

基于辐射标定的积分时间实时调整方法

李满良^{1,2,3}, 吴钦章¹, 夏默¹, 吴淑文³

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国人民解放军63610部队, 新疆 库尔勒 841001)

摘要:积分时间调整是扩展红外辐射测量系统动态范围的主要手段,针对再入高速目标因辐射剧烈变化存在积分时间调整影响实时跟踪和图像饱和的问题,提出基于辐射标定的积分时间实时调整方法.该方法通过辐射标定得到不同积分时间的响应度和偏置,利用跟踪器提取的目标和背景信息计算光学入瞳处当前积分时间的目标和背景辐射;再反演计算其他积分时间的目标和背景信息,并以此计算跟踪判据,自动确定最佳积分时间.实验证明,该方法能准确预测满足跟踪要求的最优积分时间,有效减少测量过程中积分时间调整次数,目标连续跟踪正确率达100%.

关键词:积分时间;实时调整;辐射标定;动态范围;辐射特性测量系统

中图分类号:TN216;TP732.2 **文献标识码:**A

Integral time real-time adjust method based on radiation calibration

LI Man-Liang^{1,2,3}, WU Qin-Zhang¹, XIA Mo¹, WU Shu-Wen³

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

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

3. Unit 63610 of PLA, Kuerle 841001, China)

Abstract: The integral time adjustment is the primary means to extend the dynamic range of the infrared radiation measuring system. A real-time integral time adjustment method based on radiation calibration was put forward according to the radiation dramatic changes for the re-entry high-speed target, tracking affection and image saturation when integral time is adjusted. Radiation calibration can get the response and the bias of different integral time; the target radiance and the background radiance at the entrance pupil can be calculated by the target information and the background information. Then, the target's and the background's signal value on the other integral time can be computed by the target radiance and the background radiance. The optimal integral time can be predicted by the tracking criterion. Experimental results show that the method can accurately locate the optimal integral time, reduce the number of integral time adjustment in the measurement process, and realize the target continuous tracking accuracy rate of 100%.

Key words: integral time, real-time adjust, radiation calibration, dynamic range, radiation characteristics measurement system

PACS: 07.57.Kp, 85.25.Pb

引言

红外热成像技术是把红外辐射转换为可视图像的技术,利用景物自身辐射的差异获得图像的细节^[1].红外辐射特性测量则是在红外热成像技术的

基础上,通过标定技术来获取目标的辐射强度或辐射亮度^[2-3].如果被测目标辐射变化大,则对测量系统的动态范围提出了一定的要求^[4].如果说动态范围小对热成像系统只是丧失部分图像细节的话,对红外辐射特性测量系统则使测量数据无效^[5-7].目前

收稿日期:2012-10-21,修回日期:2013-07-20

基金项目:国家863高技术项目(G107309)

Foundation items: Supported by 863 high-tech projects of China (G107309)

作者简介(Biography):李满良(1970-),湖南双峰人,高级工程师,博士,主要从事光学目标特性测量及其数据处理方面的研究,E-mail: lml50927@sina.com.

Received date: 2012-10-21, revised date: 2013-07-20

扩展动态范围的技术途径主要有两类:光强衰减和积分时间调整^[8].光强衰减方法由于实时性差,一般只用于事前设定,积分时间调整则由于实时性较好,在实时测量系统中经常被采用^[9-10].

目前,地基红外辐射特性测量系统大都采用积分时间调整来满足宽动态范围的要求,但是在积分时间调整时红外焦平面探测器输出图像会出现短暂异常,使跟踪系统无法输出连续的目标位置,特别是当目标辐射变化剧烈时,积分时间连续进行调整,容易导致目标丢失,而不进行积分时间调整则目标饱和,测量数据无效.针对这种现象,本文提出基于辐射标定的积分时间实时调整方法,通过辐射标定参数计算不同积分时间的目标和背景数值,实时确定最佳积分时间,并利用快速升温的黑体模拟目标进行仿真实验,实验结果表明该方法能准确确定最优积分时间,保证积分时间调整不影响跟踪和目标不饱和.

1 积分时间调整时的影响

1.1 积分时间调整对图像的影响

红外焦平面探测器在收到改变积分时间指令时,首先中止当前图像数据的输出,然后更改探测器的积分时间,根据指令发送时刻的不同,会出现后续1帧或2帧的图像异常.工程应用中,指令发送时刻为帧开始时刻,保证探测器积分时间调整在一帧时间内完成,从而保证最多只有一帧图像异常或无异常图像^[7].图1为某红外辐射特性测量仪在积分时间由5 ms调整为1 ms时图像变化情况.

