高温小目标红外辐射特性测量方法

田棋杰[1,2], 李 周[1,2], 常松涛[1], 何锋赟[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 目标的温度较高且距成像系统较远时,目标像在探测器靶面上占据多个像元且输出灰度易饱和,传统的点源目标和面源目标处理方法无法适用。针对上述问题,提出一种高温小目标辐射特性测量方法,并通过外场实验验证了该方法的有效性。首先,建立测量系统的高温定标模型,并修正平行光管透过率对定标模型的影响。然后,根据目标能量虽弥散到多个像元但到达探测器靶面的总能量不变的现象,提出一种针对高温小目标的辐射特性测量方法。最后,采用 Φ600 mm 红外辐射特性测量系统进行外场高温小目标辐射测量实验。结果表明,考虑大气透过率和大气程辐射后,可以实现对远距离高温小目标较高精度的测量,验证了方法的有效性。

关键词 测量; 辐射特性; 辐射定标; 小目标; 红外成像系统

中图分类号 TN216 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1012004

Measurement Method of Infrared Radiometric Characteristics for High-Temperature Small Targets

Tian Qijie[1,2], Li Zhou[1,2], Chang Songtao[1], He Fengyun[1], Qiao Yanfeng[1]

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

[2] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract When the target is at high temperature and far from the imaging system, its image on the detector array occupies dozens of pixels and the output grayscale is easy to saturate. As a result, typical process methods for point-source target and extended-source target are not applicable any more. To overcome these problems, a measurement method is proposed measure high-temperature infrared small targets, and the effectiveness of the proposed method has been validated by experiments in the outfield. First of all, the radiometric calibration formula of measurement system in high temperature range is built, and the influence of the collimator transmittance on the calibration model is corrected. Then, according to the fact that the target energy diffuses dozens of pixels but the total energy that reaches the detector array remains unchanged, a measurement method is proposed to measure the characteristics of high-temperature infrared small targets. Finally, a Φ600 mm infrared radiation characteristic measurement system is employed to measure the radiation of high-temperature infrared small target in the outfield. Experimental results indicate that, in consideration of the atmospheric transmittance and path radiance, the proposed method can achieve high-accuracy measurement for remote high-temperature infrared small targets, and the effectiveness of the proposed method has been verified.

Key words measurement; radiometric characteristics; radiometric calibration; small targets; infrared imaging system

OCIS codes 120.5630; 010.5630; 110.3080; 040.2480

1 引 言

红外辐射特性测量是获取目标辐射亮度、温度以及辐射强度等信息的重要手段,其测量结果可以用于评价目标隐身效果、探测识别目标等[1]。依据目标在探测器靶面上所成像大小,目标一般分为面源目标和点源

收稿日期: 2017-04-24; **收到修改稿日期**: 2017-05-22

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

目标[2]。当目标与测量系统距离较近时，目标在探测器靶面上的成像范围较大，此时可以当作面源目标处理。当目标距离测量系统很远时，目标在探测器靶面上的理想成像范围小于单个像元尺寸，此时可以作为点源目标处理。但是在实际工程应用中，当目标距离测量系统较远时，其理想成像范围在探测器靶面上往往占据多个像元，此时目标不能简单地当作面源目标或者点源目标进行处理。此外，由于大气扰动、光学系统像差或者衍射等因素，目标成像较小时，成像能量会弥散到多个像元内，导致红外图像灰度值降低，且边缘会变得模糊，具体表现为一个弥散斑，此时如果采用传统的面源目标或者点源目标处理方法会引入较大的测量误差[3]。对此，该类目标必须作为小目标进行处理。所谓小目标是指目标成像面积较小、目标成像细节信息很少的一类目标。在实际应用中，当目标成像面积小于 80 个像元(即大约 9 pixel×9 pixel)时，目标必须作为小目标处理，传统的点源目标和面源目标处理方法不再适用[4-5]。

目前，关于小目标的研究主要关注两方面：1)小目标的识别跟踪监测，目的是及早发现和定位小目标。该方向的研究重点是通过各种图像处理算法从红外图像中及早发现定位小目标，以及在各种复杂背景(如海平面背景或者天空云背景等)下及时识别提取小目标[6-10]。2)小目标辐射特性测量，目的是获取小目标的辐射特性，如辐射亮度、温度等。该方面的研究主要是用于评价目标红外隐身特性、检验红外相机或者光学系统性能等[11]。当目标温度过高时，为保证测量精度，必须降低探测器积分时间，当最低积分时间依然无法满足动态范围要求时，需在光学系统中加入一片或者多片滤光片，对入射能量进行衰减。因此，高温小目标的测量方法与普通小目标的测量方法存在区别。

