

热红外光谱仪系统的内部杂散辐射定标与测量技术

彭俊^{1,2}, 何琦^{1,2}, 张莹¹, 王佰海³, 孙德新^{1,2,3}, 刘银年^{1,2,3*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院上海技术物理研究所 启东光电遥感中心, 江苏 启东 226200)

摘要:提出了一种热红外光谱仪系统内部杂散辐射的测量方法,该方法基于探测器和热红外光谱仪系统的辐射定标.通过分别单独标定探测器对黑体辐射能量的全谱段输出响应曲线和光谱仪系统对黑体辐射能量分光后单一光谱通道的输出响应曲线,从而定量得出光谱仪的内部杂散辐射灰度值及辐射通量值且能计算出不同积分时间和光机温度时内部杂散辐射的灰度值及辐射通量.采用该方法对现有光谱仪内部杂散辐射进行了实验测量,并进行了对比实验,结果表明,对比实验值与理论预测值误差偏离小于1%.该方法可操作性高,可用于测量热红外光谱仪内部杂散辐射在总输出DN值中的占比、预测光谱仪制冷对内部杂散辐射的影响、测量其他内部杂散辐射抑制手段的效果等.

关键词:热红外;光谱仪;辐射定标;内部杂散辐射

中图分类号:TN216 文献标识码:A

Calibration and measurement of internal stray radiation in thermal infrared spectrometer system

PENG Jun^{1,2}, HE Qi^{1,2}, ZHANG Ying¹, WANG Bai-Hai³, SUN De-Xin^{1,2,3}, LIU Yin-Nian^{1,2,3*}

(1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

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

3. Qidong Optoelectronic Remote Sensing Center, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Qidong 226200, China)

Abstract: A method for measuring internal stray radiation in thermal infrared spectrometer system was proposed in this paper, which is based on radiometric calibration of a detector and a thermal infrared spectrometer. The output response curves of detector and the spectrometer system to blackbody radiation energy of a single spectral channel are calibrated separately. Therefore, the internal stray radiation gray value and radiation flux value of the spectrometer can be obtained and the gray value and radiation flux of the internal stray radiation at different integration times and temperatures in the system can also be calculated. The proposed method was used to measure the internal stray radiation of an existing spectrometer, and comparative experiments were carried out. Results show that the error between the experimental results and the theoretical predicted values is less than 1%. The proposed method has high maneuverability and can be used to measure the proportion of internal stray radiation in total output DN value of the system, predict the influence of refrigeration on internal stray radiation of spectrometer, and measure the inhibition effect of other internal stray radiation suppression methods.

Key words: thermal infrared, spectrometer, radiometric calibration, internal stray radiation

收稿日期: 2019-01-11, 修回日期: 2019-07-02

Received date: 2019-01-11, Revised date: 2019-07-02

基金项目: 国家重点研发计划资助(2016YFB0500400)

Foundation items: Foundation item: Supported by the National Key R&D Program (2016YFB0500400);

作者简介 (Biography): 彭俊 (1992-), 男, 四川仁寿人, 博士研究生, 主要研究领域为红外光谱仪内部杂散辐射仿真、定标和测量. E-mail: peng-jun_445898818@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): Email: ynliu@mail.sitp.ac.cn

PACS:07.57.Ty

引言

热红外光谱仪进行光谱分光的过程中将信号光分为数十个至上百个波段,由于光机自身辐射产生的内部杂散辐射较强,信号的强度较传统成像仪器更加微弱,造成系统信噪比、有效动态范围较小,曝光时间难以提高等问题;并且内部杂散辐射随温度升高而增大,严重影响系统辐射精度和系统定量化.因此,热红外光谱仪内部杂散辐射的定标和测量研究是尤为重要的.