1.2 积分时间调整对跟踪的影响

跟踪器针对红外探测器输出的数字图像,采用数字滤波、二值化、图像分割、目标匹配、航迹关联等技术来计算目标轨迹.红外图像均匀性校正的好坏直接影响目标提取,为保证积分时间改变后红外探测器输出图像的均匀性,一般采用事前校正并记录校正系数,切换积分档位时再调用相应档位的校正系数来完成均匀性校正.由于探测器头部电路中存储空间的限制,只能存储有限积分时间的校正表,这也是红外辐射特性测量系统积分时间无法连续调整的主要原因^[10].

在传统的辐射测量过程中,系统根据目标辐射变化情况,逐次增加或减少积分时间,即积分档位是逐次进行调整的.因此,如果被测目标动态范围大且变化剧烈,则系统会连续发送积分时间调整指令,此时输出图像序列会正常、异常交替变化,导致跟踪器

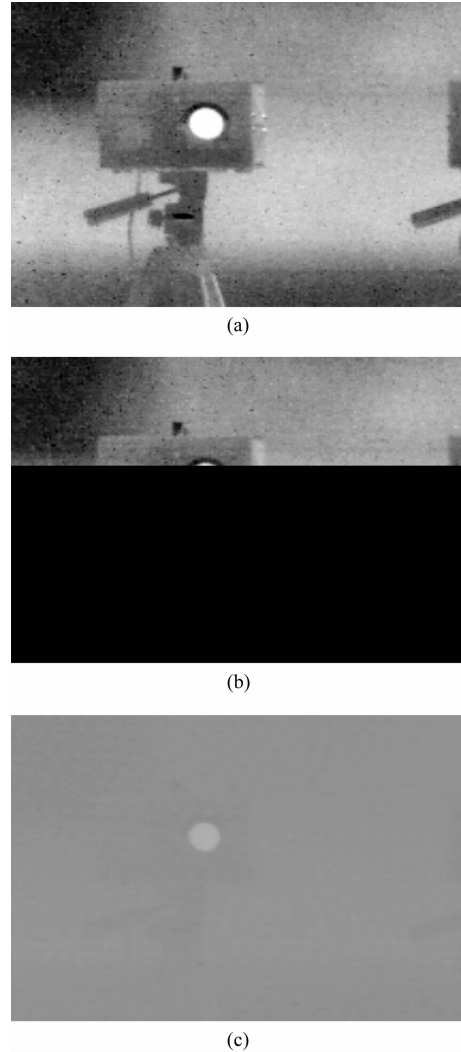


图1 某设备积分时间调整时输出图像情况
Fig. 1 The output images during integral time adjustment

无法输出正确的目标航迹.表1为积分档位连续调整时目标跟踪情况仿真结果,计算条件如下:

- 积分调整判据:目标最大数值大于量程的90%;
- 跟踪器记忆跟踪为3帧;
- 航迹关联为5帧;
- 目标丢失判据:输出脱靶量异常;
- 随机设定初始档位,计算1 000次.

表1 积分档位连续调整时目标跟踪情况
Table 1 Tracking results during integral time adjustment

连续调整次数	目标丢失次数	跟踪正确率
1	2	99.8%
2	23	97.7%
3	369	63.1%
4	676	32.4%
5	893	10.7%

从表 1 中可以看出,当连续调整次数大于 2 以后,跟踪正确率迅速降低。

造成目标丢失的主要原因是连续调整时对记忆跟踪和航迹关联的影响,特别是连续调整次数大于 3 以后,较难获取至少连续三帧的目标指示信息,航迹关联的正确率迅速下降。因此,如果对积分档位调整间隔进行限制,即在第一次调整完成后,必须在 n 帧后才允许再次调整,以保证跟踪器有足够的帧数来完成航迹重建。表 2 仿真计算了间隔分别为 3、4、5 帧时的跟踪效果,计算条件同前。

表 2 积分档位调整间隔不同时目标跟踪情况
Table 2 Tracking results in different interval

调整次数	间隔 3 帧		间隔 4 帧		间隔 5 帧	
	丢失次数	正确率	丢失次数	正确率	丢失次数	正确率
1	2	99.8%	0	100%	0	100%
2	12	98.8%	0	100%	0	100%
3	117	88.3%	0	100%	0	100%
4	246	75.4%	2	99.8%	0	100%
5	303	69.7%	4	99.6%	0	100%

