

根据环境温度测量制冷型红外成像系统内部杂散辐射

田棋杰^{1,2}, 常松涛¹, 何锋赞¹, 乔彦峰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 内部杂散辐射抑制水平是评价红外成像系统的一项重要指标。由于内部杂散辐射与环境温度有关,其测量过程必须在多个环境温度下进行,存在成本高、时间长且实验设备要求高等缺点。针对上述问题,通过建立多积分时间定标模型,研究环境温度对内部杂散辐射的影响,提出一种采用环境温度测量制冷型红外成像系统内部杂散辐射的方法。该方法通过对制冷型红外探测器定标,获取探测器内部因素对系统输出的影响,结合系统在某一环境温度下的定标结果解算系统内部杂散辐射与环境温度的定量关系,进而计算系统在任意环境温度 and 积分时间下的内部杂散辐射。通过辐射定标实验验证该方法的有效性,实验结果表明该方法可以实现对制冷型红外成像系统内部杂散辐射的高精度测量。

关键词 测量; 内部杂散辐射; 辐射定标; 红外成像系统; 环境温度

中图分类号 TP732.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0712002

Internal Stray Radiation Measurement for Cooled Infrared Imaging Systems Using Ambient Temperature

Tian Qijie^{1,2}, Chang Songtao¹, He Fengyun¹, Qiao Yanfeng¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

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

Abstract The suppression level of internal stray radiation is a key indicator to evaluate infrared imaging systems. Being related to ambient temperature, the internal stray radiation must be measured at multiple ambient temperatures, and the measurement has such disadvantages as high cost, long duration and high demand for experimental setups. To solve these problems, the effect of ambient temperature on internal stray radiation is studied by building a multi-integral time calibration model, and a method is proposed to measure internal stray radiation of cooled infrared imaging systems using ambient temperature. In this method, the influence of internal factors of the detector on the system output is obtained by calibrating the cooled infrared detector. Combining the calibration results of the infrared imaging system under a certain ambient temperature, the quantitative relation between internal stray radiation and ambient temperature is resolved. Then the internal stray radiation can be calculated at arbitrary integration times and ambient temperatures. The effectiveness of the proposed method is verified by radiometric calibration experiments. Experimental results indicate that, with the proposed method, high-precision measurement of internal stray radiation in cooled infrared imaging systems can be achieved.

Key words measurement; internal stray radiation; radiometric calibration; infrared imaging system; ambient temperature

OCIS codes 120.5630; 010.5630; 290.2648; 110.3080

1 引 言

杂散辐射也称为杂散光,是指到达探测器靶面的非成像光线或者非成像能量。对光学成像系统而言,杂

收稿日期: 2017-01-09; 收到修改稿日期: 2017-02-12

作者简介: 田棋杰(1990—),男,博士研究生,主要从事红外辐射定标和测量方面的研究。E-mail: tian7jie@163.com

导师简介: 乔彦峰(1962—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电测控技术方面的研究。E-mail: qiaoyf@ciomp.ac.cn

散辐射会降低图像的对比度,影响系统的探测能力^[1-5]。因此,有效的杂散辐射抑制对提升系统的成像质量和探测能力具有重要意义。杂散辐射根据来源可以分为内部杂散辐射和外部杂散辐射^[5-6]。外部杂散辐射主要是由视场外的能量经光学系统透射、散射、折射或者衍射等方式到达探测器靶面。内部杂散辐射主要是由系统内部构件或者透镜自身辐射等经过散射、折射等方式到达探测器靶面。对于可见光成像系统,其杂散光抑制只需考虑外部杂散光来源即可,系统内部杂散辐射的影响可以忽略。但是对于红外系统而言,其自身辐射对于成像效果也有影响,必须进行分析并对其进行抑制。高精度的红外系统一般采用制冷型红外探测器,其对于热源非常敏感,因此内部杂散辐射的影响更加突出。准确的内部杂散辐射测量对于评价系统杂散辐射抑制效果、提高杂散辐射抑制水平具有重要意义。现有文献主要关注于杂散辐射的分析抑制以及外部杂散辐射测量,但是仅有少量文献关注内部杂散辐射测量,尤其是制冷型红外成像系统的内部杂散辐射测量。

