

同轴全反红外光学系统自身热辐射测量方法

余菲^{1,2}, 任栖锋¹, 李华¹, 孙威¹, 黄智强¹

(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)

摘要: 对红外光学系统自身热辐射进行了评估方式、计算方法和实验测量研究。首先, 介绍并比较了两种自身热辐射的评估方式, 即有效发射率和等效黑体辐射温度; 其次, 详细介绍了基于实验结果的自身热辐射的等效黑体辐射温度的计算方法; 最后, 利用自身热辐射测试平台, 对同轴全反型红外光学系统的自身热辐射进行测量实验, 并进行了误差分析计算。结果表明: 自身热辐射的辐射出射度与光学系统有效 F 数的平方成正比关系, 与透过率成反比关系, 和自身热辐射的灰度输出与积分时间之间的线性系数成正比关系, 计算出该同轴全反型红外光学系统的自身热辐射的等效黑体辐射温度为 217.3 K, 经测量和计算出背景模拟板的辐射亮度误差为 8.5%, 自身热辐射的灰度输出与积分时间的线性拟合系数的相对不确定度为 0.2%, 并说明探测器在 5×10^{-4} Pa 中具有良好的稳定性。

关键词: 红外系统; 自身热辐射; 等效黑体辐射温度

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0104003

Measurement method of self-thermal radiation for coaxial total reflection infrared optical system

Yu Fei^{1,2}, Ren Qifeng¹, Li Hua¹, Sun Wei¹, Huang Zhiqiang¹

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

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

Abstract: Infrared optical system self-thermal radiation was evaluated, calculated and measured. Firstly, it introduced and compared the two kinds of the thermal radiation way of evaluation, effective emissivity and equivalent blackbody radiation temperature; Secondly, the way based on experiment of calculation for equivalent blackbody radiation temperature of self-thermal radiation was introduced in detail; Finally, the coaxial reflection infrared optical system thermal radiation was measured by using self-thermal radiation test platform and error analysis was carried out. The result show that self-thermal radiant exitance is proportional to the square of effectively F number of optical system and the linear coefficient for the output gray of self-thermal radiation between the integral time, is inversely proportional to transmittance. It shows that the equivalent blackbody radiation temperature for self-thermal radiation of coaxial reflection infrared optical system is 217.3 K. Error for radiation form background simulation board is 8.5%, the relative uncertainty of linear coefficient for the output gray of self-thermal radiation between integral time is 0.2%. It shows that infrared detector has a good stability under 5×10^{-4} Pa.

Key words: infrared system; self-thermal radiation; equivalent blackbody radiation temperature

收稿日期: 2017-06-01; 修订日期: 2017-08-15

作者简介: 余菲(1990-), 男, 硕士生, 主要从事红外辐射方面的研究。Email: falcon_yufei@126.com

导师简介: 任栖锋(1978-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事低温红外方面的研究。Email: renqf@ioe.ac.cn

0 引言

红外探测系统应用到空间从临空探测发展到深空探测阶段,深空低温环境是背景约为 4 K 的辐射环境中,影响探测系统探测能力的背景辐射变得很小,此时光学系统的自身热辐射变得十分突出,成为影响探测性能的主要因素。同轴全反红外光学系统为主要应用于空间的光学系统之一^[1-3]。同轴全反红外光学系统虽然中心有遮拦,但相对离轴反射型而言具有体积小,易轻量化,易加工装调等优点,相对折反系统而言具有较少的光学元件,有利于无热化设计,透过率较大的优点,广泛应用于较大口径的望远系统中^[4]。

同轴全反红外光学系统,其光学元件自身热辐射直接进入探测器像面上形成背景辐射,降低探测系统信噪比,缩短探测距离。现今对同轴全反红外系统的自身热辐射的研究主要是通过软件仿真分析,如在仿真中找出关键辐射面,通过合理设置发射率、提高光学元件反射率、优化机械结构、降低关键面温度等方法来减小自身热辐射带给探测器像面上的辐射量的影响,却进行较少的相关实验研究。

1 自身热辐射的评估方式

考虑在探测器响应波段范围内,红外系统的自发热辐射计算是根据光学元件和机械构件表面不同的散射特性看作不同的选择性辐射表面或辐射体,根据普朗克公式计算出其辐射出射度,并在光学系统中传输(反射、吸收、散射、衍射)后到达探测器像面上,转化为数字化的灰度值。

