

文章编号 1004-924X(2014)08-2054-07

## 1 m 口径红外测量系统的辐射定标

李 宁\*, 张云峰, 刘春香, 曹立华, 郭立红  
(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了测量空中目标的红外辐射特性, 设计了一套 1 m 口径红外测量系统的辐射定标装置。给出了红外测量系统辐射定标的数学模型, 以腔型黑体和平行光管组合作为标准辐射源, 建立了 1 m 口径红外测量系统的辐射定标系统。考虑该红外测量系统的光谱响应具有选择性, 若采用传统辐射定标方法易产生原理误差, 故提出了一种基于光栅单色仪和标准辐射计的相对光谱标定方法。给出了该标定方法的数学模型并进行了相对光谱标定。最后, 在外场以黑体作为模拟目标进行了辐射特性测量实验。结果表明, 应用本文提出的辐射定标方法, 1 m 口径红外测量系统的辐射特性测量误差最大值为 9.5%, 比传统方法平均减少了约 8.7%, 可满足实际项目指标要求, 非常适合外场辐射定标的应用。

**关键词:** 红外测量系统; 辐射特性; 辐射定标; 光谱响应; 单色仪

**中图分类号:** TN216; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142208.2054

## Calibration of 1 m aperture infrared theodolite

LI Ning\*, ZHANG Yun-feng, LIU Chun-xiang, CAO Li-hua, GUO Li-hong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: ningli521@qq.com

**Abstract:** To measure infrared radiation characteristics of air targets, the calibration system for a 1 m aperture infrared measurement system was designed. A mathematic model of calibration for the infrared measurement system was given and a radiometric calibration system was established by combinations of a cavity blackbody and a collimator as the standard radiation source. Because the spectral response of the infrared measuring system is selective, the calibration principle based on conventional radiometric calibration method has theoretical errors and reduces the precision of radiometric calibration. To solve the problem, a relative spectral calibration method based on a monochromator and a standard radiometer was proposed. The mathematical model was given and a relative spectral calibration was performed. Finally, the experiments on radiation characteristic measurement were performed in the field by using the blackbody as a simulated target. The results show that the measurement max error from the 1 m aperture infrared radiation characteristic measurement system is 9.5% and improves by an average of 8.7% as compared with that of the conventional method. These show that the proposed method meets the requirements of practical applications and is suitable for the radiometric calibration in the out-fields.

收稿日期: 2013-08-05; 修订日期: 2013-10-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61036015)

**Key words:** infrared measuring system; radiation characteristics; radiation calibration; spectral response; monochromator

1 引 言

空间目标的红外辐射特性数据受到了越来越多的重视,国内外靶场测量中,主要使用由光学系统和红外探测器组成的地基红外测量系统进行辐射特性测量,光学系统将目标成像到红外探测器的表面,再经红外探测器转换为代表目标能量分布的红外数字图像。要想从目标的红外数字图像得到目标的红外辐射特性数据,通常需要做红外测量系统的辐射定标、传输路径的大气影响修正和目标辐射特性分析三项工作。其中,红外测量系统辐射定标的目的为:建立红外测量系统输入红外辐射量与测量数据间的绝对关系,从目标的红外图像得到目标进入到测量系统的红外辐射量,即入瞳辐射量;大气传输修正的目的为:确定目标与红外测量系统路径上的大气传输修正参数,从目标的入瞳辐射量反演得到远处目标发出的表观辐射量;目标特性分析的目的为:确定目标的发射率等参数,从目标的表观辐射量得到目标的真实辐射量,从而得到目标的温度等信息<sup>[1-2]</sup>。