现有杂散辐射测量方法主要分为两类:1)通过建立杂散辐射分析模型,可以采用计算机模拟仿真的方法对杂散辐射进行定量计算分析。常用的计算方法有蒙特卡罗法、光线追迹法、近轴算法等,常用的仿真分析软件有 TracePro、Lighttools、APART、FRED 等^[7-9]。仿真分析的方法具有实现简单、易于操作、成本低等优点,但是该方法的计算精度有限,其仿真分析结果只能用于参考,主要原因在于光机结构表面特性和发射率等特性与实际系统存在出入。2)在系统加工完成后,必须对系统的杂散辐射进行测量,以验证系统的杂散辐射抑制效果是否满足设计要求^[9-12]。根据测量结果,系统有时还需要进行细微的调整以增强其抑制效果。但是,现有的测量方法往往采用复杂的设备,对实验环境要求较为苛刻,例如真空环境或者恒温条件等。此外,对于红外成像系统,其杂散辐射测量结果包括内部杂散辐射与外部杂散辐射,现有方法并未对其进行区分。

本文通过分析多积分时间的定标模型和环境温度对内部杂散辐射的影响,提出一种基于辐射定标的制冷型红外成像系统内部杂散辐射测量方法。该方法通过对制冷型红外探测器进行定标,结合某一环境温度下的系统定标结果,即可解算系统内部杂散辐射与环境温度的定量关系,进而计算任意环境温度和积分时间下的系统内部杂散辐射。采用制冷型探测器进行红外成像系统内部杂散辐射测量实验,并分析测量误差。该方法具有操作简单、易于实现、实验要求低等特点。

2 环境温度对辐射定标的影响

2.1 考虑积分时间的定标模型

高精度的红外成像系统使用前必须进行辐射定标,为消除大气层辐射和大气衰减等因素的影响,通常选取近距离扩展源法进行辐射定标^[13]。定标时将高精度的黑体辐射源放置于系统入瞳前,保证对系统全孔径和全视场的覆盖,其定标原理如图 1 所示,图中 f 为焦距。

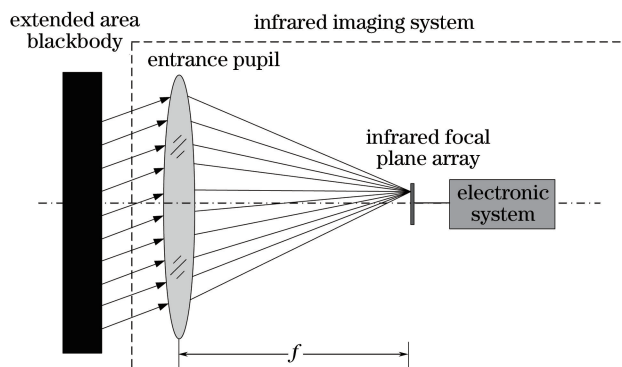


图 1 近距离扩展源法定标示意图

Fig. 1 Schematic of calibration with near-extended-source method

在红外探测器的线性响应范围内,探测器像元输出灰度与定标黑体辐射亮度间的关系可表示为^[14-15]

$$h = G \cdot L_{\text{BB}} + B, \quad (1)$$

式中 h 表示像元输出灰度(单位:DN), G 表示像元对入射辐射亮度的响应, B 为偏置, L_{BB} 表示定标黑体的

辐射亮度, 可以表示为

$$L_{BB} = \varepsilon \cdot L(T_{BB}) = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T_{BB}) d\lambda, \quad (2)$$

式中 ε 表示定标黑体发射率, $L(T_{BB})$ 表示理想黑体在温度为 T_{BB} 时的辐射亮度; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 表示探测器的工作波段范围, λ 为波长; $M(\lambda, T_{BB})$ 表示理想黑体的光谱出射度, 可由普朗克公式计算得到。像元接收到的入射辐射通量可以表示为^[16]

$$\Phi_{BB} = \frac{\pi \cdot \varepsilon \cdot \tau_{opt}}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot A_d \cdot L(T_{BB}) = K_{BB} \cdot L(T_{BB}), \quad (3)$$