光学系统自身热辐射的某一元件的辐射出射度 M 满足:

$$M = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \times \frac{1}{\exp[c_2/(\lambda T)] - 1} d\lambda \quad (1)$$

式中: λ_1 - λ_2 为探测器的响应波段范围; ε 为光学元件或机械构件的发射率; c_1 为第一辐射常数; c_2 为第二辐射常数。

自身热辐射的辐射出射度经过各个表面的反射、散射、吸收等作用后到达探测器像面上的辐射功率 φ :

$$\varphi = L \Omega A_d = \tau \frac{M}{\pi} \Omega A_d \quad (2)$$

式中: Ω 为作为辐射源表面相对于探测器面的视场角; τ 为光学系统的透过率; A_d 为探测器像元面积。由公式(1)~(2)可知,影响光学系统的自发热辐射的因素主要有:光学系统(光学元件、结构件)的温度 T ,光学元件和结构件的发射率 ε ,辐射源表面对探测器的立体角 Ω ,光学系统的透过率 τ 。如果光学元件或结构件的发射率高,考虑“好的发射体也是好的吸收体”,意味着吸收率高,根据能量守恒,反射率和发射率之和为 1,一方面降低了自身热辐射的辐射量到达探测器像面的概率,另一方面也会增大表面的辐射通量,从而增大自身热辐射的辐射量到达探测器像面的值,故需要综合考虑。

杂散辐射的评价方式主要是点源透过率 PST,与自发热辐射抑制情况的评价有所不同。不同在于杂散辐射既包含视场内的自发热辐射所导致的,也包含视场外的杂光所导致的不必要的辐射量。点源透过率的定义为视场外的离轴角的光源在像面上产生的辐照度与垂直于该点源的输入孔径上辐照度之间的比值,适合于整个系统在杂散辐射评价,是光学系统本身对杂光抑制能力的一种描述,而自发热辐射本身就在光学系统视场内,故不适用对其抑制的评价。故采用等效黑体辐射温度^[5]和有效发射率^[1,6]。

等效黑体辐射温度定义为将光学系统中关键表面自身热辐射经过光学系统传输后在探测器面上的辐射能量等效为一个一定温度下的均匀黑体直接在探测器前所带来的辐射能量,该黑体的温度即为等效黑体温度。

$$M = \frac{4EF^2}{\tau} \quad (3)$$

式中: M 为一定温度时标准黑体的辐射出射度; E 为光学系统的自发热辐射在探测器面上的照度; τ 为系统反射率; F 为系统的有效 F 数。虽然也可以将自发热辐射在探测器面上辐射照度产生的光子数量,作为一种参考数,但不能形象说明其自发热辐射的影响效果。有效发射率指的是探测器面上接收到的光学系统的所有光学元件自身热辐射的辐射通量的总和与光学系统的最后一个光学元件作为黑体辐射源时探测器所能够接收到的辐射通量的比值:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\Phi_{\text{sum}}}{\Phi_{\text{last}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: Φ_{sum} 是指探测器面上接收的所有元件自身热

辐射的辐射通量的总和; Φ_{last} 是指最后一个光学元件 (作为参考黑体辐射源) 作为热辐射院所产生的辐射通量。如果光学系统的有效发射率越小, 说明光学系统对其自身热辐射引起的辐射通量的抑制能力越好。通过降低透镜压圈和镜筒的发射率等措施, 可以降低有效发射率的值。

有效发射率的评估方法仅适用于对仿真分析中时, 不能用于实验结果分析, 等效黑体温度的评价方法, 既可以通过软件仿真分析探测器面上的辐射照度的大小, 可以等效为一定温度的黑体, 也适用于实验结果分析, 计算出等效的黑体温度, 从而统一比较仿真与实验的结果, 进一步分析比对研究。