在上述三项工作中,红外测量系统的辐射定标是基础性工作,是决定目标红外辐射特性测量总体精度的关键环节。目前,在靶场辐射特性测量中,一般将红外光学系统和测量器看作一个整体,并假设整个系统的光谱响应在测量器响应的波段内为一个等效常数,采用面源黑体直接覆盖红外测量系统的入瞳和视场的方法进行绝对辐射定标,得到整个红外测量系统的辐射响应度函数。但是由于红外测量系统的光学有效口径达 1 m,根据辐射定标的要求,标准源的口径要大于 1 m,即采用口径 1 m 以上的面源黑体作为标准源。目前,由制造工艺等因素产生的温度误差和温度均匀性误差都比较高,很难满足系统对辐射定标精度的要求。此外,由于大面源黑体在低温段的密封,很难克服表面结霜问题(导致发射率变化),同时在密封条件下非常不便于与设备进行对接。因此本课题组采用了腔型黑体与平行光管组合的辐射定标方法<sup>[3]</sup>。同时,由于红外光学系统和探测器的光谱选择性,他们在响应波段内的光谱响

应系数不是一个常数,采用上述假设,会引入辐射定标的原理误差,因此本文在给出 1 m 口径红外测量系统辐射定标模型的基础上,提出了使用相对光谱响应函数对辐射定标进行优化的方法,并详细介绍了系统相对光谱响应标定的数学模型与流程,得到了 1 m 口径红外测量系统的相对光谱响应函数。最后,通过外场辐射特性测量实验,对本文的优化方法进行了验证和分析。

2 系统辐射定标模型

本文的红外测量系统口径为 1 m,为了满足辐射定标的全视场、全口径和端对端的要求,本文采用腔型黑体与平行光管组合定标的方法<sup>[4]</sup>,定标原理如图 1 所示。

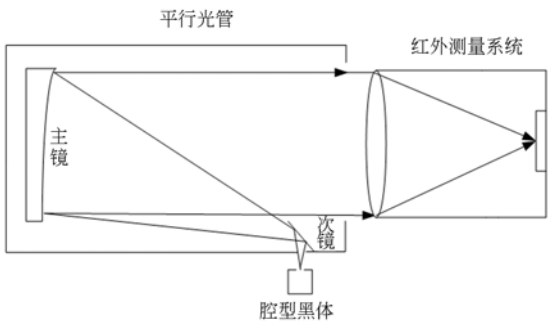


图 1 腔型黑体与平行光管组合定标的原理图  
Fig. 1 Schematic of cavity blackbody and collimator combination calibration

如图 1 所示,腔型黑体发出的红外辐射经过平行光管次镜和主镜准直后,覆盖红外测量系统的入瞳;当平行光管的出光口径大于红外测量系统的口径时,就满足了辐射定标的要求。腔型黑体的指标如表 1 所示。

表 1 腔型黑体指标  
Tab. 1 Parameters of cavity blackbody

| 技术参数   | 参数值       |
|--------|-----------|
| 有效辐射面积 | φ80 mm    |
| 温度     | -60~600 ℃ |
| 发射率    | ≥0.99     |
| 温度均匀性  | ≤±0.1 ℃   |
| 温度精度   | ≤±0.1 ℃   |

平行光管是输出平行光的光学设备。放置在其焦平面位置的目标,经过准直后输出平行光,用来模拟无穷远处的目标,其主要的性能指标如表 2 所示。

表 2 平行光管技术参数

Tab. 2 Parameters of collimator

| 参数    | 指标                   |
|-------|----------------------|
| 结构形式  | 离轴抛物面                |
| 有效口径  | 1 100 mm             |
| 焦距    | 7 000 mm             |
| 工作波段  | 0.4~20 $\mu\text{m}$ |
| 透过率   | 0.88                 |
| 背景辐射  | 0.342                |
| 辐射均匀性 | <0.3%                |

本文采用的测量系统的焦距为 2 m,根据腔型黑体的有效发射面积和平行光管的焦距,得到黑体有效发射腔面在测量系统焦平面处的成像面积为 17 592.9  $\text{mm}^2$ ,中波红外探测器的靶面约为 204.8  $\text{mm}^2$ ,满足覆盖所有像元的要求。腔型黑体和平行光管组合输出的光谱辐亮度计算公式为:

$$L_{\lambda T} = \frac{\epsilon \tau_c}{\pi} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} d\lambda + L_g, \quad (1)$$