式中 τ_{opt} 表示光学系统透射率, D 表示光学系统入瞳口径, f 为光学系统焦距, A_d 为像元尺寸; 对某一红外成像系统而言, K_{BB} 是常数。因此探测器像元对于入射辐射通量的响应可以表示为: $G' = G/K_{BB}$ 。(1) 式中的定标偏置 B 主要由红外系统内部杂散辐射和探测器内部偏置引起^[17]。设系统内部杂散辐射通量为 Φ_{stray} , 探测器内部偏置为 h_{det} , 则 (1) 式可表示为

$$h = G' \cdot \Phi_{BB} + G' \cdot \Phi_{stray} + h_{det}. \quad (4)$$

当红外系统在不同积分时间定标时, 在探测器线性响应范围内, 系统响应与积分时间成线性关系^[18-19], 即 $G = t \cdot G_0$, $G' = t \cdot G'_0$ 。其中, t 表示积分时间, G_0 表示单位积分时间下系统对入射辐射亮度的响应, G'_0 表示单位积分时间下系统对入射辐射通量的响应。

为实现高灵敏度探测, 制冷型红外探测器一般工作于温度较低且稳定的杜瓦瓶中(如 77 K), 因此探测器自身偏置与环境温度无关。实验结果表明制冷型红外探测器自身偏置与积分时间成线性关系, 在某一积分时间下其自身偏置可以表示为^[20]

$$h_{det}(t) = t \cdot h_{det1} + h_{det2}. \quad (5)$$

因此, 在某一积分时间下, 定标公式[(1)式]可以表示为

$$h = t \cdot G'_0 \cdot \Phi_{BB} + t \cdot G'_0 \cdot \Phi_{stray} + t \cdot h_{det1} + h_{det2}. \quad (6)$$

2.2 环境温度对内部杂散辐射的影响

由于物体辐射能与温度有关, 当温度变化后其辐射能也会发生变化, 因此红外系统自身辐射与环境温度有密切联系。为实现对红外系统内部杂散辐射的准确测量, 必须分析环境温度对内部杂散辐射的影响。

对于红外成像系统, 其内部杂散辐射主要由机械结构和透镜自身辐射组成。由于系统导热等因素, 系统构件的温度会趋于稳定, 即环境温度。因此, 本研究假设除制冷型探测器杜瓦瓶及其组件外, 系统其余部件的温度均为环境温度。在实际应用中, 一个红外整体系统可以认为是由许多光机结构微元组成。对于探测器靶面上某个像元接收到的系统内部杂散辐射, 设环境温度为 T_{amb} , 微元 dA 在方向 (θ, φ) 上的辐射能为 $d\Phi_{stray}$, 该部分能量经过光学系统透射、散射或者折射等路径到达探测器像元^[21-22], 如图 2 所示。

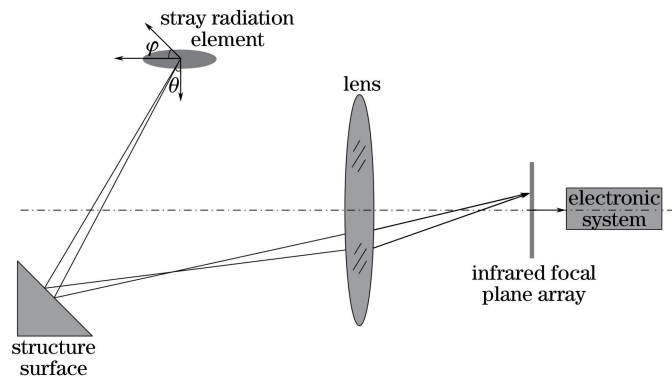


图 2 内部杂散辐射示意图

Fig. 2 Schematic of internal stray radiation

则像元接收到的内部杂散辐射通量可以表示为

$$d\Phi_{stray}(T_{amb}) = \varepsilon(\theta, \varphi) \cdot dA \cdot \Omega \cdot T \cdot S \cdot L(T_{amb}), \quad (7)$$

式中 $\epsilon(\theta, \varphi)$ 表示微元 dA 在方向 (θ, φ) 上的发射率, Ω 表示投影立体角, T 表示路径的透射率, S 表示路径的散射, $L(T_{\text{amb}})$ 表示温度 T_{amb} 下理想黑体辐射亮度。对 (7) 式进行求和, 即可得到像元接收到的系统总的内部杂散辐射通量为

$$\Phi_{\text{stray}}(T_{\text{amb}}) = \sum_{i=1}^N \epsilon(\theta_i, \varphi_i) \cdot A_i \cdot \Omega_i \cdot T_i \cdot S_i \cdot L(T_{\text{amb}}) = K_{\text{stray}} \cdot L(T_{\text{amb}}), \quad (8)$$