2 基于实验结果的等效黑体辐射温度计算

要测试自身热辐射的等效黑体辐射温度, 首先得知道光学系统自身热辐射在探测器上引起的灰度变化量的大小^[7]。比较多种辐射测量方法^[8-10], 考虑实际实验条件限制, 采用直接面源法的辐射测试方法。在探测器线性响应阶段, 在某一积分时间下, 灰度输出与辐射亮度成线性关系, 且在同一辐射亮度下部分积分时间内, 灰度输出与积分时间成线性关系, 而探测器的部分噪声引起的灰度值与积分时间成线性关系, 假设剩余部分噪声引起的灰度值为固定的。故仅探测器的灰度 DN 输出方程为:

$$DN = k \times L \times t + DN_{\text{noise}} \times t + DN_0 \quad (5)$$

式中: k 为探测器线性相关指数; L 为目标辐射亮度; t 为积分时间; DN_{noise} 为与积分时间线性相关的噪声导致的灰度偏置; DN_0 为噪声导致的固定的灰度偏置。基于公式(4), 在积分时间 t 为单位量时, DN 与 L 为线性关系, 可求得 k 、 $DN_{\text{noise}} + DN_0$ 之和 DN' 。

在同一目标辐射亮度 L , 两个不同的积分时间 t_1 和 t_2 时, 满足下列方程组:

$$\begin{cases} DN(t_1) = k \times L \times t_1 + DN_{\text{noise}} \times t_1 + DN_0 \\ DN(t_2) = k \times L \times t_2 + DN_{\text{noise}} \times t_2 + DN_0 \end{cases} \quad (6)$$

可计算出 DN_{noise} 和 DN_0 :

$$DN_{\text{noise}} = \frac{DN(t_2) - DN(t_1)}{t_2 - t_1} - k \times L \quad (7)$$

$$DN_0 = DN' - DN_{\text{noise}}$$

装上光学系统后, 假设光学系统自身热辐射的灰度输出是积分时间的函数 $DN_{\text{thermal}}(t)$, 故含光学系统的灰度 DN 输出方程为:

$$DN = k' \times L \times t + DN_{\text{thermal}}(t) + DN_{\text{noise}} \times t + DN_0 \quad (8)$$

式中: k' 为光学系统的线性相关系数, 其他参数与前述相同。

基于公式(7), 在积分时间为单位量时, 已知 DN_{noise} 和 DN_0 与不同黑体温度下的辐射亮度 L_1, L_2, \dots, L_n , 线性拟合后可以求出光学系统的线性相关系数 k' , 在某一黑体辐射亮度下, 根据公式(8)可以求出不同的积分时间对应的 DN_{thermal} 。

$$\begin{cases} DN(t_1) = k' \times L \times t_1 + DN_{\text{thermal}}(t_1) + DN_{\text{noise}} \times t_1 + DN_0 \\ DN(t_2) = k' \times L \times t_2 + DN_{\text{thermal}}(t_2) + DN_{\text{noise}} \times t_2 + DN_0 \\ \dots \\ DN(t_n) = k' \times L \times t_n + DN_{\text{thermal}}(t_n) + DN_{\text{noise}} \times t_n + DN_0 \end{cases} \quad (9)$$

对于特定工作温度的光学系统 (如同轴全反红外光学系统), 光学系统自身热辐射的辐射通量相当于在原来的背景辐射通量上增加了一个特定的辐射通量值。等效黑体辐射温度的辐射通量给探测器像元灰度输出增加了一定的灰度值, 若光学系统整体工作温度均匀, 就相当于在整个探测器面上的所有像元灰度输出增加了一定的灰度值。

探测器的输出电压范围: $V_L \sim V_H$, 电荷容量 Q_0 , 读出电路为 N 位 A/D, 工作电压为 V_0 ,

每个灰度值对应的电压值:

$$\Delta V = \frac{V_0}{2^N} \quad (10)$$

积分时间为 t 时自身热辐射通量所输出的灰度值 DN 对应的像元的平均电荷数 Q :

$$Q = Q_0 \times \frac{DN \times \Delta V}{(V_H - V_L)} \quad (11)$$

假定在探测器响应的波段范围内的量子效率 η 为常数, 那么产生 Q 电荷所需的能量 J :

$$J = \frac{Q}{\eta} h\nu \quad (12)$$

故在该积分时间 t 内的产生能量 J 的辐射功率:

$$P = \frac{J}{t} \quad (13)$$

在像元面积 A_d 上的辐射照度 E :

$$E = \frac{P}{A_d} \quad (14)$$

合并公式(9)~(12)可得在探测器像元上自身热辐射对应的辐射照度:

$$E = \frac{Q_0 \times DN \times \Delta V}{A_d \eta (V_H - V_L)} h\nu \quad (15)$$