其中:  $L_{\lambda T}$  为温度为  $T$  时的黑体经过平行光管准直后的光谱辐亮度;  $\epsilon$  为黑体发射率;  $\tau_c$  为平行光管的透过率;  $L_g$  为平行光管产生的背景辐射;  $T$  为黑体工作温度;  $C_1$  和  $C_2$  为常数。从式(1)可以看出,腔型黑体与平行光管组合后的等效辐亮度的精度主要取决于黑体的发射率、平行光管的透过率和背景辐射的精度。这些参数经过精密标定,因此这种组合方式的等效辐亮度的精度满足要求。在假设红外测量系统传感器的响应度为线性的前提下,将红外测量系统作为一个整体(不考虑其中某单元的精度传递情况),其总辐射响应度函数模型为:

$$DN = K \Omega_s A_d \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda T} R_\lambda d\lambda + DN_0 = a_e L_e + DN_0, \quad (2)$$

其中:  $DN$  为红外测量系统的输出值;  $K$  和  $DN_0$  是线性模型下系统的响应度和偏置(红外探测器暗电流、红外测量系统自身热辐射等引起);  $\Omega_s$  和  $A_d$  分别为红外测量系统的瞬时视场角和入瞳面积;  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  是光学系统的光谱响应范围,本系统为中波红外测量系统,响应光谱约为 3.2~5  $\mu\text{m}$ ;

$\varphi$  为探测器接收的辐射通量;  $R_\lambda$  为光谱响应系数,  $a_e = K \Omega_s A_d$  为考虑光谱响应的等效响应度,  $L_e$  为光谱等效辐亮度。通常情况下,如果假设光谱响应系统在红外测量系统的光谱范围内为一常数  $R_e$ ,则有:

$$DN = K \Omega_s A_d R_e \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda T} d\lambda + DN_0 = a L_T + DN_0, \quad (3)$$

其中:  $a = K \Omega_s A_d R_e$  为忽略系统光谱响应时的系统等效响应度;  $L_T = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda T} d\lambda$  是温度  $T$  下的黑体辐亮度;  $DN_0$  为偏置。在上述假设前提下,系统辐射定标的目的就是要确定红外测量系统的响应度  $a$  和偏置  $DN_0$ 。通过不同温度的腔型黑体得到不同的  $L_T$ ,存储相应的红外数字图像可以得到对应的  $DN$  值,然后通过回归分析等数学方法拟合得到红外测量系统的辐射响应度函数<sup>[5]</sup>。

但是,由于红外探测器和红外光学系统的光谱选择性,红外测量系统的光谱响应系数  $R_\lambda$  在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  内不是一个常数,则式(3)的假设会引入原理误差,影响辐射定标的精度。针对这个问题,本文提出了一种相对光谱响应标定方法,按照式(2)对辐射定标进行优化处理。

### 3 相对光谱定标算法

本文采用比对测量法对红外测量系统的相对光谱响应进行标定,其原理如图 2 所示。

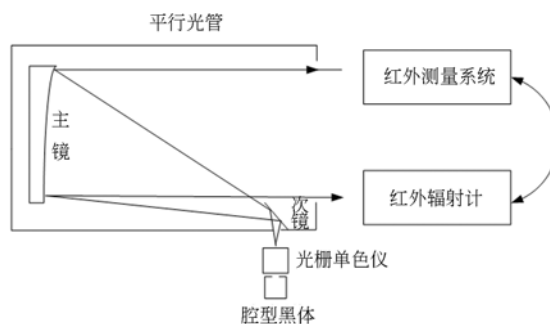


图 2 测量系统光谱定标原理图

Fig. 2 Schematic of spectral calibration for measuring system

如图 2 所示,腔型黑体输出的红外辐射经过红外单色仪后输出单色光,单色光经平行光管准直后输出单色平行光。首先调整光栅单色仪的输

出波长,然后设定黑体温度。等黑体稳定后,分别用红外测量系统和红外辐射计测量输出相同波段的单色光,得到红外测量系统和红外辐射计的输出值。最后以红外辐射计为基准,通过比对得到红外测量系统的相对光谱响应曲线。下面分别给出了红外测量系统和红外辐射计单色辐射的响应函数,然后给出了红外测量系统相对光谱函数的计算方法<sup>[6]</sup>。