式中 i 表示微元数目, N 表示微元的总数目, $K_{\text{stray}} = \sum_{i=1}^N \epsilon(\theta_i, \varphi_i) \cdot A_i \cdot \Omega_i \cdot T_i \cdot S_i$ 。对某一固定红外系统而言, K_{stray} 是常数。将 (8) 式代入 (6) 式, 得到系统在任意积分时间和环境温度下的定标方程为

$$h(t, T_{\text{amb}}) = t \cdot G_0 \cdot L_{\text{BB}} + t \cdot G_{\text{stray}} \cdot L(T_{\text{amb}}) + t \cdot h_{\text{det1}} + h_{\text{det2}}, \quad (9)$$

式中 $G_{\text{stray}} = K_{\text{stray}} \cdot G_0'$ 。由 (9) 式可见, 红外系统内部杂散辐射引起的输出灰度正比于积分时间和环境温度下理想黑体的辐射亮度。

3 内部杂散辐射测量方法

由 (9) 式可见, 在已知 G_{stray} 的情况下, 可以计算得到任意环境温度 and 积分时间下的系统内部杂散辐射, 而不需要在每个环境温度 and 积分时间下重复测量。对此, 本研究通过标定探测器得到其内部偏置, 结合红外系统某一环境温度 and 积分时间下的定标结果计算参数 G_{stray} 。

首先, 不带光学系统定标, 即直接对探测器进行定标, 如图 3 所示。设积分时间为 t_0 , 则探测器的定标方程可表示为

$$h = t_0 \cdot G_{\text{det}} \cdot L_{\text{BB}} + h_{\text{det}}(t_0) = t_0 \cdot G_{\text{det}} \cdot L_{\text{BB}} + t_0 \cdot h_{\text{det1}} + h_{\text{det2}}, \quad (10)$$

式中 G_{det} 表示探测器单位积分时间下对入射辐射亮度的响应。

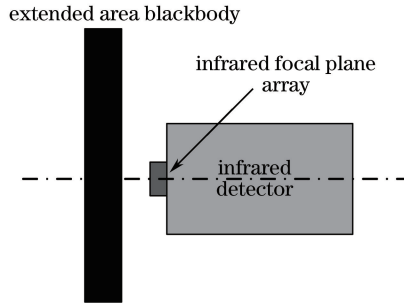


图 3 探测器辐射定标

Fig. 3 Radiometric calibration of the detector

然后, 带光学系统进行定标, 设置系统积分时间也为 t_0 , 设此时环境温度为 $T_{\text{amb}0}$, 由 (9) 式可得, 此时系统的定标方程可表示为

$$h(t_0, T_{\text{amb}0}) = t_0 \cdot G_0 \cdot L_{\text{BB}} + B_0 = t_0 \cdot G_0 \cdot L_{\text{BB}} + t_0 \cdot G_{\text{stray}} \cdot L(T_{\text{amb}0}) + t_0 \cdot h_{\text{det1}} + h_{\text{det2}}. \quad (11)$$

联立 (10) 和 (11) 式可得

$$G_{\text{stray}} = \frac{B_0 - h_{\text{det}}(t_0)}{t_0 \cdot L(T_{\text{amb}0})}, \quad (12)$$

式中 B_0 由光学系统定标结果得到, $h_{\text{det}}(t_0)$ 由探测器定标结果得到。

因此, 在任意积分时间 t 和环境温度 T_{amb} 下, 红外系统内部杂散辐射引起的输出灰度可表示为

$$h_{\text{stray}}(t, T_{\text{amb}}) = t \cdot G_{\text{stray}} \cdot L(T_{\text{amb}}) = t \cdot \frac{B_0 - h_{\text{det}}(t_0)}{t_0 \cdot L(T_{\text{amb}0})} \cdot L(T_{\text{amb}}). \quad (13)$$

结合 (8) 式可得, 系统的内部杂散辐射通量为

$$\Phi_{\text{stray}}(T_{\text{amb}}) = \frac{G_{\text{stray}} \cdot K_{\text{BB}}}{G_0} \cdot L(T_{\text{amb}}). \quad (14)$$

由 (13) 和 (14) 式可见, 内部杂散辐射引起的输出灰度与积分时间成线性关系, 且内部杂散辐射通量与积分时间无关, 仅是环境温度 and 系统自身结构的函数。此外, 在任意环境温度 and 积分时间下, 红外系统内部杂