辐射通量在探测器上产生的灰度值是与积分时

间呈线性关系,故探测器积分时间 t 与光学系统自身热辐射产生的辐射通量在探测器面上的灰度输出 DN 呈一定的线性关系,假设 $DN=K\times t+DN'$ 。故上式可以改写为:

$$E=K\times\frac{Q_0\times\Delta V\times h\nu}{A_d\eta(V_H-V_L)} \quad (16)$$

根据公式(2)在探测器像元上的辐射照度等效为温度为 T 的黑体所发射的辐出度。

$$M=\frac{4EF^2}{\tau}=\frac{4F^2}{\tau}\times K\times\frac{Q_0\times\Delta V\times h\nu}{A_d\eta(V_H-V_L)} \quad (17)$$

在相同的光学系统的自身热辐射时,其对应的等效黑体辐射温度的辐射出射度 M 与光学系统有效 F 数的平方成正比,和自身热辐射的灰度输出与积分时间之间的线性关系 K 成正比,与光学系统透过率成反比。最后参考普朗克公式,采用逐步逼近法,便可以计算出等效黑体辐射温度 T 。

3 实验测量

3.1 实验测量条件

为了准确测试低温背景下光学系统的自身热辐射的辐射通量,需要使得背景的辐射相对于光学系统自身的热辐射而言很小,尽量接近空间环境温度,故以低温黑体为背景模拟板,而常用的黑体最低工作温度在 250 K 左右保持工作一段时间就会结霜,结霜会影响黑体发射率的大小和均匀性,显著增大实验数据的误差,故需要更低的温度下正常工作的黑体。光学系统的自发热辐射实验测量平台,如图 1 所示,由真空舱、背景模拟板、屏蔽罩、高精度导轨等组成,可以由二级脉管制冷机将背景模拟板制冷到 90 K,通过导轨将光学系统送入热辐射屏蔽罩中,减小舱内环境反射辐射的影响。背景模拟板的直径为 300 mm。

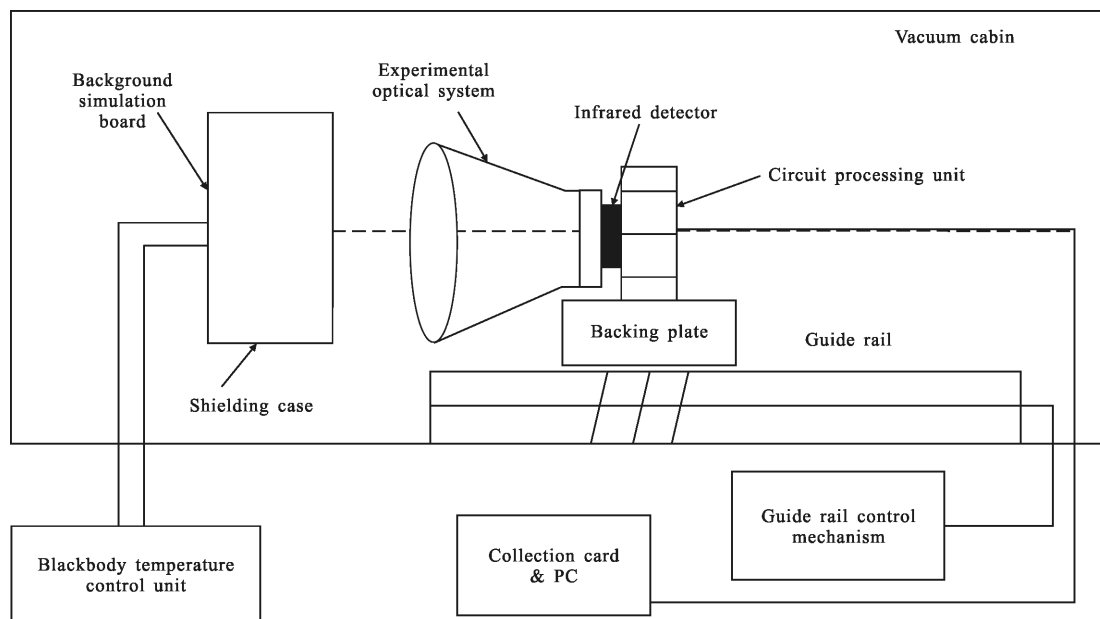


图 1 自身热辐射测量平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of the measurement bench of self-thermal radiation