### 3.1 红外测量系统的单色辐射响应函数

根据红外测量系统辐射响应度的数学模型,在测量平行光管输出的单色辐射时,红外测量系统输出的数字值与黑体辐射之间的关系式为<sup>[7]</sup>:

$$DN_z = K\Omega_s A_d \left( \int_{\lambda_0 - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda_0 + \frac{\Delta\lambda}{2}} L_{T\lambda} R_z(\lambda_0) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_m R_z(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_c R_z(\lambda) d\lambda + DN_0 \right), \quad (4)$$

其中: $\lambda_0$ 为单色仪的工作波长,带宽为 $\Delta\lambda$ ,单色仪输出的有效辐射波段为 $[\lambda_0 - \Delta\lambda/2, \lambda_0 + \Delta\lambda/2]$ ;  $L_{T\lambda}$ 为黑体温度为 $T$ 时经单色仪和平行光管准直后产生的有效辐射; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为红外系统的工作波段; $R_z(\lambda)$ 为红外系统的绝对光谱响应度; $L_m(\lambda)$ 为单色仪引起的背景辐射; $L_c(\lambda)$ 为平行光管引起的背景辐射; $DN_0$ 为红外测量系统自身辐射和探测器暗电流噪声等引起的输出偏置值。在测量过程中,如保证环境、单色仪、平行光管温度稳定,则可以认为背景的辐射量 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_m R_z(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_c R_z(\lambda) d\lambda$ 为常数,则有:

$$DN_z = aR_z(\lambda_0) L_s(\Delta\lambda) + DN_z, \quad (5)$$

其中: $L_s(\Delta\lambda) = \int_{\lambda_0 - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda_0 + \frac{\Delta\lambda}{2}} L_{T\lambda} R_z(\lambda) d\lambda$ ,为黑体经过单色仪和平行光管输出的辐射量,  $R_z(\lambda_0)$ 为波长为 $\lambda_0$ 的光谱响应系数。将黑体设置在不同的工作温度 $T_1, T_2$ 下,红外系统对红外单色照明光管测量得到:

$$DN_{z,1} = aR_z(\lambda_0) L_{s,1}(\Delta\lambda) + DN_z, \quad (6)$$

$$DN_{z,2} = aR_z(\lambda_0) L_{s,2}(\Delta\lambda) + DN_z. \quad (7)$$

两式相减可得:

$$DN_{z,1} - DN_{z,2} = aR_z(\lambda_0) [L_{s,1}(\Delta\lambda) - L_{s,2}(\Delta\lambda)]. \quad (8)$$

### 3.2 红外辐射计的单色辐射响应函数

在利用红外辐射计测量单色仪输出的辐射

时,其输出的数据关系式与红外测量系统的测量结果基本相同,只是此时为红外辐射计的系统辐射响应函数,其表达式为:<sup>[8]</sup>

$$DN_r = a_r R_r(\lambda_0) L_s(V\lambda) + DN_r, \quad (9)$$

其中: $a_r$ 和 $DN_r$ 为红外辐射计的辐射响应函数的增益和偏置系数, $R_r(\lambda_0)$ 为红外辐射计在波长 $\lambda_0$ 处的光谱响应系数。同样将黑体设置在不同工作温度 $T_1, T_2$ 下,红外辐射计对红外单色照明光管测量得到:

$$DN_{r,1} = R_r(\lambda_0) L_{s,1}(\Delta\lambda) + DN_r, \quad (10)$$

$$DN_{r,2} = R_r(\lambda_0) L_{s,2}(\Delta\lambda) + DN_r. \quad (11)$$

两式相减可得:

$$DN_{r,1} - DN_{r,2} = a_r R_r(\lambda_0) [L_{s,1}(\Delta\lambda) - L_{s,2}(\Delta\lambda)]. \quad (12)$$

