

# 大气校正仪短波红外通道内部杂散辐射测量方法

谢臣瑜<sup>1,2\*\*</sup>, 李健军<sup>1</sup>, 袁银麟<sup>1</sup>, 康晴<sup>1,2</sup>, 朱冰青<sup>1,2</sup>, 李孟凡<sup>1</sup>, 郑小兵<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 成像区域大气校正仪内部杂散辐射抑制水平是光学设计以及性能评估的一项重要指标, 尤其针对红外波段的光学系统, 其内部的杂散辐射不可忽略。提出了一种基于辐射定标的方法, 用于测量仪器内部的杂散辐射。通过控制变量得到仪器输入与输出之间的线性关系, 建立辐射定标的模型, 用实验的方法测量了仪器在不同环境温度下的本底信号值, 并与理论计算的内部杂散辐射相比较, 最大偏差为 4.45%, 验证了该方法的有效性。利用该方法可以计算大气校正仪在不同环境温度以及不同增益下的杂散辐射, 不仅简化了实验过程, 也可以对大气校正仪内部杂散辐射指标进行评估。

**关键词** 遥感; 红外; 杂散辐射; 辐射定标

**中图分类号** TP732.2

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201838.0901002

## Measurement Method of Internal Stray Radiation in Short-Wave Infrared Channel of Atmospheric Corrector

Xie Chenyu<sup>1,2\*\*</sup>, Li Jianjun<sup>1</sup>, Yuan Yinlin<sup>1</sup>, Kang Qing<sup>1,2</sup>,  
Zhu Bingqing<sup>1,2</sup>, Li Mengfan<sup>1</sup>, Zheng Xiaobing<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** The suppression level of internal stray radiation of atmospheric corrector in short-wave is a key indicator for its optical design and performance evaluation, especially for infrared optical systems, in which the internal stray radiation cannot be ignored. In order to measure the output of the stray radiation inside the instrument, a method based on radiation calibration is proposed. First, we obtain the linear relationship between the input and output of the instrument by controlling variables, and the model of the radiation calibration is established. Then, the background signal of the instrument at different ambient temperatures is measured, and a maximum deviation of 4.45% is found compared to theoretical values, which verifies that the calibration model is valid. The proposed method can be used to calculate the internal stray radiation correction of atmospheric corrector at different ambient temperatures and gain values, which simplifies experimental processes and evaluates the stray radiation index of the atmospheric corrector.

**Key words** remote sensing; infrared; stray radiation; radiometric calibration

**OCIS codes** 010.5630; 110.3080; 280.6780; 290.2648

## 1 引 言

成像区域大气校正仪是我国近年来预研、发展的一种星载光学偏振遥感器, 通过同步获取光学遥感图像的角度、偏振和辐射等信息, 实现了时空变化

的气溶胶和水汽探测, 其覆盖了 0.49~2.25  $\mu\text{m}$  太阳反射光谱的 8 个探测波段, 解决了大气效应校正的难点<sup>[1-5]</sup>。为抑制短波红外探测波段校正仪内部自发辐射对成像精度的影响, 需要控制仪器内部的温度, 保证在轨运行期间仪器自身的温度保持在

收稿日期: 2017-12-29; 修回日期: 2018-03-21; 录用日期: 2018-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(61505222, 41605021)

\* E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn; \*\* E-mail: xcy1993@mail.ustc.edu.cn

-17~-7 °C 范围内,但校正仪内部的自发辐射与温度有关,无法实时获取区间温度内杂散辐射的变化,只能将在夜间观测地物目标的暗背景时所得到的输出值近似为内部杂散辐射,这种方法容易受到地物目标分布不均匀、大气吸收和散射等因素的影响,测量不确定度较大。如何定量测量在轨运行期间校正仪内部的杂散辐射,准确获取目标的辐亮度,对提高图像反演精度具有重大意义。