实验光学系统为同轴全反光学系统,口径直径为 210 mm, F 数为 2。长波相机参数:响应波段 7.7~9.3 μm 像元数 256 \times 256,像元尺寸 30 $\mu\text{m}\times$ 30 μm ,输出数据位数 16 位,探测器的输出电压范围: $V_L=1.6\text{ V}$, $V_H=4.4\text{ V}$,电荷容量 Q_0 为 36.5 Me,读出电路为 N 位 A/D,工作电压为 $V_0=0\sim 5\text{ V}$ 。首先将视场光阑与光学系统的一次像面调节好,使得光阑效率尽量达到 100%。

3.2 自身热辐射的测试

3.2.1 不含光学系统的探测器标定结果

为了将背景模拟板的辐射面覆盖在整个红外相机的视场内,将 F 数为 2 的红外探测器放置真空舱中于直径为 300 mm 的背景板前 200 mm 内。采用积分时间为 0.1 ms,将背景模拟板温度设置为 125、135、...、285、293、300 K 进行辐射定标,考虑整个线性区间的

温度响应范围,并分别计算在探测器面上中心像元(128,128)的时间噪声,选取时间噪声较小的背景模拟板温度点 135、165、235、255、285、293、300 K。探测器满足标定方程: $DN=875.86 \times L+23\ 997$,其线性拟合度 $R^2=0.97$,拟合结果如图 2 所示(虚线为线性拟合趋势,实线为实际数据点连线)。

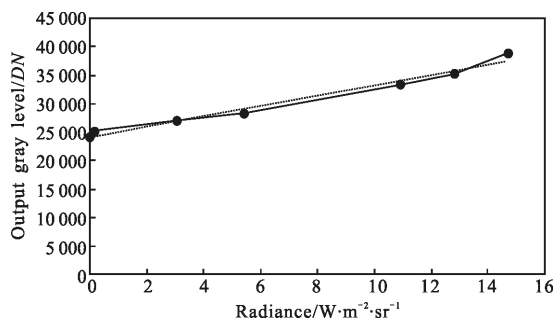


图 2 探测器辐射亮度与输出灰度值的关系

Fig.2 Relation of the radiance of detector with output gray value

探测器线性相关指数 k 为 875.86。在积分时间为 0.1 ms 时, $0.1 \times DN_{\text{noise}} + DN_0 = 23\ 997$ 。根据在背景温度为 165 K 时,两个积分时间分别为 0.05 ms 和 0.1 ms 时,满足公式(5),可以计算出 DN_{noise} 为 2 262.64, DN_0 为 23 771.75。

3.2.2 装上光学系统的探测系统的辐射测试

让光学系统与背景模拟板中心对齐,并将光学系统的前端刚好在屏蔽罩中,减小反射环境辐射的影响,同时使背景模拟覆盖住光学系统整个口径。选取积分时间为 0.05、0.08、0.1、0.15、0.2、0.25、0.3 ms,背景模拟板温度为 135、165、195、235、255 K,选取积分时间 0.1 ms 为单位时间,根据公式(8)可以得 $DN=721.92 \times L+25\ 071$ 光学系统的线性相关系数 k' 为 721.92,再根据公式(9),将在背景模拟板为 165 K,结合光学线性相关系数 k' , DN_{noise} , DN_0 , 得到在各个积分时间由光学系统自身热辐射引起的输出灰度值,如表 1 所示。

表 1 积分时间与对应各个自身热辐射所引起的输出灰度值

Tab.1 Output gray value corresponding to each of self-thermal radiation and integration time

Integration time/ms	0.05	0.08	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
Output/DN	135	473	565	963	1 502	1 997	2 455

经过线性拟合,可以明显发现其自身热辐射引起的灰度值与对应的积分时间满足下列线性关系:

$$DN_{\text{thermal}}=9\ 239 \times t-335.45$$

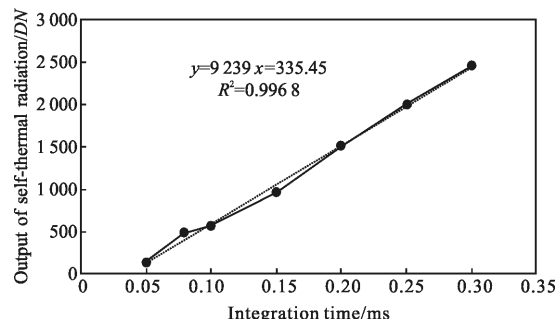


图 3 自身热辐射输出灰度值与积分时间的关系

Fig.3 Relation of the output gray value of self-thermal radiation with integration time