从表 2 可以看出,当间隔大于等于 5 帧后,积分档位调整已经不影响实时跟踪了。虽然通过设置最小间隔的方法能保证跟踪连续,但存在部分测量段落目标饱和问题,对辐射特性测量系统而言测量数据无效。

2 基于辐射标定的积分时间实时调整法

红外辐射特性测量系统是在红外成像测量系统的基础上,采用标定技术来反演得到目标的辐射特性,因此在进行辐射特性测量前必须先进行辐射标定,建立图像数据与入瞳辐射之间的关系。

2.1 辐射标定

图 2 为辐射标定原理示意图,面元黑体辐射辐

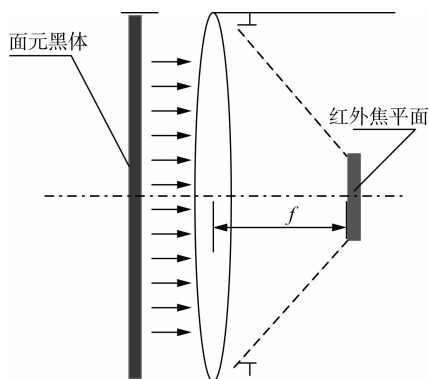


图 2 辐射标定原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of radiation calibration

射到红外焦平面探测器的每一个像元。辐射定标模型为

$$DN = A_k \times L_{bb} + DN_{0,k} \quad , \quad (1)$$

其中, DN 为红外探测器输出值, A_k 为待标定的探测器辐射亮度响应度, L_{bb} 为黑体在探测器响应波段内的辐射亮度, $DN_{0,k}$ 为探测器自身光机结构热辐射、散射背景辐射以及探测器暗电流偏移值, 下标 k 为积分时间档位。黑体辐射亮度 L_{bb} 通过普朗克公式计算

$$L_{bb} = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} d\lambda \quad , \quad (2)$$

式中, $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为探测器响应波段, ε 为黑体发射率, T 为黑体工作温度 (K), $C_1 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^8 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (\text{m}^{-4}))$, $C_2 = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4 (\text{m} \cdot \text{K})$ 。

针对不同积分时间档位,通过改变黑体温度,可以得到一系列的 DN 和 L_{bb} 值,采用最小二乘法进行线性拟合得到探测器响应度 A_k 和偏移量 $DN_{0,k}$,即得到辐射标定参数 A_k 和 $DN_{0,k}$,并同步获得探测器各积分时间档位的线性响应区 $[DN_{min,k}, DN_{max,k}]$ 。

2.2 最优积分时间确定

红外辐射特性测量系统在跟踪再入目标的过程中,目标辐射是一个由弱而强的过程,初始积分时间一般设定在较长时间档位;红外跟踪器提取目标并将目标脱靶量、目标和背景信息传送给主控系统,主控系统根据目标信息判断是否进行积分时间调整,常规方法是目标数值大于 $DN_{max,k}$ 时,积分时间变小,目标数值小于 $DN_{min,k}$ 时,积分时间变大,并且是逐档进行调整。

准确预测最优积分时间档位,就必须能获得调整积分时间后的目标和背景信息。下面介绍利用辐射标定获取积分时间调整后目标和背景信息的方法。为方便表述,假设积分时间档位 k 的取值范围为 $0 \sim N$,且积分时间是从长到短。设当前积分时间为 k ,目标和背景数值分别为 $DN_{t,k}$ 和 $DN_{b,k}$,则根据式(1)和辐射标定参数 A_k 和 $DN_{0,k}$,可求出目标和背景到达光学入瞳处的辐射亮度 $L_{t,k}$ 和 $L_{b,k}$ 分别如下:

$$L_{t,k} = \frac{DN_{t,k} - DN_{0,k}}{A_k} \quad , \quad (3)$$

$$L_{b,k} = \frac{DN_{b,k} - DN_{0,k}}{A_k} \quad . \quad (4)$$

那么就可以计算在其它积分时间档位下的目标和背景数值,即有

$$DN_{t,i} = A_i \times L_{t,k} + DN_{0,i} \quad , \quad (5)$$

$$DN_{b,i} = A_i \times L_{b,k} + DN_{0,i} \quad , \quad (6)$$

式中 i 为积分时间档位且满足 $0 \leq i \leq N$.