通常来说,杂散辐射是指探测器接收到的非目标光线,对于成像系统而言,杂散辐射会直接影响成像质量,降低系统信噪比,因此有效抑制杂散辐射对提升系统的成像质量和探测能力具有重要意义<sup>[6-7]</sup>。杂散辐射按来源可分为外部辐射与内部辐射,外部辐射是指仪器视场外的光辐射被探测器接收,导致仪器输出信号变化,而内部杂散辐射是指光学系统内部(如光学镜头、机械件等)的自发辐射被探测器接收<sup>[8]</sup>。在可见-近红外成像范围内,内部的杂散热辐射对于成像区域校正仪的影响较小,可以忽略,仅需考虑外部辐射的影响。但是在短波红外范围内,采用的高精度制冷型红外探测器对热源较为敏感,尤其在观测信号较弱的情况下,内部杂散热辐射的影响将更加突出。为获取更高质量的遥感图像,必须对大气校正仪的内部杂散辐射进行定量研究<sup>[9]</sup>。

目前,杂散辐射测量方法主要是通过建立杂散辐射分析模型,采用计算机模拟仿真的方法对红外系统的杂散辐射进行定量计算<sup>[10]</sup>。常用的计算方法有蒙特卡罗法、光线追迹法、近轴计算法等,相应的分析软件有 TracePro、Lighttools、APART 等。仿真分析方法具有低成本、易操作等优点,但该仿真结果也只能用于参考,主要原因在于仿真所设定的边界条件与实际情况仍有一定差异。杂散辐射也可以在系统加工完成后用实验方法直接测量获取,以验证系统的杂散辐射抑制效果是否满足设计要求。但该方法对实验环境要求较为苛刻,如要求低温真空环境或者恒温条件等,每一个环境温度下杂散辐射的测量具有工作量大、成本高等缺点。

本文通过对成像区域大气校正仪在线性响应范围内的辐射特性进行研究,提出了一种基于辐射定标的方法来定量测量短波红外系统内部的杂散辐射,实验采取了控制变量的方法,利用大口径积分球作为定标源,将待标仪器置于低温真空仓内,隔绝外部杂散辐射,并分析了定标过程中的变量与仪器输出灰度值之间的线性关系,得到了系统的定标方程。理论计算与实际测量结果均验证了该方程的有

效性,且该方程在理论上具有较高的测量精度。

## 2 辐射定标方法

作为星载遥感器,成像区域大气校正仪需要进行发射前定标,在给定的输入条件时可得到仪器的输出值。同时,为消除大气层辐射以及大气衰减等因素的影响,采用低温真空设备以及近距离扩展源法进行辐射定标。将大气校正仪放入低温真空仓内部,并使仪器的入瞳对准真空仓光学窗口的几何中心;将定标光源的出光口正对着仪器,保证光源能覆盖仪器的全孔径和全视场;定标光源采用内置卤钨灯的大口径积分球光源,其光谱范围为 350~2500 nm,出光口径为 400 mm,光信号在积分球内部进行多次漫反射后在出光口处形成一个均匀的面光源,通过控制积分球内部卤钨灯的开关数量来改变定标光源的辐亮度。

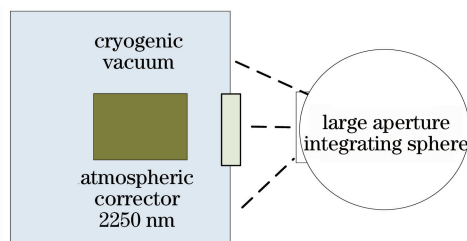


图 1 探测器辐射定标

Fig. 1 Radiometric calibration of detector

成像区域大气校正仪在短波红外 2250 nm 处有 P1、P2、P3、P4 4 个通道,在线性响应范围内,每个通道的探测器像元的输出灰度值与定标光源的辐亮度之间的关系为

$$S = i \times R \times L_c + B(i), \quad (1)$$

式中: $S$  为大气校正仪的输出灰度值; $i$  为成像校正仪的增益系数; $R$  为探测器像元对入射光源的辐亮度响应度; $L_c$  为定标光源的辐亮度; $B(i)$  为通道式大气校正仪探测系统的光机结构热辐射、散射背景辐射以及探测器本身的暗电流引起的偏移量总和,该值与仪器的增益系数有关。