为实现高温小目标辐射特性的准确测量，必须对测量系统进行高温定标，并修正平行光管透过率对定标模型的影响。虽然目标能量会弥散到多个像元内，但是到达探测器靶面的总能量不变，在此基础上，本文提出一种高温小目标红外辐射特性测量方法，并利用 Φ600 mm 红外辐射特性测量系统进行外场远距离小目标成像实验，在考虑大气程辐射和透过率后，实验结果表明所提方法可以实现对高温小目标辐射特性较高精度的测量。

2　高温定标模型

2.1　考虑积分时间和滤光片透过率的定标模型

为获取红外探测器的响应和偏置，在测量前必须要对辐射测量系统进行定标，以建立入射辐亮度与探测器像元输出灰度之间的定量关系[12]。通常采取近距离扩展源法，即定标时将高精度的面源黑体放置于光学系统入瞳前，覆盖系统的全孔径和全视场。由于定标辐射源紧靠光学系统入瞳，大气程辐射和大气衰减的影响可以忽略不计[13]，典型近距离扩展源法的定标原理如图 1 所示。

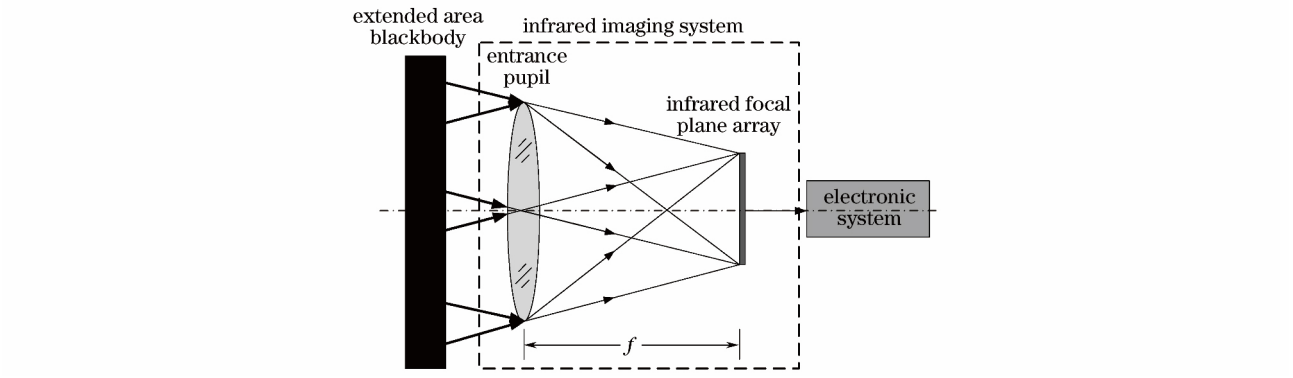


图 1　近距离扩展源法示意图

Fig. 1　Schematic of near-extended-source method

为拓展测量系统的动态范围，一般选取多个积分时间分别进行定标，在探测器线性响应范围内，像元输出灰度与入射辐亮度之间的关系可表示为[14]

$$h = t \cdot G_0 \cdot L_t + B, \tag{1}$$

式中 h 为像元的输出灰度值(DN)，G_0 为单位积分时间下像元对入射辐亮度的响应(DN·W^{-1}·sr·m^2)，

B 为像元偏置，t 为积分时间(ms)，L_t 为定标黑体辐射亮度。L_t 可以表示为[15]

$$L_t=\varepsilon\cdot L(T_t)=\frac{\varepsilon}{\pi}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}M(\lambda,T_t)\,\mathrm{d}\lambda,\tag{2}$$

式中 ε 为定标黑体发射率，$L(T_t)$ 为温度 T_t 的理想黑体辐射亮度，$\lambda_1\sim\lambda_2$ 为探测器工作波段范围，$M(\lambda,T_t)$ 为理想黑体辐出射度，可由普朗克公式计算得到。