### 3.3 相对光谱函数计算

由式(8)、式(12)可得红外测量系统的绝对光谱响应为:

$$R_z(\lambda_0) = \left( \frac{DN_{z,1} - DN_{z,2}}{DN_{r,1} - DN_{r,2}} \right) \left( \frac{a_r}{a_z} \right) R_r(\lambda_0), \quad (13)$$

其中: $DN_{z,1}$ 和 $DN_{z,2}$ 为红外测量系统不同黑体温度下的输出值, $DN_{r,1}$ 和 $DN_{r,2}$ 为红外辐射计在不同黑体温度下输出的数字值; $a_r/a_z$ 在红外测量系统和红外辐射计稳定的前提下为一常数,因此有:

$$bR_z(\lambda_0) = \left( \frac{DN_{z,1} - DN_{z,2}}{DN_{r,1} - DN_{r,2}} \right) R_r(\lambda_0), \quad (14)$$

其中: $b = a_z/a_r$ 为一常数。同时为了消除在试验过程中由于环境和系统自身温度变化等因素引起的随机噪声,将黑体设置在 $n$ 个工作温度 $T_1, T_2, \dots, T_n$ 下,根据式(14),对于波长 $\lambda_0$ 可得到 $n-1$ 个响应度 $bR_{z,1}(\lambda_0), bR_{z,2}(\lambda_0), \dots, bR_{z,n-1}(\lambda_0)$ ,然后取这 $n-1$ 个值的均值作为红外测量系统在波长 $\lambda_0$ 的响应度:

$$bR_z(\lambda_0) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} bR_{z,i}(\lambda_0)}{n-1}. \quad (15)$$

改变红外单色仪的工作波长,重复以上过程得到红外辐射计在不同波长 $\lambda$ 的响应度 $bR_z(\lambda)$ 。假定红外辐射计的光谱响应度在峰值波长 $\lambda_{\max}$ 处具有最大值 $R_z(\lambda_{\max})$ ,则利用 $R_z(\lambda_{\max})$ 对响应度 $R_z(\lambda)$ 进行归一化,得到红外系统归一化的相对光谱响应度:

$$R_z^*(\lambda) = \frac{bR_z(\lambda)}{bR_z(\lambda_{\max})}. \quad (16)$$

由上述红外测量系统相对光谱定标的数学模

型可知,要得到红外测量系统的绝对光谱响应,首先要知道红外辐射计的绝对光谱响应  $R_i(\lambda)$ 。由于本文要计算红外测量系统的相对光谱响应,因此只需知道红外辐射计的相对光谱响应  $R_i^*(\lambda)$  即可<sup>[9-10]</sup>。

4 相对光谱定标试验

4.1 红外辐射计

本文采用的红外辐射计已经通过在红外波段无选择性的热释电探测器和单色红外辐射源进行绝对光谱响应标定,因此只需在所需波段内(3 200~5 000 nm)对此数据进行归一化处理,得到在此波段内的相对光谱响应如图 3 所示。