散辐射输出灰度和辐射通量均可由计算得到,而不需要分别在每个积分时间和环境温度下重复进行测量。因此测量过程得到极大的简化,可以有效降低测量成本,缩短测量时间。

由于制冷型探测器工作环境较为稳定,其内部偏置与环境温度和外界辐射无关,即 $h_{\text{det}}(t_0)$ 较为稳定。因此,本方法在实际应用中可以在光学系统装调前标定探测器,将定标结果作为系统的固有参数,结合某一环境温度和积分时间下的定标结果即可得到任意环境温度和积分时间下的系统内部杂散辐射。此外,在条件允许的情况下,可以定期拆卸探测器进行标定,及时修正参数 $h_{\text{det}}(t_0)$ 以保持较高的测量精度。本方法可以实现对任意积分时间和环境温度下制冷型红外系统内部杂散辐射的实时测量,其测量结果可以用于验证红外系统内部杂散辐射抑制水平是否符合设计要求,指导系统内部杂散辐射抑制等。

4 内部杂散辐射测量实验

为验证本测量方法的有效性,采用 $\Phi 50$ mm 口径红外成像系统进行内部杂散辐射测量实验,该系统焦距为 100 mm, F 数为 2。采用 FLIR 公司的制冷型中波红外相机,工作波段为 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$, F 数为 2,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 bit。定标黑体分别采用 CI 公司的 SR800-120D-LT 和 SR-800-4A,其面源大小分别为 $300\ \text{mm}\times 300\ \text{mm}$ 和 $100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}$,工作温度范围分别为 $-40\sim 150\ ^\circ\text{C}$ 和 $0\sim 125\ ^\circ\text{C}$,有效发射率均为 0.97,温度精度为 $\pm 0.01\ ^\circ\text{C}$ 。

为获取探测器自身偏置的影响,选用 $300\ \text{mm}\times 300\ \text{mm}$ 的定标黑体,直接对探测器进行定标。设置黑体温度分别为 $30, 40, 50, 60\ ^\circ\text{C}$,设置探测器积分时间为 1 ms,采集红外图像后对中心像元(320, 256)的输出灰度值进行拟合,拟合后的定标结果为 $h = 2311.07\times L_{\text{BB}} + 347.07$,即 $h_{\text{det}}(1\ \text{ms}) = 347\ \text{DN}$ 。

为测量红外系统内部杂散辐射,还需要红外系统在某一环境温度下的定标结果。为排除外界因素对实验结果的影响,将红外系统与制冷型中波红外相机放入高低温实验箱内,实验箱内的温度精度为 $\pm 0.5\ ^\circ\text{C}$ 。由于实验箱内空间有限,选取 $100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}$ 的定标黑体,实验装置如图 4 所示。

设置实验箱内温度为 $20\ ^\circ\text{C}$,探测器积分时间为 1 ms,黑体温度分别为 $30, 40, 50, 60\ ^\circ\text{C}$,采集红外图像后对中心像元(320, 256)输出灰度进行拟合,定标结果如图 5 所示。