理论上,大气校正仪的辐亮度响应度  $R$  是成像系统的固有属性,与定标光源的辐亮度和外界环境温度无关,而偏移量  $B$  包含了成像系统内部光机结构引起的杂散热辐射  $H_{\text{stray}}$  以及探测器自身的偏置  $H_{\text{detector}}$ 。探测系统内部的杂散热辐射  $H_{\text{stray}}$  与外界环境温度有关,根据热辐射定律,环境温度越低,其杂散热辐射越小。短波红外 2250 nm 通道选用了制冷型的 InGaAs 探测器,为保证其探测性能,采用热电制冷的方式控制探测器的温度,因此探测器自

身的偏置与环境温度无关。实验结果表明,在保持定标光源辐亮度不变的前提下,分别改变环境温度以及探测系统的增益系数,探测器输出的灰度值与变量呈线性关系,即探测系统的偏移量是其增益系数和环境温度的线性函数,可以表示为

$$B = H_{\text{stray}} + H_{\text{detector}} = i \times R_1 \times L_T + i \times h_1 + c, \quad (2)$$

式中: $c$  为偏移量  $B(i)$  的常数部分; $R_1$  为探测系统内部杂散辐射的辐亮度响应度,在某一特定的红外探测系统中, $R_1$  为一定值; $L_T$  为理想黑体在温度为  $T$  时的辐亮度; $h_1$  为红外探测器的偏置对于增益系数的响应,同一个通道下该值不变。因此在考虑成像校正仪增益系数的情况下,可以将(1)式改写为

$$S = i \times R \times L_c + i \times R_1 \times L_T + i \times h_1 + c. \quad (3)$$

从(3)式可以看出,成像系统内部杂散辐射引起的输出灰度值正比于系统的增益系数以及环境温度下理想黑体的辐亮度。 $L_T$  用 Planck 公式可表示为:

$$L_T = \frac{C_1}{\lambda^5 \{ \exp[C_2 / (\lambda T)] - 1 \}}, \quad (4)$$

式中: $C_1$  为第一辐射常数, $C_1 = 2\pi hc^2 = 3.7415 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $C_2$  为第二辐射常数, $C_2 = hc/k = 1.43879 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ;  $h$  为 planck 常量。为简化拟合计算,选取的波长值为  $2.25 \mu\text{m}$ ,将环境温度值代入(4)式,可以计算得到相应条件下的辐亮度。

### 3 辐射定标实验

为验证上述理论模型的正确性,开展了相应的辐射定标实验。将成像区域大气校正仪放置在低温真空仓内部,由于积分球光源的出光口足够大,在保证定标光源充满仪器视场的同时,利用光谱辐射计(SVC)测量定标光源的光谱辐亮度,该辐亮度溯源至标准灯-参考板定标系统,其在  $2100 \sim 2500 \text{ nm}$  波段范围内通过参考板定标系统的合成定标不确定度约为  $3.6\%$ 。陷阱探测器的作用是监视定标光源的稳定性。

实验中,通过控制积分球内置灯源的开关数量来改变定标光源的辐亮度。在成像区域大气校正仪的工作温度范围内选取 4 个温度点,设置高低温真空仓内部的环境温度分别为  $-7, -11, -14, -17 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在不同定标光源的辐亮度、环境温度以及增益系数的情况下,通过控制变量来定量测量成像区域大气校正仪内部的杂散辐射。

#### 3.1 不同光源辐亮度下的辐射测量

设置低温真空仓的温度为  $-11 \text{ }^\circ\text{C}$ ,由于仪器本身具有导热性,系统构件的温度会趋于稳定,默认此

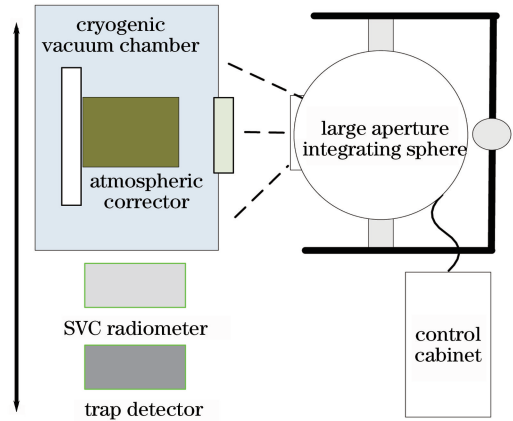


图 2 成像区域大气校正仪绝对辐射定标示意图  
Fig. 2 Schematic of absolute radiation calibration for atmospheric corrector