国外已研制多台较为经典的热红外成像光谱仪器,现有报道的热红外成像光谱仪如机载高光谱成像仪(Airborne Hyperspectral Imager, AHI)^[1]、长波成像高光谱仪(Long Wave Hyperspectral Imaging Spectrometer, LWHIS)^[2]、量子阱红外地球科学平台(Quantum Well Infrared Earth Science Testbed, QWEST)^[3]和矿物气体识别仪(Mineral and Gas Identifier, MAGI)^[4]等;而国内受制于缺少性能优越的探测器等原因,在热红外光谱仪的设计和测试方面的研究较为有限^[5].国外报道的设备大多对光谱仪采用深低温(15~100 K)制冷的方式对内部杂散辐射进行了有效抑制,对内部杂散辐射进行定标测量的需求较低.然而,近年来,在国外商业公司的推动下,热红外光谱仪的发展向非深低温制冷、大视场、轻量化的方向发展^[6-8],光机系统温度的升高及机械内壁面积和复杂程度增加,使内部杂散辐射的测量和抑制的问题重新凸显,需要对内部杂散辐射建立有效的模型和可行的分析测试方法.

现有的杂散辐射分析测试方法主要为理论计算法和软件仿真分析法,前者通过将模型简化后进行数学积分计算,对复杂的结构体建模能力有限,与实际情况差距较大;后者使用计算机软件对内部杂散辐射进行建模分析,常用的软件有TracePro、Lighttools、ASAP、FRED^[9-11]等,软件分析方法主要基于蒙特卡洛法、光线追迹法、近轴算法等.这类方法的优势在于操作简单、成本低、周期短等.然而,建模采用的参数如机械结构的表面参数、发射率及光学镜面的折反射参数等均为理想值,与实际系统的参数值存在差别,影响了仿真结果的精度,难以精确反映系统内部杂散辐射.因此,在实际工程应用中,热红外光谱仪由于其光学系统和机械结构的复杂性,以上两种方法在计算热红外光谱仪系统的

内部杂散辐射时均存在误差,需要采用实验方法来更加准确地测量系统的内部杂散辐射.

提出了一种基于定标实验的热红外光谱仪系统内部杂散辐射测量方法,使用该方法在实验室进行定标后,在外场的复杂环境下试验时,不需要对内部杂散辐射进行重复定标,通过测量光机温度即可确定当下实验条件时内部杂散辐射在接收信号中的占比.此外,采用该方法在室温下进行定标还可预测采用深低温制冷方式在不同制冷温度下的效果.我们首先分别对探测器和光谱仪定标过程中的系统输出进行了理论分析,然后使用黑体分别对制冷型红外探测器的全响应波段和热红外光谱仪的单一光谱通道在同一积分时间下进行定标测试,结合测试时的光机温度,计算得到不同积分时间下和不同光机温度状态下的系统内部杂散辐射的灰度值和辐射通量.最后,采用该方法对现有设备进行了测量并给出定标结果.

1 热红外光谱仪的辐射定标方法

1.1 探测器的辐射定标模型

首先分析探测器在不与热红外光谱仪系统安装的情况下独立工作的定标模型,即黑体发出的热辐射经过冷光阑被探测器任一像元接收的模型,如图1所示.热红外探测器对外界目标信号、内部辐射的响应均与积分时间有关,因此需要分析基于积分时间的辐射定标模型.制冷型热红外探测器保证了自身偏置较为稳定几乎不受系统温度影响,其稳定工作时,系统的响应与积分时间呈线性关系^[12],此时探测器单像元的输出灰度表示为

$$\begin{aligned} g_{detector} &= t \cdot G_0 \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{black}) + B_0 \\ &= t \cdot G_0 \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{black}) + t \cdot h_{det1} + h_{det2} \end{aligned}, \quad (1)$$

t 表示积分时间, B_0 表示与信号无关的偏置, G_0 表示单位积分时间时探测器单像元对入射辐亮度的响应, $L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{black})$ 表示工作温度为 T_{black} 的黑体在探测器工作波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 发射出的辐射亮度. h_{det1} 表示探测器及其工作电路产生的与积分时间呈线性关系的偏置. h_{det2} 表示探测器及其工作电路与积分时间无关的固有偏置.