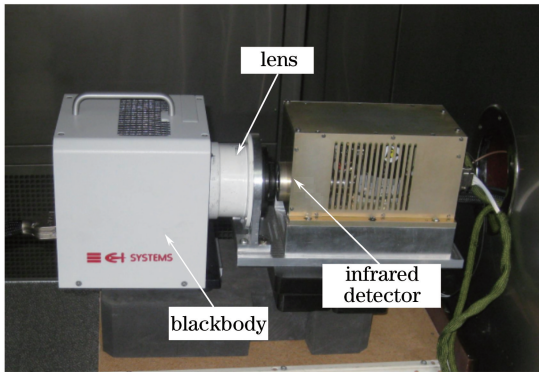


图 4 内部杂散辐射测量实验装置

Fig. 4 Experimental setup for internal stray radiation measurement

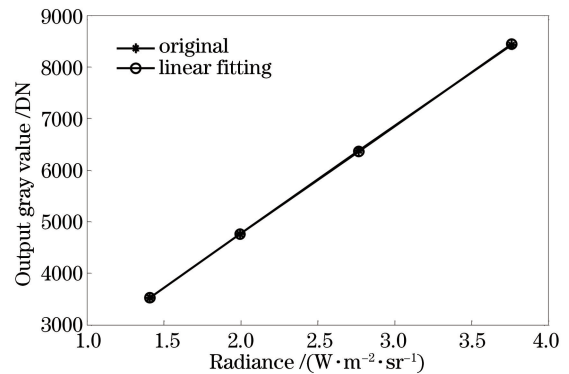


图 5 红外系统 1 ms 积分时间定标结果

Fig. 5 Calibration results of infrared system with integration time of 1 ms

拟合定标方程为 $h = 2086.24\times L_{\text{BB}} + 584.30$,即 $h_{\text{stray}}(1\ \text{ms}, 20\ ^\circ\text{C}) + h_{\text{det}}(1\ \text{ms}) = 584\ \text{DN}$ 。

由上述定标结果结合 (12) 式可得, $G_{\text{stray}} = 243.34\ \text{DN}\cdot\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{ms}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 。因此,任意积分时间 t 和环境温度 T_{amb} 下,该系统内部杂散辐射引起的探测器输出灰度可以表示为

$$h_{\text{stray}}(t, T_{\text{amb}}) = 243.34 \times t \times L(T_{\text{amb}}) \quad (15)$$

对该红外系统, $K_{\text{BB}} = 0.4418 \times 10^{-10}\ \text{m}^2\cdot\text{sr}$ 。定标结果表明, $G_0 = 2086.24\ \text{DN}\cdot\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{ms}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$,因此任意环境温度下系统内部杂散辐射通量可以表示为

$$\Phi_{\text{stray}}(T_{\text{amb}}) = \frac{G_{\text{stray}} \cdot K_{\text{BB}}}{G_0} \cdot L(T_{\text{amb}}) = 5.15 \times 10^{-12} \times L(T_{\text{amb}}) \quad (16)$$

由(15)和(16)式可以分别计算该红外系统在任意环境温度和积分时间下的内部杂散辐射,而不需要重复地在每个环境温度和积分时间下进行测量,极大地简化了测量过程,有效地降低了测量成本。

为验证本方法对不同环境温度和积分时间下红外系统内部杂散辐射的测量效果,设置高低温实验箱内的温度由 10 °C 上升至 50 °C,温度间隔为 5 °C,红外探测器积分时间分别设置为 0.8, 1, 1.5 ms。同时,采用文献[20]中的测量方法进行对比,文献[20]中的测量结果记为标准值,本方法测量结果记为计算值。不同积分时间和环境温度下两种方法的测量结果及误差如表 1 所示。

表 1 两种方法的测量结果及误差

Table 1 Measurement results and errors of two methods

Integratation time /ms	Ambient temperature /°C	Standard value $h_{\text{stray}}/\text{DN}$	Calculated value $h_{\text{stray}}/\text{DN}$	Standard value $\Phi_{\text{stray}}/(10^{-12} \text{ W})$	Calculated value $\Phi_{\text{stray}}/(10^{-12} \text{ W})$	Measurement error /%
0.8	10	118.01	127.62	3.12	3.38	8.15
	15	160.33	156.07	4.24	4.13	-2.66
	20	191.40	189.60	5.07	5.02	-0.94
	25	217.51	228.87	5.78	6.06	5.22
	30	282.32	274.60	7.47	7.27	-2.73
	35	327.73	327.58	8.68	8.67	-0.05
	40	404.44	388.65	10.7	10.3	-3.91
	45	490.44	458.69	13.0	12.1	-6.47
	50	573.55	538.66	15.2	14.3	-6.08
1.0	10	160.65	159.53	3.40	3.38	-0.70
	15	189.08	195.09	4.00	4.13	3.18
	20	237.30	237.00	5.03	5.02	-0.13
	25	291.33	286.08	6.17	6.06	-1.80
	30	344.59	343.25	7.30	7.27	-0.39
	35	415.78	409.48	8.80	8.67	-1.52
	40	522.82	485.81	11.07	10.3	-7.08
	45	611.60	573.36	12.95	12.1	-6.25
	50	716.00	673.32	15.16	14.3	-5.96
1.5	10	241.12	239.29	3.40	3.38	-0.76
	15	294.49	292.64	4.16	4.13	-0.63
	20	345.41	355.50	4.88	5.02	2.93
	25	427.74	429.12	6.04	6.06	0.32
	30	518.30	514.87	7.32	7.27	-0.66
	35	641.51	614.22	9.06	8.67	-4.25
	40	786.69	728.72	11.1	10.3	-7.37
	45	913.17	860.04	12.9	12.1	-5.82
	50	1076.87	1009.98	15.2	14.3	-6.21

