

红外小目标辐射测量方法

常松涛^{1,2} 张尧禹¹ 孙志远¹ 朱 玮¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 进行辐射测量时,目标尺寸过小或者距离很远都会导致其在红外探测器上成像面积较小以至于不能作为扩展源直接测量,另外目标成像往往占据多个像元,因此也无法作为传统意义上的点源处理。为解决这一问题,在现有的点源目标测量方法的基础上,提出了一种针对红外小目标的辐射特性测量方法。通过实验和理论分析研究了小目标成像特征,说明其辐射测量与扩展源的不同;通过对目标成像区域去除背景辐射推导小目标辐射测量公式;利用中波红外成像系统进行小目标的辐射测量实验,实验结果证明了该方法的有效性。

关键词 测量;红外辐射;小目标;点源;扩展源;辐射亮度

中图分类号 TP732.2 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0504001

Radiation Measurement Method for Infrared Small Targets

Chang Songtao^{1,2} Zhang Yaoyu¹ Sun Zhiyuan¹ Zhu Wei¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract During a radiation measurement mission, the target size may be too small or quite far away, which results in small infrared target images that can not be measured directly as an extended source. However, the target image tends to occupy several pixels, and therefore can not be treated as a traditional point source. Aiming at this problem, a small target radiation characteristics measurement method, based on the traditional measurement method of point source is proposed. The imaging characteristics of small targets are studied by experiments and theoretical analysis for the purpose to explain the difference between extended source and small target. A formula for small target radiation measurement is deduced by subtracting the background radiance from the target area. Finally, a mid-wave infrared imaging system is used for small target radiometric experiments, and the results indicate that the proposed method is effective.

Key words measurement; infrared radiation; small target; point source; extended source; radiance

OCIS codes 040.2480; 040.3060; 120.5630

1 引 言

红外目标辐射特性测量是探测识别目标、获取目标表面温度分布和评价目标红外隐身效果的基础技术之一。根据在成像系统探测器阵列上所成像的大小,红外目标一般分为扩展源和点源(理想几何成像面积不足一个像元的目标)两类。传统的辐射特性测量任务中目标通常为扩展源,那么只需要获得

目标成像的像元灰度值、大气透射率、程辐射和目标表面的发射率就可以计算出目标表面辐射亮度和温度^[1]。实际上大气湍流、衍射和光学系统像差等因素会导致目标成像能量发散,目标图像边缘模糊^[2]。因此目标成像尺寸较小时其红外图像灰度值降低,表现为一个弥散斑,无法作为扩展源直接测量,通常称此类目标为小目标。小目标辐射特性测量可应用于

收稿日期: 2013-11-13; **收到修改稿日期:** 2013-12-02

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121502)

作者简介: 常松涛(1988—),男,博士研究生,主要从事红外辐射测量方面的研究。E-mail: stchang2010@sina.com

导师简介: 张尧禹(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电跟踪及瞄准方面的研究。

E-mail: zhangyaoyu2013@sina.com

检验相机的性能和远距离目标的红外隐身效果等。

目前关于红外小目标的研究主要分为两个方向:1)红外小目标的检测和跟踪,关注的参量主要是目标的中心位置和尺寸而不涉及目标辐射亮度的测量,其主要用途在于尽早发现和准确定位目标^[3-7]; 2)点源目标的辐射特性测量,主要关注的参数是目标的辐射亮度,要求点源目标成像在一个像元以内,并且已知目标的理想成像面积^[8]。在此基础上,考虑到虽然目标成像弥散到多个像元,但是到达红外探测器焦平面阵列的目标总能量不变,本文提出了一种针对小目标(包括点源目标)的辐射测量方法,

并利用中波红外成像系统进行小目标的辐射测量实验,结果表明该方法具有较高的精度。

2 小目标成像特征

为了说明小目标成像特征,利用CI公司的SR-200LT腔型黑体进行了实验。黑体温度 50 °C,出射口径(单位 mm)通过靶轮调节;中波红外相机焦距 50 mm, $F=2$;黑体距离相机 2.64 m 处清晰成像,如图 1(a)所示,作一条贯穿圆斑中心的直线,得到像元输出灰度值随探测器像元位置变化的曲线,如图 1(b)所示,图中像元数表示圆孔理想成像直径。