单位积分时间探测器单像元对入射辐射通量的响应表示为

$$G'_0 = G_0 / K_{black}, \quad (2)$$

K_{black} 为探测器将黑体辐亮度转化为辐射通量的几何因子, K_{black} 值为常数且已有前人进行推导^[12-14], 表示为:

$$K_{black} = \pi \cdot A \cdot \iint_{x^2+y^2 \leq r^2/2} \frac{d^2}{\pi [d^2 + (x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2]} dx dy, \quad (3)$$

其中 A 表示像元面积, r 表示冷光阑半径, d 表示冷光阑平面到探测器焦平面阵列的距离, Δx 、 Δy 表示探测器上的任一像元偏离中心的距离。

对于探测器的定标模型, 探测器接收的单像元的黑体目标信号的辐射通量表示为

$$\Phi = K_{black} \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{black}) \quad (4)$$

1.2 热红外光谱仪系统的辐射定标模型

将探测器安装在热红外光谱仪系统上并经准确调焦操作后, 使用黑体对热红外光谱仪进行定标, 当光机温度为 T_{system} 时, 热红外光谱仪系统的输出灰度为

$$\begin{aligned} g_{system} &= t \cdot G_0 \cdot \delta_{optical} \cdot L_{\lambda_3-\lambda_4}(T_{black}) + B_1 \\ &= t \cdot G_0 \cdot \delta_{optical} \cdot L_{\lambda_3-\lambda_4}(T_{black}) + \\ &\quad t \cdot G_{stray} \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{system}) + t \cdot h_{det1} + h_{det2} \end{aligned} \quad (5)$$

$L_{\lambda_3-\lambda_4}(T_{black})$ 表示工作温度为 T_{black} 的黑体信号经热红外光谱仪分光后一光谱通道波段 $\lambda_3 \sim \lambda_4$ 的辐射亮度, $\delta_{optical}$ 表示光学系统的效率, B_1 表示与黑体发出的目标信号无关的偏置。

$$G_{stray} = G'_0 \cdot K_{stray} \quad (6)$$

G_{stray} 表示单位积分时间探测器对内部杂散辐射的辐射亮度的响应, K_{stray} 表示系统自身产生的内部杂散辐射的辐射亮度转化为辐射通量的几何因子, 对于固定的光学系统, K_{stray} 为常数。

1.3 内部杂散光测量方法

由式(1)可知, 要定标探测器输出灰度 $g_{detector}$ 随黑体辐亮度的 $L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{black})$ 的响应曲线, 需要使用高精度的大面元黑体近距离放置于探测器前端并且覆盖探测器的全孔径, 如图1所示。在积分时间 t_0 时, 通过改变黑体温度分别测定探测器输出灰度的响应, 可得到输出灰度与黑体辐亮度的对应关系为:

$$\begin{aligned} g_{detector} &= t_0 \cdot G_0 \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{black}) + B_0 \\ &= t_0 \cdot G_0 \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{black}) + t_0 \cdot h_{det1} + h_{det2} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(5)可知, 要定标热红外光谱仪系统输出

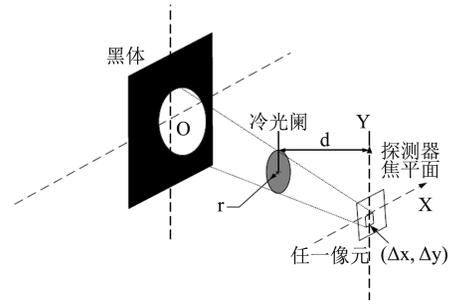


图1 探测器定标模型

Fig. 1 Calibration model of detector

灰度 g_{system} 随黑体辐射经分光后任一光谱通道辐亮度 $L_{\lambda_3-\lambda_4}(T_{black})$ 变化的响应曲线。在对热红外光谱仪进行辐射定标时使用高精度黑体覆盖光谱仪狭缝, 通过改变黑体温度得到探测器在此光谱通道的输出灰度对黑体辐亮度的响应, 如图2所示, 并使用测温仪精准测量热红外光谱仪此时的光机温度 $T_{system0}$, 可以得到此时系统输出灰度随此光谱通道接收黑体辐亮度间的对应关系为:

$$\begin{aligned} g_{system0} &= t_0 \cdot G_0 \cdot \delta_{optical} \cdot L_{\lambda_3-\lambda_4}(T_{black}) + B_1 \\ &= t_0 \cdot G_0 \cdot \delta_{optical} \cdot L_{\lambda_3-\lambda_4}(T_{black}) + \\ &\quad t_0 \cdot G_{stray} \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{system0}) + t_0 \cdot h_{det1} + h_{det2} \end{aligned} \quad (8)$$