光学系统的自身热辐射引起的灰度输出与积分时间整体上呈线性关系,如图 3 所示,整体上线性度较好 $R^2=0.9968$,斜率为 $K=9\ 239$ 。根据公式(16)~(17)可以计算出自身热辐射带来的辐射通量等效为等效黑体辐射温度为 217.3 K 的黑体直接在探测器像元上的辐射照度为 $5.32 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ 。

3.3 实验误差分析

由于基于实验的自身热辐射的计算方法可知,自身热辐射的测量结果的不确定度主要来源于背景模拟板的温度,探测器器输出值,线性拟合误差。

3.3.1 背景模拟板的辐射亮度的不确定性

背景模拟板的温度精度和温度的均匀性分布给其辐射亮度带来不确定度^[11]。温度的精度为 $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由于实验采用的背景模拟板采用圆周均匀传导优化设计,减小其自身温度分布的不一致性。在背景模拟板如图 4 所示位置的位置上安装温度传感器。

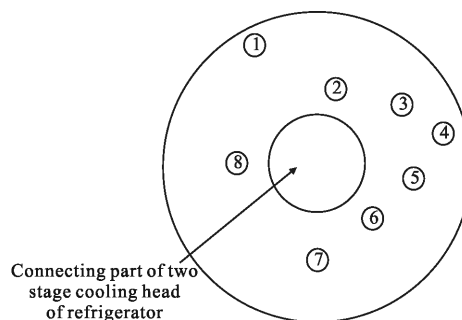


图 4 背景模拟板上的温度传感器位置

Fig.4 Distribution of temperature sensor on background simulation board

在背景模拟板温度为-33℃时各传感器测得温度如表 2 所示。

表 2 8 个温度传感器的测温值

Tab.2 Temperature measuring value of 8 temperature sensors

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
T/℃	-32.1	-35.6	-33.7	-34.7	-31.0	-32.1	3.9	-35.2
Δ	0	+0.6	-0.2	-0.4	+0.5	+0.1	-0.3	-0.6

Δ 为各个通道经多次温度标校后的偏置补偿量。剔除传感器 7 的粗大误差,故当背景模拟板工作在-33℃时,均匀性的范围为(-2.8℃,+2.5℃)。

为了计算背景模拟板的不均匀性所带来的光谱辐射亮度的不确定性,将长波 7.7~9.3μm 分为 4 个波段,每个波段 0.4μm,假定背景模拟板的发射率为 0.93。

由表 3 计算可知,在背景模拟板温度非均匀分布范围内,这 4 个波段的范围内辐射亮度的相对误差分别为 8.5%、8.2%、7.8%、7.6%。取最大 8.5%为背景模拟板的非均匀性引起的辐射亮度的不确定度。而背景模拟板的温度精度相对非均匀性分布范围较小。故可认为背景板的光谱辐射的不确定度为 8.5%。

表 3 背景模拟板在不同温度下的各波段的辐射亮度

Tab.3 Radiance in each spectral band of the background simulation board at various temperature

T/℃	Spectral band/μm			
	7.7-8.1	8.1-8.5	8.5-8.9	8.9-9.3
-35.8	0.667	0.754	0.834	0.905
-33	0.729	0.821	0.905	0.979
-30.5	-30.5	0.885	0.971	1.047

3.3.2 制冷型长波探测器的稳定性

制冷型长波探测器在刚开始制冷时,电流明显较大,当制冷完成后,工作电流变小并稳定下来。为了确定长波探测器的稳定性,在电流稳定下来后,采集在气压为 5×10⁻⁴ Pa 同一背景温度下同一积分时间(t=240 μs)每隔 5 min 连续 1 500 帧图像计算中心区域 180×180 像素的灰度值和非均匀性为准。由表 4

可知,图像的稳定性较好。

表 4 探测器中心图像灰度均值与非均匀性测量结果

Tab.4 Measurement result for average grayscale and heterogeneity of central image of detector