时的背景温度为仪器内部的等效环境温度,在系统环境温度为  $-11 \text{ }^\circ\text{C}$ 、增益系数为 1 的前提下,改变定标光源的辐亮度,得到成像区域大气校正仪  $2250 \text{ nm}$  波段 4 个通道的输出灰度值与光谱辐亮度之间的线性关系(图 3)。通过最小二乘法拟合得到每个通道的定标方程为

$$\begin{cases} S_1 = -20182.19 \times L_c + 320.98 \\ S_2 = -20291.42 \times L_c + 494.24 \\ S_3 = -20272.13 \times L_c + 486.92 \\ S_4 = -20090.49 \times L_c + 369.92 \end{cases} \quad (5)$$

#### 3.2 不同环境温度下的辐射测量

在积分球光源辐亮度不变的前提下,即保持开启灯源数量为 12 盏,供电电流为  $2.95 \text{ A}$ ,光源稳定后设置低温真空仓的工作温度分别为  $-7, -11, -14, -17 \text{ }^\circ\text{C}$ ,得到成像区域大气校正仪的输出灰度值与理想黑体辐亮度之间的关系(图 4)。

数据分析可知,不同环境温度下,理想黑体的辐亮度与校正仪输出灰度值的线性相关系数大于  $0.997$ ,拟合误差优于  $0.12\%$ ,可认为两者之间呈线性关系。通过 4 个通道下的拟合定标方程,可以得到系统内部结构引起的辐亮度响应度,即(3)式中的  $R_1$  值。

$$\begin{cases} S_1 = -42.06 \times L_T - 23469.08 \\ S_2 = -44.58 \times L_T - 23406.23 \\ S_3 = -41.26 \times L_T - 23411.64 \\ S_4 = -41.87 \times L_T - 23330.02 \end{cases} \quad (6)$$

#### 3.3 不同增益系数下的辐射测量

通过分析两次实验的结果,得到了(3)式的  $R$  与  $R_1$ ,为得到完整的定标模型,还需要得到  $h_1$  以及偏置值  $c$ 。在保持定标光源辐亮度以及环境温度不变的情况下,改变成像校正仪的增益系数,此时