因为再入目标不会在两帧内发生突变,可以认为连续两帧的目标和背景辐射不变,也就是说下一帧如果改变积分时间,其目标和背景的数值可能通过式(5)、式(6)的计算得到.图3为积分时间档位判断流程,以目标数值高出背景数值的比例作为跟踪判断条件,调整时从最短积分时间开始判断,直至满足跟踪条件为止.这种判断方式,能直接定位到满足跟踪要求的最短积分时间档位,保证连续两帧目标变化比较剧烈时留有较大余量,增加调整间隔,减少调整次数,有利于目标跟踪.

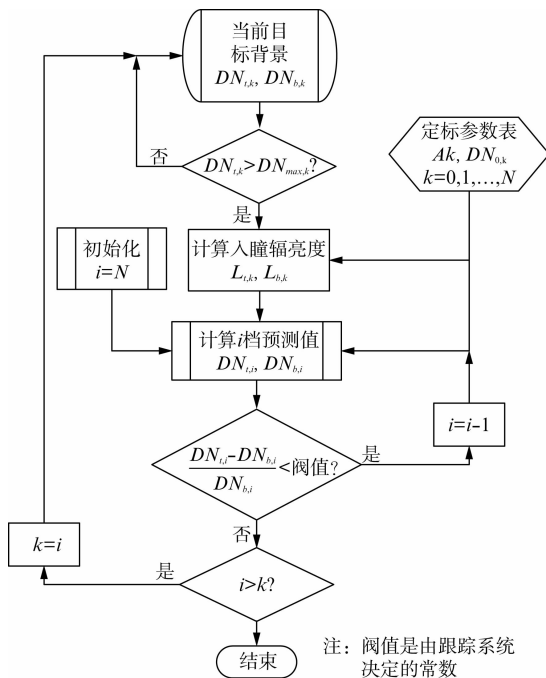


图3 积分时间档位预测判断流程图

Fig.3 Flow chart of integral time forecast

3 验证实验

为了验证积分时间实时调整方法的正确性,搭建了简易实验平台,由中波红外相机、标定黑体、高温腔式黑体组成,其中红外相机模拟辐射特性测量系统,标定黑体用于辐射标定,高温腔式黑体作为模拟目标,如图4所示.中波红外相机主要参数如下:响应波段 $3.7 \sim 5.12 \mu\text{m}$,积分时间范围 $10 \mu\text{s} \sim 10 \text{ms}$,输出位数 14 位.相机镜头口径 $\Phi 80 \text{mm}$,焦距 160mm ;标定黑体选用美国 ISDC IR150 型面元黑体,主要参数如下:口径 $300 \text{mm} \times$

300mm ,温度范围室温 $+5 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$,发射率 0.97 .高温腔式黑体采用上海福源光电技术有限公司的 HFY-205A 型黑体,主要参数如下:温度范围室温 $+5 \sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$,有效辐射孔径 $\Phi 60 \text{mm}$,发射率 0.95 ,温控精度 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$.

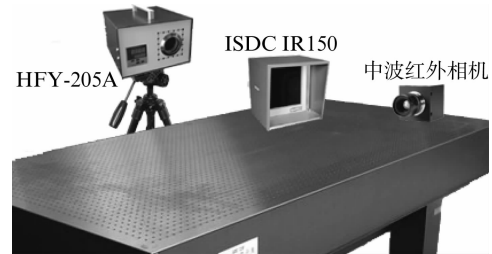


图4 验证平台

Fig.4 Experimental platform

3.1 辐射标定

首先利用 ISDC IR150 型面元黑体对中波红外相机进行事前辐射标定,分别对积分时间 5ms 、 3ms 、 2ms 、 1ms 、 0.5ms 、 0.2ms 、 0.1ms 进行了标定,得到了各个积分时间档位的标定参数 A_k 和 $DN_{0,k}$,结果见表 3.

3.2 积分时间实时调整实验

实验时,中波红外相机对准高温腔式黑体 HFY-205 A,将黑体温度设置为 $500 \text{ }^\circ\text{C}$,使黑体快速升温,在升温过程中中波红外相机自动进行积分时间实时调整.积分时间调整判据为目标数值大于相机线性响应区间的顶端,跟踪判据设为目标数值高出背景数值 50% .