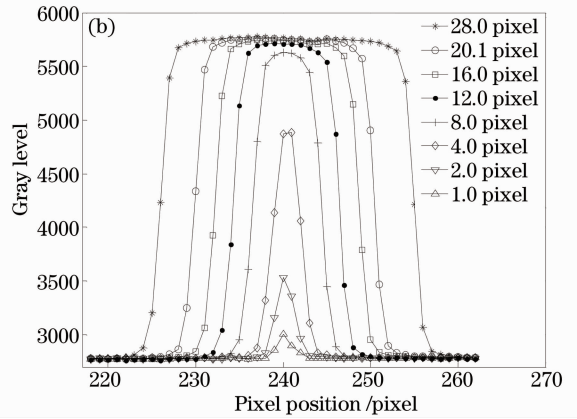
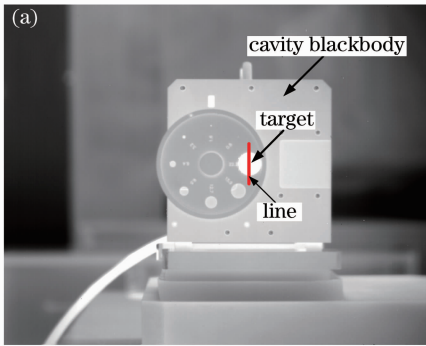


图 1 不同尺寸的圆形目标成像。(a) 2.64 m 处腔型黑体成像; (b) 探测器像元灰度值随位置变化曲线
Fig. 1 Image of circular targets at different sizes. (a) Image of the cavity blackbody at a distance of 2.64 m; (b) graylevel of detector pixel versus position

可见,对于该红外成像系统,圆孔理想成像直径达到 12 pixel 以上时成像像元的灰度峰值接近,即可以认为是扩展源。而圆形目标理想成像直径小于 12 pixel 时,灰度峰值下降,这时作为扩展源处理就会产生很大的误差。由图 1(b)可知,小目标成像的特点有:灰度峰值比扩展源低,并且目标尺寸越小,峰值越低;目标成像边缘模糊,并且光斑直径大于理想几何成像,目标成像能量扩散到附近的像元。

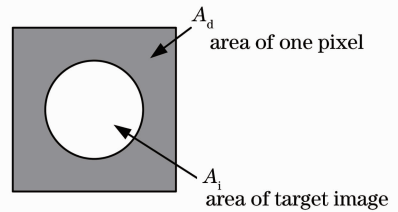


图 2 理想点源目标成像
Fig. 2 Image of ideal point source

3 传统的点源辐射特性测量方法

通常如果一个红外目标理想成像范围小于单个像元的瞬时视场角(IFOV),那么称该目标为点源。然而衍射和像差等因素将导致目标成像能量弥散,即限制成像的最小尺寸^[8]。那么可以将点源目标成像分为三种情况:1)没有弥散时利用几何方法所成的像;2)弥散斑面积小于像元面积时所成的像;3)弥散斑面积大于像元面积时所成的像。传统的点源辐射测量方法针对上述前两种情况,即目标实际成像在一个像元以内,如图 2 所示。

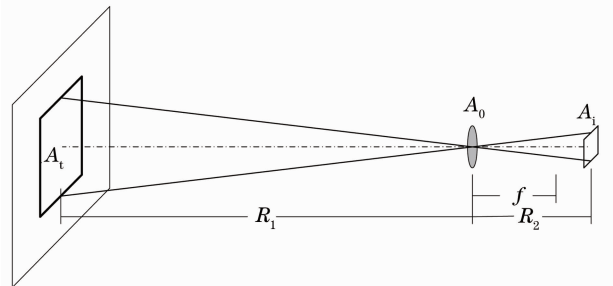


图 3 目标通过红外光学系统成像时的物像关系
Fig. 3 Geometry describing the relationship between target and image

红外系统成像原理如图 3 所示, A_t 为目标(黑体辐射源)面积, A_0 为红外成像系统入瞳面积, A_i 为目标理想几何成像面积。假设目标辐射亮度为

$$\Phi_d = \frac{\pi}{4} \frac{\tau_{\text{atm}} \cdot [L_t \cdot A_i + L_b \cdot (A_d - A_i)] + L_{\text{path}} \cdot A_d}{F^2 (1 + M)^2} \cdot \tau_{\text{sys}}, \quad (1)$$