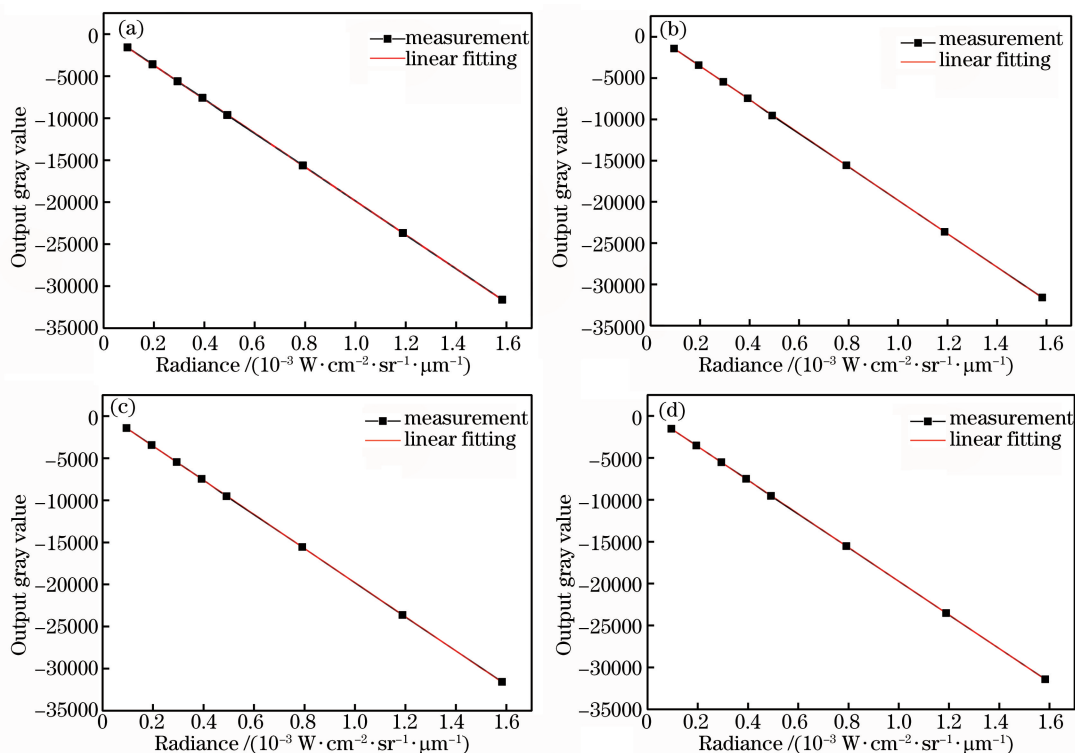


图 3 不同辐亮度下的定标实验结果。(a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4

Fig. 3 Calibration results at different radiances. (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4

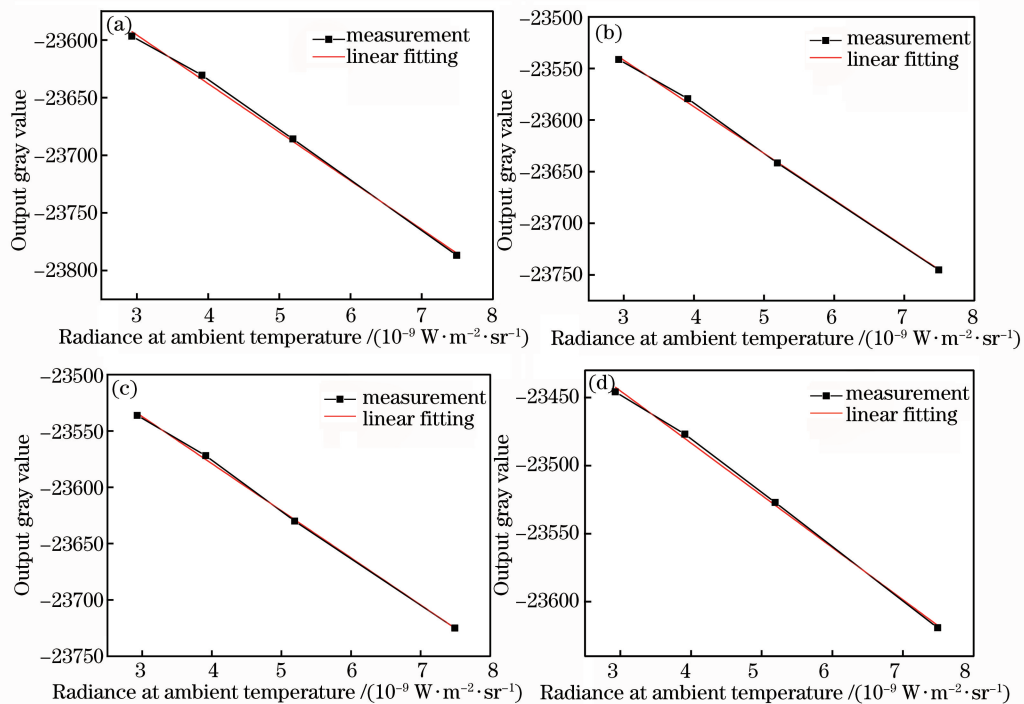


图 4 不同环境温度下的定标实验结果。(a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4

Fig. 4 Calibration results at different ambient temperatures. (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4