由表 1 测量结果可见,在各个积分时间下,该红外系统内部杂散辐射随环境温度升高而迅速升高,与环境温度成明显的正相关关系。不同积分时间下的内部杂散辐射通量基本相等,表明系统内部杂散辐射通量与积分时间无关,与理论分析结果一致。内部杂散辐射引起的输出灰度与积分时间基本成比例关系,亦与理论分析结果相一致,说明本方法测量结果的合理性。当环境温度由 10 °C 升高到 50 °C 时,在各个积分时间下,本方法的测量结果与标准值基本吻合,说明了本方法测量结果的准确性。本方法的最大测量误差仅为 8.15%,表明本方法可以实现对制冷型红外成像系统内部杂散辐射的准确测量。此外,本方法的测量误差随环境温度和积分时间变化不具有增大或者减小的趋势,表明本方法测量结果的稳定性。

由图 6 可见,在不同积分时间和环境温度下,内部杂散辐射引起的输出灰度与环境温度下理想黑体辐射亮度成明显的线性关系,与理论分析结果一致,表明本理论的正确性。由于高低温实验箱有一定的精度范围和控温误差,实验中的测量误差主要是由于高低温实验箱内的温度误差导致的。

总之,由上述实验结果可知,本方法可以实现对制冷型红外成像系统内部杂散辐射的准确测量,并且仅

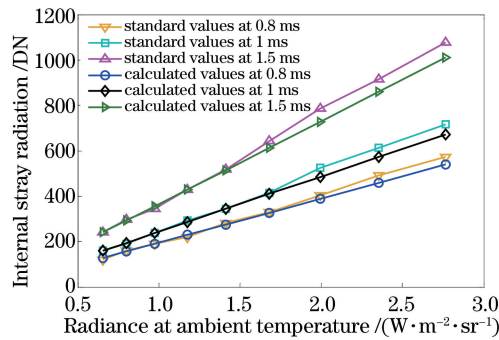


图 6 内部杂散辐射与环境温度辐射亮度关系

Fig. 6 Internal stray radiation as a function of the radiance at the ambient temperature

需通过探测器在某一积分时间下的定标结果结合系统在一个环境温度下的定标结果即可实现,具有成本低、操作简单等特点。

5 结 论

通过对不同环境温度和积分时间下制冷型红外成像系统辐射定标模型的分析,提出一种采用环境温度实现制冷型红外成像系统内部杂散辐射测量的方法,并且通过实验验证了该方法的有效性。由于制冷型红外探测器自身偏置较为稳定,与环境温度无关,可在光学系统安装前对探测器进行辐射定标,得到其自身偏置对系统输出的影响。结合红外系统在某一环境温度下的定标结果,即可解算系统在任意环境温度和积分时间下的内部杂散辐射。实验结果表明:当环境温度由 10 °C 上升到 50 °C 时,该方法的最大测量误差仅为 8.15%,表明该方法可以实现对制冷型红外成像系统内部杂散辐射的准确测量,并且测量误差不具有增大或者减小的趋势,表明该方法测量精度的稳定性。

该方法对于实验条件和设备要求低,测量精度高,可以用于检测系统在各个环境温度下杂散辐射抑制水平是否满足要求,其测量结果可以用于指导杂散辐射抑制设计。通过对系统杂散辐射的实时监测,可以及时发现系统内部结构变形、镜面污染等问题。该方法的优点在于通过一个环境温度下的定标结果,即可解算任意环境温度下的内部杂散辐射。该方法特别适用于大口径等控温困难的红外系统,可以极大地节省测量时间,降低测量成本。实际应用中必须注意,由于非制冷型探测器自身偏置和响应与环境温度有关,因此本方法并不适用于非制冷型红外系统。此外,为保证测量精度,探测器的输出灰度必须处于线性响应范围以内。