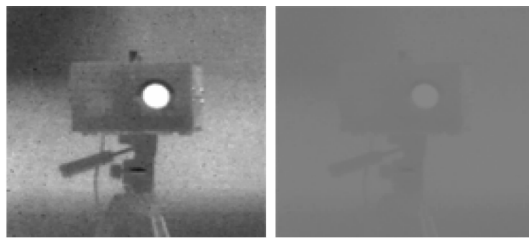
首先将红外相机初始积分时间设为 5ms 档,当黑体温度达到 $85.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,相机积分时间自动切换到 0.5ms 档;然后手动将积分时间切换回 3ms 档,当黑体温度达到 $100.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,相机积分时间自动切换到 0.2ms 档;再一次将积分时间手动切换回 2ms 档,当黑体温度达到 $121.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,相机积分时间自动切换到 0.1ms 档.经多次重复实验,积分时间自动切换档位一致.

图5为积分时间调整前后的图像,表4为积分时间自动切换过程中相关数据变化情况.由表4可以看出,当目标信号达到积分时间切换条件时,采用基于辐射标定的积分时间调整法能准确预测恰当的积分档位,调整后的目标数值约为线性响应区底端的 1.5 倍,目标数值高出背景数值均在 60% 以上,达到了增加调整间隔、减少调整次数和保证实时跟踪的目的.

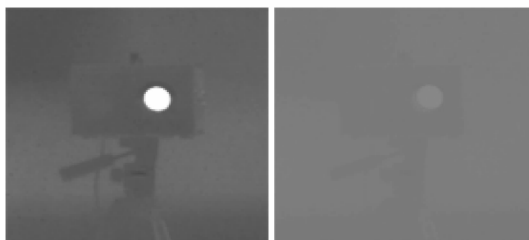
表3 各积分档位的标定参数

Table 3 Calibration parameters different integral time

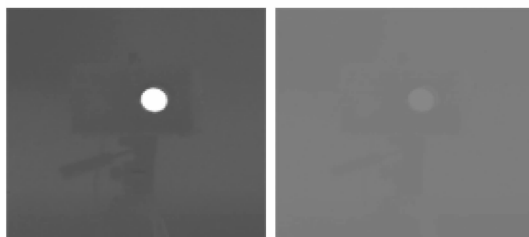
档位	积分时间(ms)	响应度 A_k	偏置 $DN_{0,k}$	线性响应区间
1	5	1 786.29	5 064.3	5 100 ~ 14 700
2	3	1 339.68	3 900.3	4 000 ~ 14 700
3	2	839.07	2 890.7	3 000 ~ 14 700
4	1	612.37	2 426.8	2 500 ~ 14 700
5	0.5	321.51	2 006.4	2 100 ~ 14 700
6	0.2	208.47	1 906.2	2 000 ~ 14 700
7	0.1	126.83	1 857.3	1 900 ~ 14 700



5 ms→0.5 ms(黑体85.5 °C)



3 ms→0.2 ms(黑体100.2 °C)



2 ms→0.1 ms(黑体121.4 °C)

图5 积分时间调整前后图像

Fig. 5 Images when integral time changes

表4 积分时间自动切换过程相关数据变化情况

Table 4 Related data when integral time automatically adjusts

黑体温度	调整前				调整后			
	积分时间	目标数值	背景数值	跟踪判据	积分时间	目标数值	背景数值	跟踪判据
85.8 °C	5ms	14 703	6 120	140.2%	0.5ms	3 740	2 196	70.3%
100.2 °C	3ms	14 701	4 807	205.8%	0.2	3 320	2 009	65.2%
121.4 °C	2ms	14 705	3 480	322.5%	0.1	3 220	1 955	64.7%

为了验证积分时间调整方法的适用条件,实验了2次连续积分时间调整黑体温度变化情况.首先将积分时间设为5 ms,黑体开始升温,85.5 °C时积分时间调整一次,175.7 °C时再调整一次;然后将黑

体降温,并将积分时间设为3 ms,升温黑体到100.2 °C时积分时间调整一次,196.6 °C时再调整一次;再将黑体降温,并将积分时间设为2 ms,升温黑体到121.4 °C时积分时间调整一次,224.4 °C时再调整一次.可以看出连续2次积分时间调整的温度间隔分别为90.2 °C、96.4 °C、103.0 °C,说明随着积分时间的缩短,连续2次调整积分时间的温度间隔呈上升趋势.假设红外探测器工作频率为50 Hz,要满足连续2次积分时间调整间隔小于5帧,则只要目标等效温度变化速度不大于902.0 °C/s即可.因此该方法能满足再入高速目标的辐射测量需要,对目标爆炸的情况则由于全视场信号瞬时饱和不适用.

