合法的非均匀性校正效果优于两点定标法。图 5 所示为 25°C 黑体图像用多点拟合法校正前后的图像, 图 6 所示为采集的外景图像用多点拟合法进行非均匀性校正和盲元补偿前后的图像。

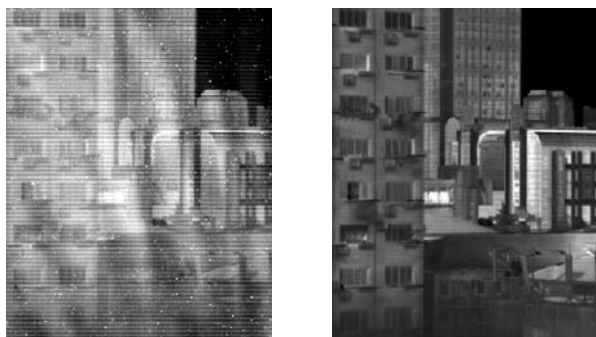
经非均匀性校正和盲元补偿后,焦平面各像元的响应曲线趋于一致。根据式(12),由成像系统输出 DN 值反演成像黑体的温度,结果见表 2。结果表明,由辐射定标结果可较精确地反演成像黑体的温度,误差的产生主要来自定标黑体的比辐射率误差、黑体测温控温误差、系统本身的探测灵敏度限制以及计算误差等因素。



(a) 校正前

(b) 校正后

图 5 25°C 黑体的非均匀性及盲元校正结果



(a) 校正前

(b) 校正后

图 6 外景的非均匀性及盲元校正结果

表 2 热红外图像黑体温度的反演结果

黑体温度	反演结果	相对误差
10°C(283.15 K)	283.011 K	0.049%
20.1°C(293.25 K)	293.286 K	0.012%
35°C(308.15 K)	308.188 K	0.012%
40°C(313.15 K)	313.136 K	0.004%
45°C(318.15 K)	318.116 K	0.011%
50°C(323.15 K)	323.044 K	0.033%

5 结论

与中短波器件相比,热红外焦平面的响应极易受到成像系统的温度等因素的影响,非均匀性及盲元更为严重。本课题基于 Sofradir 公司生

产的 MARS VLW RM4 长波热红外面阵探测器,实现了一套动态范围为 250~330 K、NETD≤50 mK 的热红外成像系统。根据热红外焦平面的响应特性,研究了适用于热红外成像应用的盲元补偿和非均匀性校正方法,提出了基于成像系统辐射定标的多点拟合法。其校正效果在大动态范围内明显优于两点定标法,且该法易于在工程中实时实现。经非均匀性校正后,焦平面各像元的响应特性趋于一致,可基于共同的辐射定标公式实现较为精确的温度反演。为进一步提高温度反演的精度,在辐射定标中考虑成像系统本体温度等因素对响应参数的影响是进一步研究的方向之一。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 林颖, 徐卫明, 袁立银, 等. 热红外高光谱非均匀性校正及光谱特征提取 [C]. 第八届成像光谱技术与应用研讨会暨交叉学科论坛文集, 2010.
- [4] 刘会通, 易新建. 红外焦平面阵列非均匀性的两点校正及依据 [J]. 红外与激光工程, 2004, 33(1): 76-78.
- [5] Boltar K O, Bovina L A, Saginov L D, et al. IR imager based on a 128×128 HgCdTe staring focal plane array[C]. International Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices. International Society for Optics and Photonics, 1999: 92-95.
- [6] Manissadjian A, Tribolet P, Destefanis G, et al. Long wave HgCdTe staring arrays at Sofradir: from 9 μm to 13+ μm cut-offs for high performance applications[C]. Defense and Security. International Society for Optics and Photonics, 2005: 231-242.
- [7] Mars LW K508 320×256/256×256 LW IR Comos Multimode Integrated Detector Dewar Cooler Assembly(iddca) with Microcooler Type K508 Technical Specification[Z]. Sofradir Corp. 2004.
- [8] 张晓龙, 刘英, 孙强. 高精度非致冷长波红外热像仪的辐射标定 [J]. 中国光学, 2012, 5(3): 235-241.
- [9] 陈锐, 谈新权. 红外图像非均匀性校正方法综述 [J]. 红外技术, 2002, 24(1): 1-3.
- [10] 陈大川, 刘缠牢, 郑阳光. 红外焦平面阵列盲元检测及补偿算法 [J]. 激光与红外, 2008, 38(12): 1215-1217.