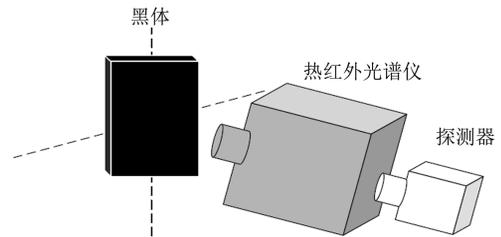


图2 热红外光谱仪对黑体辐射定标示意图

Fig. 2 Radiometric calibration of blackbody by thermal infrared spectrometer

由式(7)、(8)可得,

$$G_{stray} = \frac{B_1 - B_0}{t_0 \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{system0})} \quad (9)$$

因此, 任一积分时间 t 和光机温度 T_{system} 下, 热红外光谱仪系统内部杂散辐射引起的输出灰度为:

$$\begin{aligned} g_{stray}(t, T_{system}) &= t \cdot G_{stray} \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{system}) \\ &= t \cdot \frac{B_1 - B_0}{t_0 \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{system0})} \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{system}) \end{aligned} \quad (10)$$

任一光机温度 T_{system} 时热红外光谱仪系统内部杂散辐射的辐射通量为:

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{stray}}(T_{\text{system}}) &= K_{\text{stray}} \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{\text{system}}) \\ &= \frac{G_{\text{stray}}}{G_0} \cdot K_{\text{black}} \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{\text{system}}) \\ &= \frac{B_1 - B_0}{t_0 \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{\text{system}0})} \cdot \frac{K_{\text{black}}}{G_0} \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{\text{system}})\end{aligned}\quad (11)$$

其中由式(2)、(6)联立可知

$$G'_0 = \frac{G_0}{K_{\text{black}}} = \frac{G_{\text{stray}}}{K_{\text{stray}}}\quad (12)$$

由式(9)~(11)可知,只要测量工作状态时的光机温度 T_{system} ,即可计算出热红外光谱仪系统在此工作状态下的内部杂散辐射通量 $\Phi_{\text{stray}}(T_{\text{system}})$;且积分时间确定后,即可计算出热红外光谱仪系统在此工作状态下的内部杂散辐射的输出灰度并确定其在探测器输出灰度值中的占比。

2 热红外光谱仪内部杂散辐射测量实验

2.1 实验方法

探测器辐射定标测量实验装置如图3所示,探测器系统直接面对黑体的有效工作区域进行测量,该系统使用的探测器为 Sofradir 公司的 MARS VLW 系列长波探测器,探测器参数见表1。

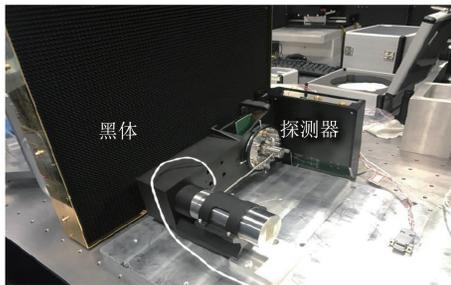


图3 探测器辐射定标实验图

Fig. 3 Radiometric calibration of detector

表1 探测器参数

Table 1 Parameters of detector

探测器参数	参数值
工作波段	7.7 μm ~11.7 μm
F数	2
像元数	320 pixels×256 pixels
像元大小	30 μm ×30 μm
冷光阑直径	10.55 mm
冷光阑与焦平面阵列的距离	19.8 mm
量化位数	12 bit