4 结论

通过分析积分时间调整影响实时跟踪和图像饱和的原因,利用辐射标定得到不同积分时间的标定参数和跟踪器提取的目标、背景信息,计算得到入瞳处的目标和背景辐射亮度,成功反演其他积分时间的目标和背景信息,能实时确定满足跟踪要求的最优积分时间.利用中波红外相机和黑体进行的验证实验也表明了该方法的有效性,解决了因目标辐射变化剧烈积分时间调整影响实时跟踪和目标饱和的难题.该方法适用于除目标爆炸外的情况,连续跟踪正确率达100%.

References

- [1] YANG Ci-Yin, ZHANG Jian-Ping, CAO Li-Hua. Infrared radiation measurement based on real-time correction[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨词银, 张建萍, 曹立华. 基于实时标校的红外辐射测量新方法. *红外与毫米波学报*), 2011, **30**(3): 284-288.
- [2] TAO Kun-Yu, LI Fu-Wei, ZHOU Yan-Ping, et al. IRFPA imaging system dynamic range adaptive adjust technology [J]. *Infrared and Laser Engineering* (陶坤宇, 李福巍, 周彦平, 等. 红外焦平面成像系统动态范围自适应技术研究. *红外与激光工程*), 2008, **49**(2): 265-269.
- [3] LENG Han-Bing, TANG Xin-Yi, PENG Ding-Xiang. Research on non-uniformity correction of IRFPA based on integral time adjust [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (冷寒冰, 汤心溢, 彭鼎祥. 基于积分时间调整的红外焦平面阵列非均匀校正算法研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(4): 246-250.
- [4] WANG Rui, SHAO Xiao-Peng, XU Jun, et al. Study on improving dynamic range of infrared imaging system based on calibrating integration time [J]. *Infrared Technology* (王锐, 邵晓鹏, 徐军, 等. 基于定标积分时间法提高红外成像系统动态范围的研究. *红外技术*), 2009, **32**(7): 381-385.
- [5] YANG Ci-Yin, ZHANG Jian-Ping, CAO Li-Hua. Infrared radiation measurement based on proportional corrected at-

- mospheric transmittance[J]. *Optics and Precision Engineering*(杨词银,张建萍,曹立华. 基于大气透过率比例校正的目标辐射测量. *光学精密工程*), 2012, **20**(7): 1626-1635.
- [6] QU Hui-Ming, CHEN Qian. Surrounding temperature compensation for infrared focal plane arrays non-uniformity correction[J]. *Infrared and Laser Engineering*(屈惠明,陈钱. 环境温度补偿的红外焦平面阵列非均匀性校正. *红外与激光工程*), 2011, **40**(12): 2328-2332.
- [7] Li Xian-sheng, REN Jian-Wei, ZHANG Li-Guo, *et al.* Research on a radiometric calibration device for a large aperture infrared opto-electrics system on spot[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*(李宪圣,任建伟,张立国,等. 大口径红外光电系统现场辐射定标装置的研究. *光电子激光*), 2006, **17**(2): 175-178.
- [8] BAI Jun-Qi, CHEN Qian, QIAN Wei-Xian, *et al.* Non-uniformity correction for infrared focal plane arrays based on environmental temperature[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(白俊奇,陈钱,钱惟贤,等. 基于环境温度的红外焦平面阵列非均匀性校正. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(1): 49-52.
- [9] HUO Xiao-Jiang, GUO Zhao-Min, ZHANG Zhi-Heng, *et al.* Research on non-uniformity correction of IRFPA based on integration time[J]. *Infrared and Laser Engineering*(霍晓江,郭肇敏,张志恒,等. 基于积分时间的IRFPA非均匀性校正方法研究. *红外与激光工程*), 2008, **37**(s2): 604-607.
- [10] LU Jian-Feng. Design of real-time processing system for IR image tracking based on digital signal processor[J]. *Infrared and Laser Engineering*(鲁剑锋. 红外图像跟踪基于数字信号处理器的实时处理系统的设计. *红外与激光工程*), 2008, **37**(s2): 622-625.