式中 τ_{atm} 为大气透射率, L_{path} 为大气程辐射, τ_{sys} 为红外光学系统透射率, F 为系统 F 数, 放大率 $M = R_2/R_1$, 由 $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{f}$ 得到 $M = \frac{f}{R_1 - f}$ 。

一般探测器的响应是线性的, 所以单个像元的灰度值为

$$h_d = \tau_{\text{atm}} \cdot \frac{\pi \cdot \tau_{\text{sys}} \cdot A_d}{4F^2 (1 + M)^2} \cdot G_0 \cdot L_t \cdot \frac{A_i}{A_d} + \frac{\pi \cdot \tau_{\text{sys}} \cdot A_d}{4F^2 (1 + M)^2} \cdot G_0 \cdot [\tau_{\text{atm}} \cdot L_b \cdot \left(1 - \frac{A_i}{A_d}\right) + L_{\text{path}}] + B_0. \quad (3)$$

$$\text{令 } G = \frac{\pi \cdot \tau_{\text{sys}} \cdot A_d}{4F^2 (1 + M)^2} \cdot G_0, \text{ 则}$$

$$h_d = \tau_{\text{atm}} \cdot GL_t \cdot \frac{A_i}{A_d} + G \cdot [\tau_{\text{atm}} \cdot L_b \cdot \left(1 - \frac{A_i}{A_d}\right) + L_{\text{path}}] + B_0, \quad (4)$$

式中 G 为探测器单个像元对目标辐射亮度的响应, A_i/A_d 为目标理想成像面积在单个像元中占的比例。

探测器单个像元面积 A_d 已知, G 和 B_0 可以通过近距离面源黑体定标获得^[9], 目标理想几何成像面积 A_i 可以通过目标的尺寸、成像距离以及红外系统参数解算, τ_{atm} 和 L_{path} 由 Modtran 大气传输软件^[10-11] 计算获得。因此只需要获得目标像元的灰度值 h_d , 就可以计算目标辐射亮度 L_t , 进而根据普朗克公式得出温度等其他辐射量。

4 小目标辐射特性测量方法

实际上, 由于大气、光学系统衍射和像差等因素的影响, 小目标包括点源目标成像的弥散斑面积往往大于探测器像元面积, 即目标成像占据多个像元, 这就无法采用传统的点源测量方法进行处理。

在传统的点源辐射特性测量方法的基础上, 提出了针对小目标的测量方法。该方法需要三个前提条件: 1) 探测器的填充系数接近 100%, 以保证探测器阵列能接收到目标成像的所有能量。目前用于中波红外辐射测量的碲镉汞(HgCdTe) 焦平面阵列探测器填充系数几乎为 100%^[12-13]; 2) 背景辐射亮度(温度)均匀。选中目标成像的圆斑进行计算时, 不可避免地带有背景信息, 因此要保证背景均匀性才

L_t , 背景辐射亮度为 L_b , 像元面积为 A_d , 则到达目标成像像元的辐射通量为

$$h_d = G_0 \cdot \Phi_d + B_0, \quad (2)$$

式中 G_0 为探测器单个像元对入射辐射通量的响应, B_0 为偏置。

(1)式代入(2)式得到

能将目标辐射与背景辐射分离开来; 3) 探测器阵列各单元响应均匀, 通过非均匀校正来实现^[14-15], 以便于识别和选定目标, 保证测量精度。

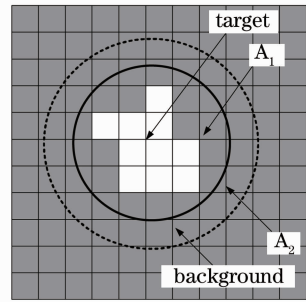


图 4 小目标成像示意图

Fig. 4 Schematic of small target imaging

该方法的原理如图 4 所示, 选取的目标区域面积为 A_1 , 区域内共有 N_1 个像元, 其中包含所有含有目标成像能量的像元和一部分背景成像像元, 即目标成像的所有能量在 A_1 内。 A_2 区域含有 N_2 个像元, 范围包含 A_1 , 因此 A_1 和 A_2 之间的区域只包含背景, 称为背景区域, 像元数为 $N_2 - N_1$, 面积为 $(N_2 - N_1)A_d$ 。那么背景灰度值均值为

$$h_b = \frac{\sum_{i=1}^{N_2 - N_1} h_{b,i}}{N_2 - N_1}, \quad (5)$$

式中 $h_{b,i}$, $i = 1, 2, \dots, N_2 - N_1$ 为背景区域像元灰

度值。

由公式 $h_b = \tau_{\text{atm}} \cdot G \cdot L_b + G \cdot L_{\text{path}} + B_0$ 得到背景辐射亮度为

$$L_b = \frac{h_b - G \cdot L_{\text{path}} - B_0}{\tau_{\text{atm}} \cdot G}. \quad (6)$$