定标黑体采用 HGH Infrared System 公司的 ECN100N40 的超大面源黑体,面源尺寸 1 000 mm×1 000 mm,标称工作范围为 10~100 $^{\circ}\text{C}$,温控精度 0.01 $^{\circ}\text{C}$. 测量时将积分时间设置为 0.30 ms,实验发现探测器直接对黑体进行辐射定标时,黑体温度达到 35 $^{\circ}\text{C}$ 时探测器输出灰度即出现饱和的现象,因此将黑体温度分别设置为 20 $^{\circ}\text{C}$ 、22.5 $^{\circ}\text{C}$ 、25 $^{\circ}\text{C}$ 、27.5 $^{\circ}\text{C}$ 、30 $^{\circ}\text{C}$ 、32.5 $^{\circ}\text{C}$,并采集在不同黑体温度下探测器的灰度输出响应。

将探测器与热红外光谱仪连接,通过精确调焦使探测器面阵位于光谱仪焦平面位置,再对光谱仪进行定标,如图4所示,定标时使黑体有效区域近距离、全覆盖狭缝视场。为保证用作定标的光谱仪通道准确,使用输出波长为 10.60 μm 单色光的 CO_2 气体激光器作为光源,准确确认了 10.48~10.72 μm 这一光谱通道的位置。由于光谱仪的机械结构的限制,此处采用上海福源光电公司的 HFY300 型小面源黑体,面源尺寸 $\Phi 100$ mm,标称工作范围为 20~70 $^{\circ}\text{C}$,温控精度 0.01 $^{\circ}\text{C}$. 将黑体近距离放置于狭缝前方,温度分别设置为 30 $^{\circ}\text{C}$ 、35 $^{\circ}\text{C}$ 、40 $^{\circ}\text{C}$ 、45 $^{\circ}\text{C}$ 、50 $^{\circ}\text{C}$ 、55 $^{\circ}\text{C}$ 、60 $^{\circ}\text{C}$,并采集在不同黑体温度下探测器的灰度输出响应。此外,使用测温仪测量了实验时的光机温度 $T_{\text{system}}=19.3$ $^{\circ}\text{C}$ 。

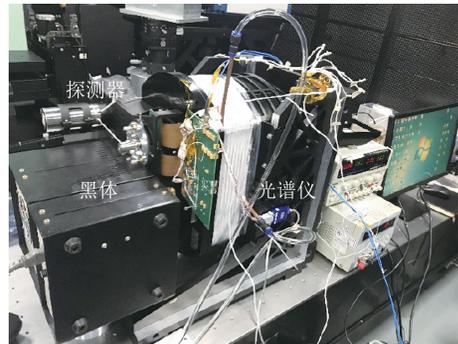


图4 热红外光谱仪对黑体进行辐射定标实验现场图

Fig. 4 Radiometric calibration experiment of blackbody by thermal infrared spectrometer

2.2 定标结果

数据处理时,为减少探测器非均匀性对定标的影响,取光谱维一系列像元的灰度值进行加权平均得到一灰度平均值作为单像元的输出灰度。此外,为了保证探测器定标和光谱仪定标的结果一致性,对两组定标实验的结果均取用了 10.48~10.72 μm 这一光谱通道的像元作为数据样本。对探测器的定标结果如图5所示,横坐标为探测器工作范围 7.70~

11. 70 μm 波段在不同温度时对应的黑体辐亮度值, 纵坐标为探测器输出灰度值, 对于线性区域的定标方程拟合为:

$$g_{\text{detector}} = 74.02 \times L + 1113.5 \quad (13)$$

与定标方程式(7)相对应, 设积分时间 t_0 的单位为 ms, 得响应率 $G=246.73 \text{ DN} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{ms}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, 偏置 $B_0=1113.5 \text{ DN}$.