对于探测器靶面上的某个像元，其接收到的入射辐通量可表示为[16]

$$\Phi_t=\frac{\pi\cdot\varepsilon\cdot\tau_{opt}}{4}\cdot\left(\frac{D}{f}\right)^2\cdot A_d\cdot L(T_t)=K_t\cdot L(T_t),\tag{3}$$

式中 τ_{opt} 表示光学系统透过率，D 表示光学系统口径，f 表示光学系统焦距，A_d 表示探测器像元尺寸，$K_t=\pi\cdot\varepsilon\cdot\tau_{opt}\cdot(D/f)^2\cdot A_d/4$。因此，单位积分时间下探测器像元对入射辐通量的响应系数可表示为：$G_0'=G_0/K_t$。

由于面源黑体的温度范围有限，近距离扩展源法主要用于低温范围对测量系统进行定标。定标公式中的偏置主要是由光学系统内部杂散辐射即自身辐射和探测器自身偏置引起的，具体可表示为[17-18]

$$B=t\cdot G_0'\cdot\Phi_{stray}+h_{det}(t),\tag{4}$$

式中 Φ_{stray} 表示红外光学系统自身辐射通量，$h_{det}(t)$ 表示探测器像元内部因素(如暗电流等)引起的自身偏置。

当目标温度较高时，为保证测量精度，探测器输出灰度不能饱和。当探测器最低积分时间仍无法满足动态范围要求时，必须在光路中加入一定透过率的红外中性(ND)滤光片，对入射能量进行固定倍率的衰减[19]。为实现高温目标测量，测量系统必须也在高温范围进行定标。

对于大口径辐射测量系统，由于大面源黑体温度范围有限，高温定标必须采用高温腔型黑体经平行光管扩束后进行定标。加入滤光片后，测量系统的定标模型可表示为[20]

$$h=t\cdot\tau_{collmiator}\cdot\tau_{filter}\cdot G_0\cdot L_t+t\cdot\tau_{filter}\cdot G_0'\cdot\Phi_{stray}+t\cdot G_0'\cdot\Phi_{filter}+h_{det}(t),\tag{5}$$

式中 $\tau_{collmiator}$ 表示平行光管透过率，τ_{filter} 表示红外中性滤光片透过率，Φ_{filter} 表示红外中性滤光片自身辐射。

2.2　高温定标模型修正

由定标公式(5)式可知，在高温范围定标时，由于平行光管实际透过率小于 1，会对目标测量产生影响，因此必须对定标模型进行修正。为获取平行光管的实际透过率，分别采用近距离扩展源法和平行光管法在同一积分时间和滤光片档位下进行定标，获取两个定标方程响应率，两者相除即可得到平行光管的实际透过率，具体过程如下：

1) 采用平行光管法，选取探测器积分时间为 t_0，滤光片透过率为 τ_{filter}，此时系统定标方程可表示为

$$h_1=G_1\cdot L_t+B_1=t_0\cdot\tau_{collmiator}\cdot\tau_{filter}\cdot G_0\cdot L_t+B_1。\tag{6}$$

2)采用近距离扩展源法，选取相同的积分时间和滤光片档位，此时系统的定标方程可表示为

$$h_2=G_2\cdot L_t+B_2=t_0\cdot\tau_{filter}\cdot G_0\cdot L_t+B_2。\tag{7}$$

3)联立(6)式和(7)式，得到平行光管的实际透过率为

$$\tau_{collmiator}=G_1/G_2。\tag{8}$$

因此，任意积分时间和滤光片透过率下，修正后的测量系统高温定标模型可表示为

$$h=t\cdot\tau_{G_1/G_2}\cdot\tau_{filter}\cdot G_0\cdot L_t+t\cdot\tau_{filter}\times G_0'\cdot\Phi_{stray}+t\cdot G_0'\cdot\Phi_{filter}+h_{det}(t)。\tag{9}$$

3　高温小目标辐射特性测量方法

3.1　小目标成像过程及特点

传统的点源目标测量方法仅能处理目标成像范围在一个像元内的情况，当目标能量弥散到多个像元内时，传统点源处理方法不再适用。为实现对高温小目标辐射特性的准确测量，必须研究小目标的成像过程和特点。

与点源目标和面源目标成像特点不同，小目标在探测器靶面上的理想成像范围会占据很小的区域，如几个至几十个像元。但是在实际应用中，由于大气抖动、光学系统成像像差或者衍射等因素，目标的能量会弥