假设 A_i 为目标理想成像面积,那么 A_i 区域内的背景面积为 $N_1 \cdot A_d - A_i$,由目标成像物像关系得到目标理想成像面积为

$$A_i = M^2 \cdot A_t = \left(\frac{f}{R_1 - f} \right)^2 \cdot A_t. \quad (7)$$

而所选取的目标区域 A_i 内所有像元的灰度值之和为

$$h_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^{N_1} h_i. \quad (8)$$

其中,背景辐射的贡献为

$$h_{\text{sum,background}} = \frac{N_1 \cdot A_d - M^2 \cdot A_t}{A_d} (\tau_{\text{atm}} \cdot G L_b + G \cdot L_{\text{path}} + B_0). \quad (9)$$

目标辐射的贡献为

$$h_{\text{sum,target}} = \frac{M^2 \cdot A_t}{A_d} (\tau_{\text{atm}} \cdot G \cdot L_t + G \cdot L_{\text{path}} + B_0). \quad (10)$$

而 A_1 区域内所有像元灰度值之和为

$$h_{\text{sum}} = h_{\text{sum,background}} + h_{\text{sum,target}}. \quad (11)$$

由(8)~(11)式得到

$$\sum_{i=1}^{N_1} h_i = \frac{N_1 \cdot A_d - M^2 \cdot A_t}{A_d} \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot G L_b + \frac{M^2 \cdot A_t}{A_d} \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot G \cdot L_t + N_1 \cdot (G \cdot L_{\text{path}} + B_0). \quad (12)$$

因此目标的辐射亮度为

$$L_t = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} h_i - N_1 \cdot (G \cdot L_{\text{path}} + B_0)}{\tau_{\text{atm}} \cdot G \cdot M^2 \cdot A_t / A_d} = \frac{N_1 \cdot A_d - M^2 \cdot A_t}{M^2 \cdot A_t} \cdot \frac{h_b - G \cdot L_{\text{path}} - B_0}{\tau_{\text{atm}} \cdot G}, \quad (13)$$

式中 G 和 B_0 可以通过标定获得, M 和 A_d 均已知,大气透射率 τ_{atm} 和程辐射 L_{path} 由大气传输软件计算获得,目标理想成像面积 A_t 由(7)式计算,背景灰度值 h_b 由(5)式计算。通过红外图像获得选取的目标区域灰度值 $h_i, i = 1, 2, \dots, N_1$, 代入(13)式就得到了被测小目标的辐射亮度 L_t 。

5 小目标辐射测量实验

为了验证小目标辐射特性测量方法的有效性,利用 FLIR 公司的中波红外相机进行目标辐射特性测量实验。相机参数如下:工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$,探测器(HgCdTe)像元数为 $640 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,像元大小为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,输出位数为 14 位,焦距为 50 mm , $F=2$ 。加工了带有圆孔的目标靶,安装于黑体前以模拟小目标辐射源,不同口径的圆孔对应不同尺寸的目标。目标成像过程如图 5 所示,光学系统中冷阑用于抑制系统内部的杂散辐射。辐射源采用 CI 公司的 SR800R 面源黑体,发射率为 0.97,温度范围为 $0 \text{ }^\circ\text{C} \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$,温度精度为 $0.008 \text{ }^\circ\text{C}$ 。辐射源温度设为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $70 \text{ }^\circ\text{C}$,目标靶上孔的直径(单