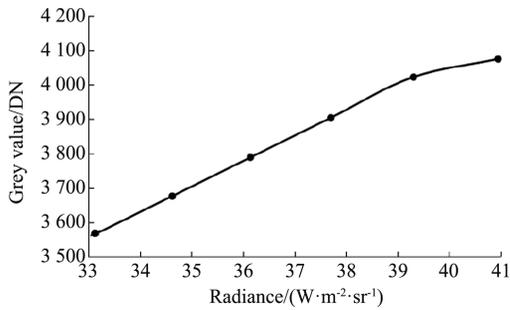


图5 探测器辐射定标曲线

Fig. 5 Radiometric calibration curve of detector

对热红外光谱仪的定标结果如图6所示, 横坐标为 10.48 ~ 10.72 μm 光谱通道对应的黑体辐亮度, 纵坐标为探测器输出灰度值, 拟合定标方程为:

$$g_{\text{system}} = 64.77 \times L + 3175 \quad (14)$$

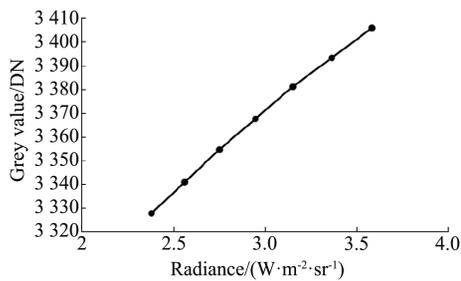


图6 热红外光谱仪辐射定标曲线

Fig. 6 Radiometric calibration curve of thermal infrared spectrometer

与定标方程(8)相对应, 设积分时间 t_0 的单位为 ms, 响应率 $G=215.90 \text{ DN} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{ms}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, 偏置 $B_1=3175 \text{ DN}$.

结合公式(9)得

$$G_{\text{stray}} = 209.85 \text{ DN} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{ms}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}, \quad (15)$$

结合公式(10)可知任一积分时间 t 和任一光机温度下 T_{system} 下, 该系统内部杂散辐射引起的探测器单像元的输出灰度可以表示为

$$g_{\text{stray}}(t, T_{\text{system}}) = 209.85 \times t \times L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{\text{system}}), \quad (16)$$

积分时间为 0.30 ms 时, 由式(16)可预测在不

同光机本体温度下内部杂散辐射的灰度值, 在使用时不需要重复定标, 仅需要测量光谱仪的光机温度即可确定光谱仪内部杂散辐射贡献的灰度值.

为了验证方法的正确性, 通过光谱仪外置的水冷系统改变光谱仪的本体温度, 在不同本体温度 (19.3°C, 17.3°C, 16.1°C, 14.9°C) 下分别进行了内部杂散辐射的辐射定标与测量作为对比实验, 计算得到了相应本体温度时系统内部杂散辐射的输出灰度作为对比实验值, 如图7所示, 对比实验的结果与式(16)的理论预测值误差偏离小于1%.

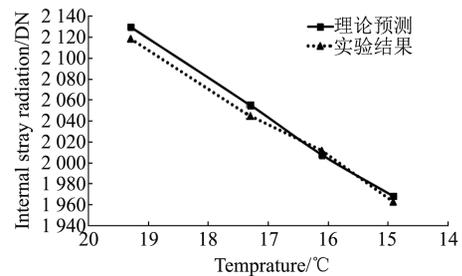


图7 不同本体温度状态下的热红外光谱仪内部杂散辐射灰度的预测值与对比实验值

Fig. 7 Gray value of stray radiation of prediction and contrast experiments in thermal infrared spectrometer at different temperatures

由式(3)计算得该热红外系统的

$$K_{\text{black}} = 0.4833 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{sr}. \quad (17)$$

联立式(11)、(17)并代入已知参数可得, 光机温度下的探测器单像元接收的内部杂散辐射通量为

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{stray}}(T_{\text{system}}) &= \frac{B_1 - B_0}{t_0 \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{\text{system}0})} \cdot \frac{K_{\text{black}}}{G_0} \cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{\text{system}}) \\ &= 3.91 \times 10^{-11} \times L_{\lambda_1-\lambda_2}(T_{\text{system}}) \end{aligned} \quad (18)$$

定标结果式(16)、(18)分别反映了本系统的内部杂散辐射的输出灰度与积分时间和光机温度的定量关系、辐射通量与光机温度的定量关系.