(3)式可改写为

$$S = i(R \times L_c + R_1 \times L_T + h_1) + c. \quad (7)$$

实验中设置低温真空仓的温度为  $-11 \text{ }^\circ\text{C}$ , 定标光源辐亮度不变, 分别得到校正仪在 1 倍、2 倍以及

4 倍增益下的输出灰度值与增益系数之间的关系 (图 5)。当校正仪增益为 2 时, 实际放大倍数为 2.05; 当增益为 4 时, 放大倍数为 3.96。

4 个通道在不同增益系数下的拟合方程为

$$\begin{cases} S_1 = -5612.28 \times i + 21.16 \\ S_2 = -5470.21 \times i + 21.21 \\ S_3 = -5464.48 \times i + 16.13^\circ \\ S_4 = -5526.75 \times i + 17.56 \end{cases} \quad (8)$$

结合(7)式和(8)式得到4个通道的得到  $h_1$  以及偏置值  $c$ 。

由此得到成像区域大气校正仪 2250 nm 波段4个通道下完整的拟合定标方程为

$$\begin{cases} S_1 = -20182.19 \times i \times L_c - 42.06 \times i \times L_T + i \times 548.13 + 21.16 \\ S_2 = -20291.42 \times i \times L_c - 44.58 \times i \times L_T + i \times 738.06 + 21.21 \\ S_3 = -20272.13 \times i \times L_c - 41.26 \times i \times L_T + i \times 720.62 + 16.13^\circ \\ S_4 = -20090.49 \times i \times L_c - 41.87 \times i \times L_T + i \times 593.05 + 17.56 \end{cases} \quad (9)$$

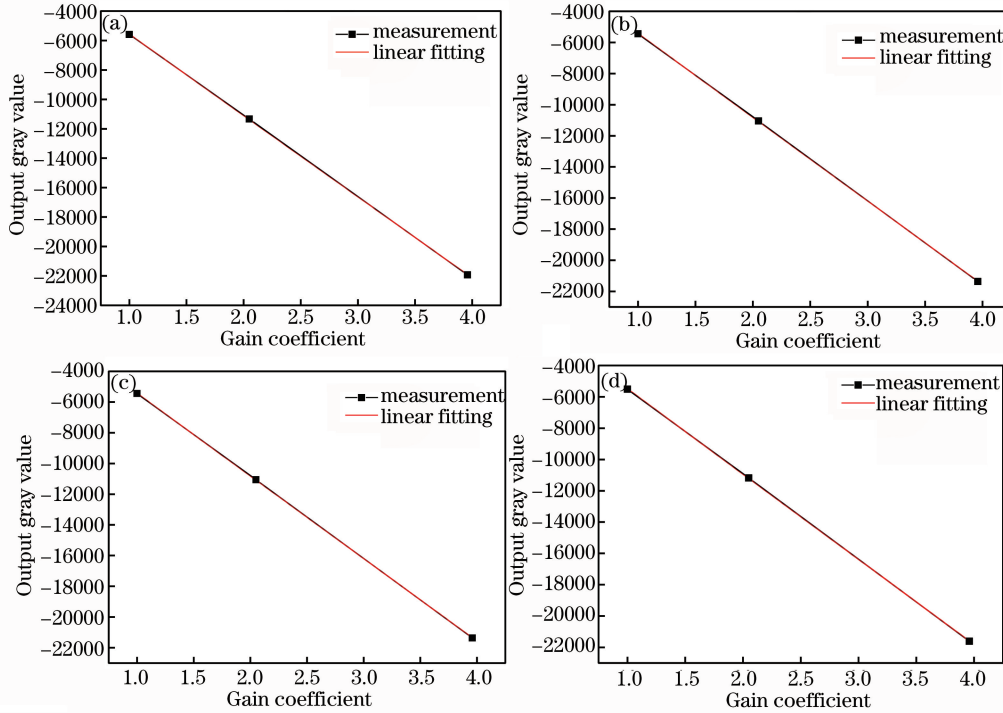


图 5 不同增益下的定标实验结果。(a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4

Fig. 5 Calibration results at different gains. (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4

### 3.4 内部杂散辐射的验证

通过4个通道下的拟合定标方程,理论上只需获取大气校正仪在轨运行期间的内部真实温度,便可以计算出校正仪在该温度下的杂散辐射输出灰度值。相对于传统的测量方法,通过环境温度和增益系数计算杂散辐射,不需要单独测量每一个温度点