位 mm) 为 2、4、6、8、10、12、14、16 和 18,在距离相机 6 m 处成像,即 $R_1 = 6 \text{ m}$ 。

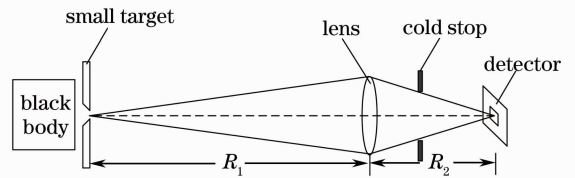


图 5 小目标辐射特性测量原理图

Fig. 5 Schematic of small target radiation measurement

图 6(a)为相机对 6 m 处直径 2、4、6、8、10 mm 目标($70 \text{ }^\circ\text{C}$)的成像图像,图 6(b)为 10 mm 目标成像灰度分布,可以看出图像边缘模糊,并且目标图像灰度值并不均匀。

目标理想成像面积由(6)式计算,圆形目标理想成像直径为 $D_i = M \cdot D_t$,其中 D_t 为目标直径。利用小目标辐射测量方法,分别对温度为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 的不同尺寸的小目标进行辐射特性测量,表 1 给出了辐射亮度以及温度测量结果。

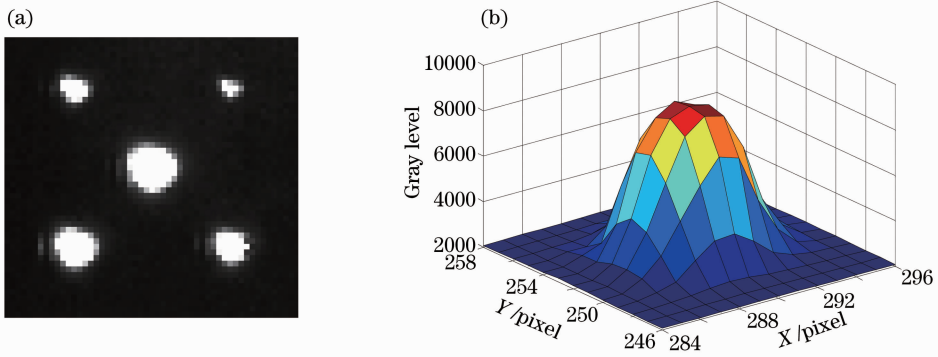


图6 小目标图像。(a) 6 m处小目标灰度图像；(b)直径为10 mm的目标图像灰度分布

Fig. 6 Image of small targets. (a) Image of small targets at a distance of 6 m; (b) gray level distribution of a target with 10 mm diameter

表1 不同温度和尺寸的小目标辐射测量结果

Table 1 Measurement results of small targets at different temperatures and sizes

Temperature / °C	Radiance / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)	Target size /mm	Diameter of ideal image /pixel	Measurement value of radiance / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)	Error of radiance /%	Measurement value of temperature /°C	Error of temperature /°C
30	1.4106	2	1.12	1.3322	-5.56	28.43	-1.57
		4	2.24	1.3871	-1.67	29.53	-0.47
		6	3.36	1.4031	-0.53	29.85	-0.15
		8	4.48	1.3841	-1.88	29.47	-0.53
		10	5.60	1.4132	0.18	30.05	0.05
		12	6.72	1.3901	-1.45	29.59	-0.41
		14	7.84	1.4065	-0.29	29.92	-0.08
		16	8.96	1.3937	-1.20	29.66	-0.34
70	5.0273	18	10.08	1.4051	-0.39	29.89	-0.11
		2	1.12	4.8751	-3.03	68.91	-1.09
		4	2.24	4.9956	-0.63	69.78	-0.22
		6	3.36	5.0582	0.62	70.22	0.22
		8	4.48	4.9640	-1.26	69.55	-0.45
		10	5.60	5.0761	0.97	70.34	0.34
		12	6.72	5.0647	0.74	70.26	0.26
		14	7.84	5.1310	2.06	70.73	0.73
16	8.96	5.0068	-0.41	69.85	-0.15		
18	10.08	5.0906	1.26	70.44	0.44		

由表1中的测量结果可见,利用该方法进行小目标辐射测量时,30 °C目标辐射亮度最大误差为5.56%,温度测量最大误差为1.57 °C;70 °C目标辐射亮度最大误差为3.03%,温度测量最大误差为1.09 °C,说明该方法进行小目标辐射测量具有较好的精度。