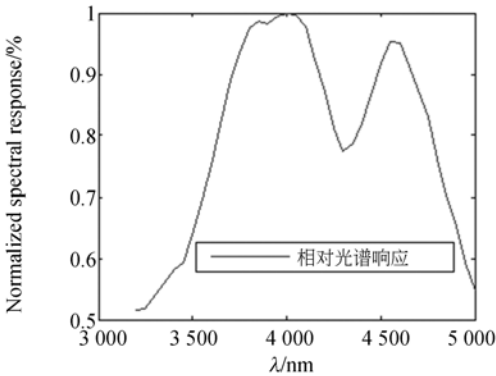


图 3 红外辐射计归一化相对光谱响应度曲线

Fig. 3 Normalized spectral response curve of infrared radiometer

4.2 光栅单色仪

本文选用三光栅扫描单色仪,其光路如图 4 所示。

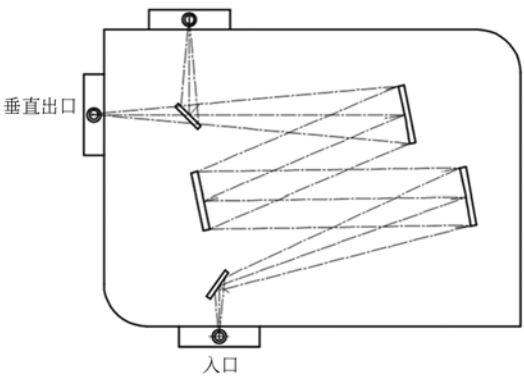


图 4 单色仪的光路图

Fig. 4 Optical path of monochromator

如图 4 所示,该光栅单色仪采用非对称水平光路,可有效地消除彗差,保证谱线的对称,提高光学分辨率;同时具有消除二次散射的设计,可很好地抑制杂散光,其有效出光狭缝高为 14 mm,宽为 10 μm~3 mm 可调。其性能参数如表 3 所示。

表 3 光栅单色仪性能参数

Tab. 3 Parameters of monochromator

| 属性  | 数值             |
|-----|----------------|
| 光谱  | 2 600~8 000 nm |
| 线色散 | 21.6 nm/mm     |
| 准确度 | 1.6 nm         |
| 重复性 | 0.8 nm         |
| 分辨率 | 0.8 nm         |

4.3 相对光谱定标结果

根据 3 节中的红外测量系统的相对光谱定标算法,利用红外辐射计和光栅单色仪进行红外测量系统的相对光谱标定实验,试验结果如表 4 和图 5 所示。

表 4 归一化相对光谱响应度数据

Tab. 4 Data of normalized spectral response

| 波长<br>/nm | 响应度      | 波长<br>/nm | 响应度      | 波长<br>/nm | 响应度                   |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|-----------------------|
| 3 320     | 0.002 46 | 3 920     | 0.957 33 | 4 520     | 0.495 52              |
| 3 350     | 0.002 46 | 3 950     | 0.949 37 | 4 550     | 0.490 27              |
| 3 380     | 0.003 03 | 3 980     | 0.944 82 | 4 580     | 0.464 44              |
| 3 410     | 0.006 57 | 4 010     | 0.918 44 | 4 610     | 0.427 23              |
| 3 440     | 0.017 17 | 4 040     | 0.856 81 | 4 640     | 0.387 77              |
| 3 470     | 0.048 84 | 4 070     | 0.755 68 | 4 670     | 0.343 18              |
| 3 500     | 0.109 88 | 4 100     | 0.652    | 4 700     | 0.298 82              |
| 3 530     | 0.197 63 | 4 130     | 0.543 55 | 4 730     | 0.251 44              |
| 3 560     | 0.296 57 | 4 160     | 0.445 83 | 4 760     | 0.203 39              |
| 3 590     | 0.394 15 | 4 190     | 0.368 64 | 4 790     | 0.159 91              |
| 3 620     | 0.500 82 | 4 220     | 0.313 36 | 4 820     | 0.120 62              |
| 3 650     | 0.607 9  | 4 250     | 0.272 15 | 4 850     | 0.089 66              |
| 3 680     | 0.717 32 | 4 280     | 0.241 46 | 4 880     | 0.062 11              |
| 3 710     | 0.824 33 | 4 310     | 0.224 49 | 4 910     | 0.039 31              |
| 3 740     | 0.902 79 | 4 340     | 0.244 68 | 4 940     | 0.021 51              |
| 3 770     | 0.967 6  | 4 370     | 0.296 08 | 4 970     | 0.009 4               |
| 3 800     | 1        | 4 400     | 0.352 98 | 5 000     | 0.002 98              |
| 3 830     | 0.992 5  | 4 430     | 0.407 82 | 5 030     | 6.11×10 <sup>-4</sup> |
| 3 860     | 0.981 67 | 4 460     | 0.457 1  | 5 060     | 1.42×10 <sup>-4</sup> |
| 3 890     | 0.960 81 | 4 490     | 0.489 92 | 5 090     | 5.58×10 <sup>-5</sup> |