散到更多的像元内。因此，小目标实际成像范围会大于其理想成像大小，且没有清晰的边缘。如图 2 所示，理想情况下，小目标在靶面上成像的大小应为图 2(a)所示，但是目标能量经过弥散后在靶面上的实际成像效果可能为图 2(b)所示。此时能量的弥散会影响测量精度，必须进行计算消除。为准确计算小目标辐射特性，需获取目标到达探测器的全部能量，并且消除能量弥散对测量精度的影响。对此，提出了一种针对高温小目标的辐射测量方法。

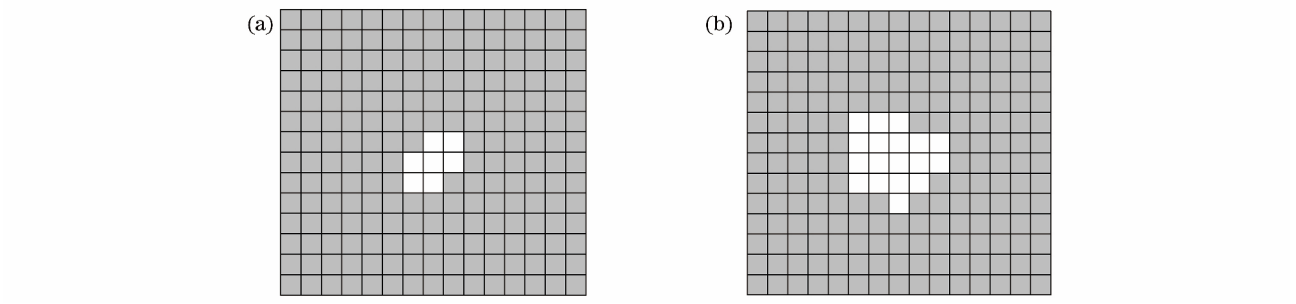


图 2　小目标成像示意图。(a)理想成像大小；(b)实际成像大小

Fig. 2　Schematic of small target imaging. (a) Ideal imaging size; (b) actual imaging size

3.2　小目标辐射测量方法

为实现对小目标辐射特性的准确测量，必须获取目标到达探测器靶面的总能量。研究对小目标的处理方法如图 3 所示。在目标成像范围选取区域 A_1，保证 A_1 包含目标成像的所有像元。由于在 A_1 内包含目标和背景两部分能量，为准确获取目标能量，必须排除背景的影响。A_1 外围再选取区域 A_2，A_2 区域内不包含目标的能量，仅包括背景。假设 A_1 内包括像元数为 N_1，A_2 内包含像元数为 N_2-N_1。

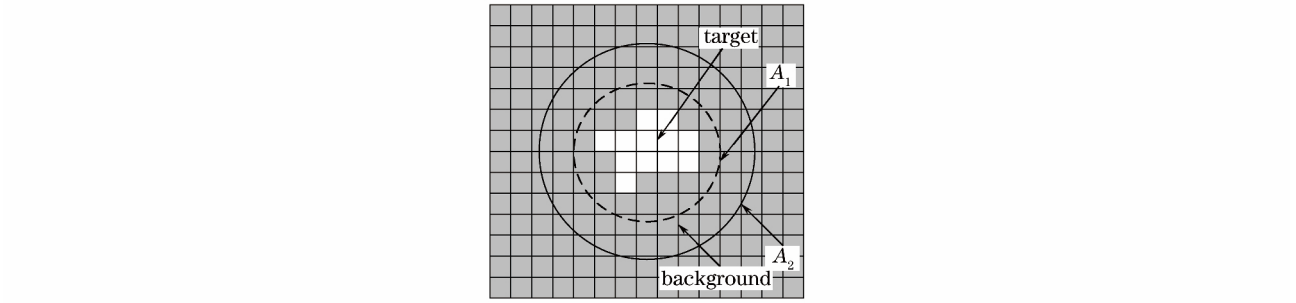


图 3　红外小目标处理方法示意图

Fig. 3　Schematic of handling the infrared small target

由区域 A_2 可以计算得到背景的平均灰度值为

$$h_{\text{background}}=\frac{\sum_{i=1}^{N_2-N_1}h_i}{N_2-N_1},\tag{10}$$

式中，h_i，$i=1,2,\cdots,N_2-N_1$ 表示背景区域各像元输出灰度值。设目标成像的理想像面积大小为 A_i，由几何光学物像关系可得：

$$A_i=M^2\cdot A_{\text{t}}=\left(\frac{f}{l_1-f}\right)^2\cdot A_{\text{t}},\tag{11}$$