6 结 论

考虑到目标图像虽然分布在多个像元,但是目标成像时到达探测器上的总能量不变,提出了针对小目标的辐射测量方法,该方法的前提是要能够获

得目标理想成像尺寸,即已知目标大小和成像距离。利用中波红外相机进行了模拟小目标成像实验,实验结果表明该方法具有较高的辐射测量精度。

该方法具有较好的应用前景,可用于对合作目标(即尺寸已知的目标)的研究。实现小目标辐射测量相当于扩展了红外辐射测量系统的作用距离,即使得红外成像系统能够测量更远距离的目标。另外,空中远距离目标在探测器上成像往往表现为小目标,如飞行的导弹和飞机等,因此小目标辐射测量方法可应用于检验相机的性能和远距离目标的红外隐身效果等。由于实验室黑体辐射源尺寸和相机焦

距的限制,无法进行上百米至上千米距离的小目标辐射测量实验,下一步的工作是进行远距离测量实验,以验证该方法的适用性,并在此基础上进一步开展小目标辐射测量方法的研究工作。

参 考 文 献

- 1 Yao Yang, Wu Zhensen, Yao Lianxing. Method of calculating the radiance of point-source target in infrared image [J]. *Int J Infrared and Millimeter Waves*, 2002, 23(9): 1347-1355.
- 2 Mauricio Delbracio, Pablo Musé, Andrés Almansa, *et al.*. The non-parametric sub-pixel local point spread function estimation is a well posed problem [J]. *Int J Compus Vis*, 2012, 96(2): 175-194.
- 3 S Kim, J Lee. Scale invariant small target detection by optimizing signal to clutter ratio in heterogeneous background for infrared search and track [J]. *Pattern Recognition*, 2012, 45(1): 393-406.
- 4 Gyoon-Jung Lee, Ji-Hwan Park, Jae-heum Joo, *et al.*. The Size and Position Detection of Small Target in Infrared Image [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, 6935: 643-652.
- 5 Liu Ruiming, Zhi Hongliang. Infrared point target detection with fisher linear discriminant and kernel fisher linear discriminant [J]. *J Infrared Milli Terahz Waves*, 2010, 31(12): 1491-1502.
- 6 Zheng Chengyong. Small infrared target detection based on harmonic and sparse matrix decomposition [J]. *Opt Eng*, 2013, 52(6): 066401.
- 7 Liu Ruiming, Lu Yanhong, Gong Chenglong, *et al.*. Infrared point target detection with improved template matching [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55(4): 380-387.
- 8 Gerald C Holst. *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems* [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- 9 Xu Weiwei, Zhang Liming, Yang Benyong, *et al.*. On-orbit radiometric calibration based on gray-scale tarps [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0212007.
徐伟伟, 张黎明, 杨本永, 等. 基于多灰阶靶标的在轨辐射定标方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0212007.
- 10 A Berk, G P Anderson, P K Acharya, *et al.*. Modtran4 User's Manual [OL]. <http://www.doc88.com/p-630428972869.html>. [2014-03-21].
- 11 Hoonkyung Cho, Joohwan Chun. Range estimation of passive infrared targets through the atmosphere [J]. *Opt Eng*, 2013, 52(4): 046402.
- 12 Ding Ruijun, Ye Zhenhua, Zhou Wenhong, *et al.*. Review of two-color infrared focal plane arrays [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 14-17.
丁瑞军, 叶振华, 周文洪, 等. 双色红外焦平面研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 14-17.
- 13 Ye Zhenhua, Wu Jun, Hu Xiaoning, *et al.*. Study of integrated MW1/MW2 two-color HgCdTe infrared detector arrays [J]. *J Infrared and Millimeter Waves*, 2004, 23(3): 193-196.
叶振华, 吴俊, 胡晓宁, 等. 集成式 HgCdTe 红外双色探测器阵列[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, 23(3): 193-196.
- 14 Hong Wenqing, Yang Nansheng, Wang Xiaodong, *et al.*. Combined nonuniformity correction algorithm of infrared focal plane arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0611005.
洪闻青, 杨南生, 王晓东, 等. 红外焦平面联合非均匀校正算法[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0611005.
- 15 Xie Xufen, Zhang Wei, Zhi Xiyang, *et al.*. Scene-based assessment method for nonuniformity of infrared focal plane array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0604011.
谢蓄芬, 张伟, 智喜洋, 等. 基于场景的红外焦平面阵列非均匀性评价方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0604011.

栏目编辑: 何卓铭