参 考 文 献

- [1] Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiang, *et al.* Research on the optical design and stray light suppression for off-axis reflective space astronomical telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0822002.
朱 杨, 张 新, 伍雁雄, 等. 离轴反射式空间天文望远系统设计及其杂散光抑制研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0822002.
- [2] Li Yan, Liu Jianfeng. Research on integrative suppression of internal and external stray light in infrared optical remote sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0928002.
李 岩, 刘剑峰. 红外光学遥感器内杂散光和外杂散光的综合抑制研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0928002.
- [3] Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui, *et al.* Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2267-2271.
牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2267-2271.
- [4] Zhao Yuchen, Xu Yanjun, Sha Wei, *et al.* Stray light analyze and suppress of the space-borne infrared optical system [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(10): 1016001.
赵宇宸, 许艳军, 沙 巍, 等. 天基红外成像光学系统杂散光分析与抑制[J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1016001.
- [5] Pravdivtsev A V, Akram M N. Simulation and assessment of stray light effects in infrared cameras using non-sequential ray tracing[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60(5): 306-311.
- [6] Zhu Y, Zhang X, Liu T, *et al.* Internal and external stray radiation suppression for LWIR catadioptric telescope using

- non-sequential ray tracing[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 47(1): 163-170.
- [7] Yang Jiaqiang, Li Ronggang, Peng Qingqing, *et al.* Research of stray light in the IR system based on Lighttools and Matlab[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(8): 888-891.
杨加强, 李荣刚, 彭晴晴, 等. 基于 Lighttools 和 Matlab 的内辐射杂光分析方法研究[J]. *激光与红外*, 2014, 44(8): 888-891.
- [8] Xia X L, Shuai Y, Tan H P. Calculation techniques with the Monte Carlo method in stray radiation evaluation[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2005, 95(1): 101-111.
- [9] Fest E. Stray light analysis and control[M]. Bellingham: Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 2013: 41-59.
- [10] Liepmann T W. Cryogenic stray light testing of the James Webb Space Telescope: an easy approach[C]. SPIE, 2009, 7439: 743913.
- [11] Liu N P, Liu Y, Shen Y D, *et al.* Measurement of aureole and suppression of internal stray light of aureole photometer [J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2011, 35(4): 428-438.
- [12] Liao Sheng, Shen Mangzuo. Point source transmittance of stray light of infrared optical systems and its measurements [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1996, 15(5): 375-378.
廖 胜, 沈忙作. 红外光学系统杂光 PST 的研究与测试[J]. *红外与毫米波学报*, 1996, 15(5): 375-378.
- [13] Wolfe W L. Introduction to radiometry[M]. Bellingham: SPIE Press, 1998: 114-117.
- [14] Sun Z Y, Chang S T, Zhu W, *et al.* Radiometric calibration method for large aperture infrared system with broad dynamic range[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4659-4666.
- [15] Li Ning, Yang Ciyin, Cao Lihua, *et al.* Radiometric calibration for 3~5 μm infrared focal plane array[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2319-2325.
李 宁, 杨词银, 曹立华, 等. 3~5 μm 红外焦平面阵列的辐射定标[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(10): 2319-2325.
- [16] Chang S T, Zhang Y Y, Sun Z Y, *et al.* Method to remove the effect of ambient temperature on radiometric calibration [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(27): 6274-6279.
- [17] Lü Y, He X, Wei Z H, *et al.* Ambient temperature-independent dual-band mid-infrared radiation thermometry[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(9): 2169-2174.
- [18] Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei, *et al.* Radiometric calibration of infrared system by amendment of inner and outer calibrations[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 356-362.
孙志远, 常松涛, 朱 玮, 等. 应用内外定标修正实现红外测量系统辐射定标[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(2): 356-362.
- [19] Tian Q J, Chang S T, Li Z, *et al.* A method to measure internal stray radiation of cryogenic infrared imaging systems under various ambient temperatures[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 81: 1-6.
- [20] Chang Songtao, Sun Zhiyuan, Zhang Yaoyu, *et al.* Internal stray radiation measurement for cooled infrared imaging systems[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(5): 050702.
常松涛, 孙志远, 张尧禹, 等. 制冷型红外成像系统内部杂散辐射测量方法[J]. *物理学报*, 2015, 64(5): 050702.
- [21] Yu Yi, Wang Min, Chang Songtao, *et al.* Drift compensation of infrared imaging system using ambient temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1004002.
余 毅, 王 旻, 常松涛, 等. 根据环境温度进行红外成像系统漂移补偿[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1004002.
- [22] Liu Y, An X Q, Wang Q. Accurate and fast stray radiation calculation based on improved backward ray tracing[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 1-9.