3 结语

基于探测器和热红外光谱仪的辐射定标模型提出了一种热红外光谱仪的内部杂散辐射定标测量方法, 该方法使用高精度黑体分别对制冷型红外探测器的全响应波段和热红外光谱仪系统的单一光谱通道在一个积分时间下进行辐射定标测试, 通过该方法对探测器和光谱仪分别进行一次定标, 即

可测量系统当前状态的内部杂散辐射等效的灰度值和辐射通量,结合测试时的光机温度还可实现对任一积分时间和任一光机温度下内部杂散辐射的灰度值和辐射通量的计算.采用该方法对现有光谱仪内部杂散辐射进行了测量,并进行了对比实验,结果表明,对比实验的结果与理论预测值误差偏离小于1%.该方法可操作性高,可用于测量热红外光谱仪内部杂散辐射在总输出DN值中的占比、预测光谱仪制冷对内部杂散辐射的影响、测量其他内部杂散辐射抑制手段的效果等.该方法也可应用于其他采用制冷型探测器的红外光谱系统.

参考文献

- [1] Lucey P G, Williams T J, Mignard M, *et al.* AHI: an airborne long wave infrared hyperspectral imager [J]. *Proc. of SPIE*, 1998, **3431**: 36-43.
- [2] Yokohama K E, Harold Miller J, Hedman T, *et al.* NGST: long-wave hyperspectral imaging spectrometer system characterization and calibration [J]. *Proc. of SPIE*, 2003, **5159**: 262-274.
- [3] Johnson W R, Hook S J, Mouroulis P Z, *et al.* QWEST: Quantum well infrared earth science testbed [J]. *Proc. of SPIE*, 2008, **7086**, 06-1-10.
- [4] Hall J L, Boucher R H, Buckland K N, *et al.* MAGI: A New High-Performance Airborne Thermal-Infrared Imaging Spectrometer for Earth Science Applications [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2015, **53**: 5447-5457.
- [5] WANG Jian-Yu, LI Chun-Lai, LV Gang, *et al.* Sensitivity model and system design for thermal infrared hyperspectral imager [J]. *Infrared and Laser Engineering* (王建宇,李春来,王跃明,等.热红外高光谱成像仪的灵敏度模型与系统研制. **红外与激光工程**), 2017, **46**(01):9-15.
- [6] http://www.specim.fi/downloads/Spectral_Cameras_LWIR_ver2-16.pdf
- [7] <http://www.specim.fi/downloads/AisaOWL%20ver1-2017.pdf>
- [8] <http://www.itres.com/wp-content/uploads/2014/10/TASI-600.pdf>
- [9] XU Wei-Ming, YUAN Li-Yin, LIN Ying, *et al.* Analysis of background irradiation in thermal IR hyper-spectral imaging systems [J]. *Infrared Tech. and Appli.* XXXVI, 7660: 76602H(2010).
- [10] ZHU Yang, ZHANG Xin, LIU Tao, *et al.* Internal and external stray radiation suppression for LWIR catadioptric telescope using non-sequential ray tracing [J]. *Infrared Phys. Techn.*, 71:163-170(2015).
- [11] Pravdivtsev A V, Akram M N. Simulation and assessment of stray light effects in infrared cameras using non-sequential ray tracing [J]. *Infrared Phys. Techn.*, 60: 306-311 (2013).
- [12] CHANG Song-Tao, SUN Zhi-Yuan, ZHANG Yao-Yu, *et al.* Internal stray radiation measurement for cooled infrared imaging systems [J]. *Acta Phys.Sin* (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. **物理学报**), 2015, **64**(5):050702.
- [13] TIAN Qi-Jie, CHANG Song-Tao, LI Zhou, *et al.* A method to measure internal stray radiation of cryogenic infrared imaging systems under various ambient temperatures [J]. *Infrared Phys. Techn.*, 2017, **81**:1-6.
- [14] LV You, HE Xin, WEI Zhong-Hui, *et al.* Ambient temperature-independent dual-band mid-infrared radiation thermometry [J]. *Appl. Optics*, 2014, **53** (27) : 6274-6279.