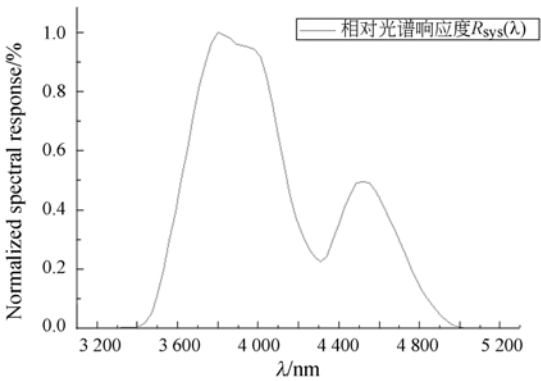


图 5 红外测量系统的相对光谱响应度曲线

Fig. 5 Spectral response curve of infrared measuring system

5 辐射特性测量实验及结果分析

应用传统的辐射定标方法和本文的相对光谱辐射定标方法,分别对 1 m 口径红外测量系统进行辐射定标,然后应用辐射定标结果在外场进行了辐射特性比较试验。以面源黑体作为模拟目标,用 1 m 口径红外测量系统对它进行测量,存储面源黑体的红外图像,然后利用辐射定标的结果进行反演计算,得到模拟目标的辐亮度。辐射特性测量试验的示意图如图 6 所示。

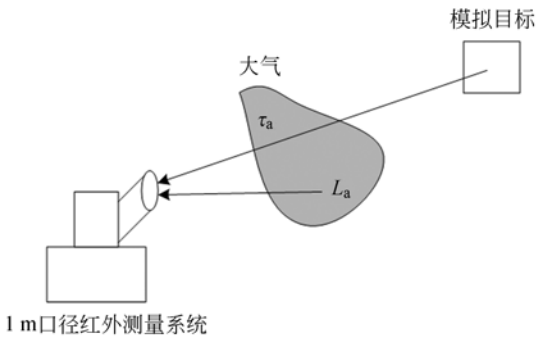


图 6 辐射特性测量试验原理图

Fig. 6 Schematic of radiation characteristic measurement

模拟目标(面源黑体)放置在距离测量系统 1.5 km 的远处,用红外测量系统对它进行测量,利用 MODTRAN 软件和当时的大气环境参数计算得到大气透过率和程辐射分别为:  $\tau_a=0.78$  和  $L_a=1.234$ 。分别应用传统辐射定标方法和相对光谱定标法的系统辐射响应函数,从目标红外图

像数据得到 1 m 口径红外测量系统的入瞳辐亮度  $L_o$ ,然后利用大气传输修正参数进行目标辐亮度反演计算,得到目标的辐亮度  $L_R^{[11]}$ 。

$$L_R=(L_o-L_a)/\tau_a. \tag{17}$$

试验得到的红外图像数据如图 7 所示,结果分析如表 5 所示。

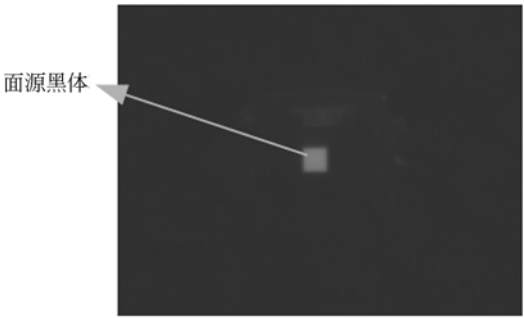


图 7 辐射特性测量试验红外图像

Fig. 7 Image of radiation characteristic measurement

表 5 辐射特性测量试验结果分析

Tab. 5 Result analysis of radiation characteristic measurement

| 黑体<br>温度/℃ | 真实辐亮度<br>/(W·Sr <sup>-1</sup> ) | 传统方法反演辐<br>亮度(误差/%) | 本文方法反演辐<br>亮度(误差/%) |
|------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| 40         | 2.935                           | 2.580(12.1)         | 2.797(4.7)          |
| 50         | 4.064                           | 3.483(14.3)         | 3.828(5.8)          |
| 60         | 5.526                           | 4.758(13.9)         | 5.239(5.2)          |
| 70         | 7.389                           | 6.222(15.8)         | 7.027(4.9)          |
| 80         | 9.729                           | 7.910(18.7)         | 9.067(6.8)          |
| 90         | 12.630                          | 10.432(17.4)        | 11.569(8.4)         |
| 100        | 16.184                          | 13.239(18.2)        | 14.647(9.5)         |