Measurement time	Average grayscale of central image/DN	Heterogeneity of central image
20:21	34 824	0.014 6
20:26	34 841	0.014 7
20:31	34 833	0.014 6
20:36	34 840	0.014 7
20:41	34 832	0.014 7

3.3.3 线性拟合引起的不确定度

自身热辐射的等效黑体辐射温度的测量是基于实验结果的,在测量实验中多次用到线性拟合,不能够忽略线性拟合引起的不确定度,但线性拟合探测器线性相关指数 k 引起不确定度和截距的不确定度,线性拟合光学系统的线性相关系数 k'引起不确定度和截距的不确定度,最后表现为线性拟合的自身热辐射与积分时间的线性系数(线性系数为 9 239)的不确定度 U 和相对不确定度 E 为:

$$U = \sqrt{\frac{\sum_i^n [y_i - (kx_i + b)]^2}{(n-2) \times \sum_i^n [(x_i - \bar{x})^2]}} = 20.62 \quad (18)$$

$$E = \frac{20.62}{9239} = 0.2\% \quad (19)$$

式中:x 为积分时间;y 为积分时间对应的灰度值;k 为拟合后的斜率;n 为数据组数。

4 结 论

介绍并比较了评估光学系统的自身热辐射的两种评估方式-有效发射率和等效黑体辐射,说明等效黑体辐射温度既适用于自身热辐射的仿真分析又适用于实验结果分析,而有效发射率仅适用于仿真,故基于实验详细介绍了等效黑体辐射温度的计算方法,分析出等效黑体辐射出射度与光学系统有效 F 数的平方成正比,和自身热辐射的灰度输出与积分时间的线性关系 K 成正比,与光学系统透过率成反比,并针对某同轴全反型红外光学系统的自身热辐

射进行测量实验,等到其等效的黑体辐射温度为 217.3 K,并进行了误差分析,表明探测器在真空中有良好的稳定性。为计算光学系统的自身热辐射提供了参考。

参考文献:

- [1] ST Clair Dinger Ann. Thermal emissivity analysis of a GEMINI 8-meter telescopes design [C]//SPIE, 1993, 1753: 183-188.
- [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. (in Chinese)
李岩, 刘剑锋. 红外光学遥感器内部杂散与外部杂散光的综合抑制研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0928002.
- [3] Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Stray light removing of reflective optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 316-318. (in Chinese)
钟兴, 张雷, 金光. 反射光学系统杂散光的消除[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 316-318.
- [4] Li Gang. Research about space-based IR-optical system for space object detection [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
李刚. 空间目标天基红外探测光学系统研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [5] Zhou Jun, Li Juan, Wang Qingfeng, et al. Optimized design of infrared opto-mechanical systems based on the spontaneous emission suppression [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0322003. (in Chinese)
周军, 李娟, 王庆丰, 等. 基于自发辐射抑制的红外光机系统优化设计[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0322003.
- [6] Yao Xiuwen, Xiao Jing, Zeng Shuguang, et al. Analysis and suppression of self-generated thermal emission in infrared optical systems [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 36(7): 1273-1276. (in Chinese)
姚秀文, 肖静, 曾曙光, 等. 红外光学系统自身杂散辐射分析及抑制[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 36(7): 1273-1276.
- [7] 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. (in Chinese)
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.
- [8] Luo Maojie. Research on response characteristics of FPA infrared radiation [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
罗茂捷. FPA 红外辐射响应特性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- [9] Wang Jianjun, Huang Chen, Li Jianting. Calibration technology of infrared radiation measurement for space object [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0404002. (in Chinese)
王建军, 黄晨, 李舰艇. 空间目标红外辐射测量系统标定技术[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0404002.
- [10] Yang Ciyin, Zhang Jianping, Cao Lihua. Infrared radiation measurement based on real-time correction [J]. *Journal of Infrared and Millim Waves*, 2011, 30(3): 284-288. (in Chinese)
杨词银, 张建萍, 曹立华. 基于实时标校的目标红外辐射测量新方法[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(3): 284-288.
- [11] Yang Ciyin, Cao Lihua. Radiation calibration and error analysis for a large-aperture infrared opto-electric system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (9): 1624-1628. (in Chinese)
杨词银, 曹立华. 大口径红外光电系统辐射定标及误差分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1624-1628.