下的本底信号值,极大地简化了实验测量过程。为验证上述拟合定标方法的可靠性,着重分析仪器内部杂散辐射的计算是否准确。在无定标光源输入的前提下,分别测量仪器在不同环境温度和增益系数下的本底值,通过比较理论计算值与实际测量值来验证上述方法的可行性,其结果如表1所示。

表 1 理论计算与实验结果比较

Table 1 Comparison between theoretical calculation and experimental results

| Gain coefficient | Temperature / $^\circ\text{C}$ | $S_1$    |            | $S_2$    |            | $S_3$    |            | $S_4$    |            |
|------------------|--------------------------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
|                  |                                | Measured | Calculated | Measured | Calculated | Measured | Calculated | Measured | Calculated |
| $i=1$            | -7                             | 240.26   | 247.14     | 418.02   | 417.79     | 412.65   | 420.73     | 277.52   | 289.88     |
|                  | -11                            | 341.77   | 347.92     | 522.28   | 524.62     | 512.49   | 519.60     | 381.61   | 390.22     |
|                  | -14                            | 413.94   | 404.75     | 594.44   | 584.86     | 582.88   | 575.34     | 454.46   | 446.80     |
|                  | -17                            | 457.31   | 447.31     | 637.57   | 629.98     | 620.59   | 617.10     | 501.05   | 489.17     |

续表

| Gain coefficient | Temperature / $^{\circ}\text{C}$ | $S_1$    |            | $S_2$    |            | $S_3$    |            | $S_4$    |            |
|------------------|----------------------------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
|                  |                                  | Measured | Calculated | Measured | Calculated | Measured | Calculated | Measured | Calculated |
| $i=2$            | -7                               | 476.44   | 484.41     | 845.03   | 834.20     | 827.79   | 845.55     | 557.10   | 575.83     |
|                  | -11                              | 688.35   | 691.03     | 1058.02  | 1053.21    | 1038.51  | 1048.23    | 772.66   | 781.52     |
|                  | -14                              | 835.91   | 807.52     | 1208.64  | 1176.69    | 1181.59  | 1162.51    | 918.57   | 897.50     |
|                  | -17                              | 924.59   | 894.78     | 1293.87  | 1269.18    | 1260.47  | 1248.11    | 1013.47  | 984.37     |
| $i=4$            | -7                               | 908.68   | 916.03     | 1622.19  | 1591.67    | 1584.49  | 1618.32    | 1065.02  | 1095.98    |
|                  | -11                              | 1325.30  | 1315.15    | 2038.43  | 2014.73    | 1998.95  | 2009.85    | 1483.28  | 1493.32    |
|                  | -14                              | 1603.16  | 1540.19    | 2321.87  | 2253.26    | 2266.70  | 2230.60    | 1769.56  | 1717.35    |
|                  | -17                              | 1777.22  | 1708.74    | 2482.36  | 2431.93    | 2418.89  | 2395.95    | 1948.18  | 1885.16    |

由表 1 可知,当增益系数不同时,环境温度越低,本底信号输出的灰度值却越大,这主要是因为仪器的辐亮度响应度是负值,但这并不影响其线性关系,测量结果与理论分析一致。同时对比理论计算值与实际测量值之间的相对偏差可以看出,P4 通道增益系数  $i=1$ 、环境温度为  $-7^{\circ}\text{C}$  时,理论计算值与实际测量值的偏差最大,但最大测量偏差仅为 4.45%,这表明本文方法具有一定的可靠性,可以实现对校正仪内部杂散辐射的定量测量。此外大气校正仪实际测量的本底信号值与理论计算出的杂散辐射值之间的偏差并不会随着环境温度的变化单向增大或减小,这也间接说明了本文方法在测量内部杂散辐射时具有稳定性。