由表 5 可知,传统辐射定标方法得到的目标辐亮度的反演误差最大值为 18.2%,而本文优化方法得到的目标辐亮度的反演误差最大值为 9.5%,精度提高了 8.7%。

6 结 论

本文以腔型黑体与平行光管组合为标准红外辐射源,建立了 1 m 口径红外测量系统的辐射定标装置,提出使用光栅单色仪与红外辐射计进行相对光谱定标的优化方法,并进行了相对光谱标定。最后,在外场利用标准面源黑体进行了辐射

特性测量实验。实验结果表明,在实验的环境条件下,本文方法的辐射特性测量精度优于 10%,

比传统辐射定标方法的精度明显提高,且本方法实现简单,非常适合于外场辐射定标的应用。

# 参考文献:

- [1] 杨林华,肖庆生,蒋山平. 红外遥感器辐射定标技术概述[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(1): 34-39.  
YANG L H, XIAO Q SH, JIANG SH P. An overview of the radiometric calibration facility for infrared sensors[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2013, 30(1): 34-39. (in Chinese)
- [2] 张鑫,贾宏光. 大相对孔径红外消热差物镜设计[J]. 中国光学, 2011, 4(4): 374-379.  
ZHANG X, JIA H G. Optical design of infrared athermalized objective with large relative aperture[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(4): 374-379. (in Chinese)
- [3] 李宁,杨词银,曹立华,等. 3~5  $\mu\text{m}$  红外焦平面阵列的辐射定标[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(10): 2319-2325.  
LI N, YANG C Y, CAO L H, *et al.*. Radiance calibration for 3~5  $\mu\text{m}$  infrared focal plane array[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2319-2325. (in Chinese)
- [4] 唐嘉,高昕. 靶场红外辐射特性测量系统标定方法研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S1): 266-270.  
TANG J, GAO X. Calibration method for infrared radiation characteristics measuring system of test range[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S1): 266-270. (in Chinese)
- [5] CHANG P, LI CH R, LI T M. Kinematic calibration and forecast error compensation of a 2-DOF planar parallel manipulator[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 24(6): 992-998.
- [6] 修吉宏,黄浦,李军,等. 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(6): 1365-1373.  
XIU J H, HUANG P, LI J, *et al.*. Radiometric calibration of large area array color CCD aerial mapping camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1365-1373. (in Chinese)
- [7] 王锐,王淑荣,郭劲,等. 高精度紫外标准探测器的定标[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(8): 1696-1703.  
WANG R, WANG SH R, GUO J, *et al.*. Calibration of high accuracy UV standard detector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1696-1703. (in Chinese)
- [8] YU L, LIN G Y, CHEN B. Study on the absolute spectral irradiation calibration method for far ultraviolet spectrometer in remote sensing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(1): 246-249.
- [9] 张晓龙,刘英,孙强. 高精度非制冷长波红外热像仪的辐射定标[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 235-241.  
ZHANG X L, LIU Y, SUN Q. Radiometric calibration of uncooled long-wave infrared thermal imager with high-precision[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 235-241. (in Chinese)
- [10] 曹立华,李宁,杨词银,等. 3~5  $\mu\text{m}$  红外探测器的辐射定标[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 858-864.  
CAO L H, LI N, YANG C Y, *et al.*. Radiance calibration for 3-5  $\mu\text{m}$  infrared detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 858-864. (in Chinese)
- [11] 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.  
YANG C Y, ZHANG J P, CAO L H. Infrared radiation measurement based on real-time correction [J]. *J. Infrared Millim. Wave*, 2011, 30(3): 284-288. (in Chinese)

# 作者简介:



李 宁(1983—),男,吉林白山人,助理研究员,主要从事红外图像处理以及红外辐射特性测量的研究。Email: ning-li521@qq.com



张云峰(1970—),男,吉林长春人,研究员,主要从事图像处理方面的工作。E-mail: zyfcicomp@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)