## 4 分析与讨论

通过对成像区域大气校正仪短波红外 2250 nm 4 个通道在不同变量下的测量结果,拟合得到相应的定标方程,此方程可以定量分析系统内部的杂散辐射。理论计算值与实际测量出的本底信号仍存在一定的偏差,图 4 所示的环境温度下辐亮度与仪器输出灰度值的线性拟合具有 0.12% 的拟合偏差。造成这种偏差的主要原因是低温真空仓设定的温度点与实际运行的环境温度具有  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  的控温范围,再加上仪器内部光机结构热传导等因素可能会造成仪器内部温度分布不均匀等情况,从而使得计算中代入的环境温度值与仪器内部真实的温度并不一致。因此设计时可以在仪器内部安装若干个热敏电阻,监视关键元件的真实温度,以提高仪器内部杂散辐射的测量精度。

## 5 结 论

针对成像区域大气校正仪短波红外通道内部的杂散辐射,提出了一种简单有效的测量方法,通过对

不同环境温度和增益下测试的结果进行线性拟合得到每个通道的定标方程。该方法只需根据成像校正仪运行的环境温度即可对仪器内部的杂散辐射进行定量测量。实验对上述方程进行了相应的验证。实验结果表明,在不同环境温度和增益的情况下,理论计算值与实际测量值最大误差为 4.45%,且因为理论计算时的温度与实际仪器温度并不完全一致,导致结果出现正负偏差,这说明该方法具有一定的可靠性。同时也应注意,非制冷型探测器内部偏置与响应度和环境温度有关,因此本文方法并不适用于这种情况。实验中采取了控制变量的方法,分析每个变量与成像区域大气校正仪输出灰度值之间的线性关系,得到了每个通道下的定标方程。该方法可用于检验系统杂散辐射抑制效果是否满足要求,同时对系统探测器暗背景噪声的性能评估具有一定参考意义。

## 参 考 文 献

- [1] Fan H M, Kang Q, Qiu Z W, *et al.* Polarization calibration for multi-spectral aperture-divided simultaneous detection system[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0228001.  
范慧敏, 康晴, 裘桢炜, 等. 多光谱分孔径同时探测系统偏振定标方法[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0228001.
- [2] Kou T, Zhou Z L, Liu H Q, *et al.* Correlation between infrared radiation characteristic signals and target maneuvering modes[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0204003.  
寇添, 周中良, 刘宏强, 等. 红外辐射特征信号与目标机动模式的相关性[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0204003.
- [3] Ren G D, Zhang L, Lan W H, *et al.* Analysis and suppression of stray radiation of shortwave infrared imaging system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 122901.

- 任国栋, 张良, 兰卫华, 等. 短波红外成像系统的杂散辐射分析与抑制研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 122901.
- [4] Hu Y D, Hu Q Y, Sun B, *et al.* Double-angle polarized atmospheric corrector for remote sensing images[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 652-659.
- 胡亚东, 胡巧云, 孙斌, 等. 遥感图像双角度偏振大气校正仪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 652-659.
- [5] Kang Q, Yuan Y L, Li J J, *et al.* Filtration and precision verification of optical filters on atmospheric synchronous corrector[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0312003.
- 康晴, 袁银麟, 李健军, 等. 大气同步校正仪的滤光片筛选方法与精度验证实验研究[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0312003.
- [6] Chang S T, Sun Z Y, Zhang Y Y, *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.
- [7] Zhu Y, Zhang X, Wu Y X, *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镜系统设计及其杂散光抑制研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822002.
- [8] Tian Q J, Chang S T, He F Y, *et al.* Internal stray radiation measurement for cooled infrared imaging systems using ambient temperature[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0712002.
- 田棋杰, 常松涛, 何锋赟, 等. 根据环境温度测量制冷型红外成像系统内部杂散辐射[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0712002.
- [9] Zhao Y C, Xu Y J, Sha W, *et al.* Stray light analyze and suppress of the space-borne infrared optical system[J]. Chinese Journal of 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.
- [10] Zhao N, Xue Y, Wang J. Analysis of stray radiation from infrared optical system with Monte-Carlo method[J]. Chinese Optics, 2010, 3(6): 665-670.
- 赵楠, 薛育, 王晶. 利用蒙特卡洛法分析红外光学系统的杂散辐射[J]. 中国光学, 2010, 3(6): 665-670.