式中，M 表示系统放大率，l_1 表示目标与成像系统的距离，A_{t} 表示目标实际面积大小。则 A_1 区域内背景占据的像元数目为 $(N_1\cdot A_{\text{d}}-A_i)/A_{\text{d}}$，其中 A_{d} 表示探测器单个像元面积。

在实际应用中，目标距离成像系统较远，目标与测量系统间的大气对于测量精度会产生影响，必须计算消除。设大气透过率为 τ_{atm}，大气程辐射为 L_{path}，则像元输出灰度为

$$h=\tau_{\text{atm}}\cdot G\cdot L_{\text{t}}+G\cdot L_{\text{path}}+B。\tag{12}$$

区域 A_1 内所有像元的总灰度为 $\sum_{i=1}^{N_1}h_i$，其中背景引起的总灰度值为

$$h_{\text{sum,background}}=\frac{N_1\cdot A_{\text{d}}-M^2\cdot A_{\text{t}}}{A_{\text{d}}}\cdot h_{\text{background}}。\tag{13}$$

目标引起的总灰度值为

$$h_{\text{sum,target}}=\frac{M^2\cdot A_{\text{t}}}{A_{\text{d}}}(\tau_{\text{atm}}\cdot G\cdot L_{\text{target}}+G\cdot L_{\text{path}}+B)。\tag{14}$$

由 A_1 区域内总灰度相等可得到等式：

$$\sum_{i=1}^{N1}h_i=h_{\text{sum,background}}+h_{\text{sum,target}}=$$
$$\frac{N_1\cdot A_{\text{d}}-M^2\cdot A_{\text{t}}}{A_{\text{d}}}\cdot h_{\text{background}}+\frac{M^2\cdot A_{\text{t}}}{A_{\text{d}}}\cdot(\tau_{\text{atm}}\cdot G\cdot L_{\text{target}}+G\cdot L_{\text{path}}+B)。\tag{15}$$

因此，由(15)式可以得到目标辐射亮度，表示为

$$L_{\text{target}}=\frac{A_{\text{d}}\cdot\sum_{i=1}^{N1}h_i-(N_1\cdot A_{\text{d}}-M^2\cdot A_{\text{t}})\cdot h_{\text{background}}-(G\cdot L_{\text{path}}+B)\cdot M^2\cdot A_{\text{t}}}{\tau_{\text{atm}}\cdot G\cdot M^2\cdot A_{\text{t}}},\tag{16}$$

式中，G 和 B 由修正后的高温定标模型得到，M 和 A_{d} 均为已知量，L_{path} 和 τ_{atm} 可以由相关软件（如 MODTRAN）计算得到，$\sum_{i=1}^{N1}h_i$ 可以由红外图像直接读取，$h_{\text{background}}$ 可由(10)式计算得到，目标理想像大小可以由(11)式得到。至此，目标辐射特性测量相关计算参数均已得到，代入(16)式即可得到相应的测量结果。

4　高温小目标辐射测量实验

为验证测量方法的有效性，采用 Φ600 mm 辐射特性测量系统进行高温小目标外场测量实验。系统焦距为 1200 mm，F 数为 $F/2$。制冷型中波红外探测器的工作波段为 3.7～4.8 μm，像元数为 640 pixel×512 pixel，像元大小为 15 μm×15 μm，F 数为 $F/2$，输出位数为 14 位。为提升系统的动态范围，系统内加入多档不同透过率红外中性滤光片，透过率分别为 100%，75%，20%，10%和 2%。

4.1　高温定标模型

为测量目标辐射特性，必须提前标定测量系统。对于高温目标，测量系统需采用高温腔型黑体经平行光管扩束的方法进行定标，为消除平行光管透过率对定标模型的影响，需获取平行光管实际透过率。首先采用近距离扩展源法进行辐射定标，实验装置原理如图 4 所示。设置黑体温度为 20，40，60，80 ℃，选取积分时间为1 ms，滤光片透过率为 100%，采集红外图像后线性拟合结果为：$y=333.7406x+1071.8490$。

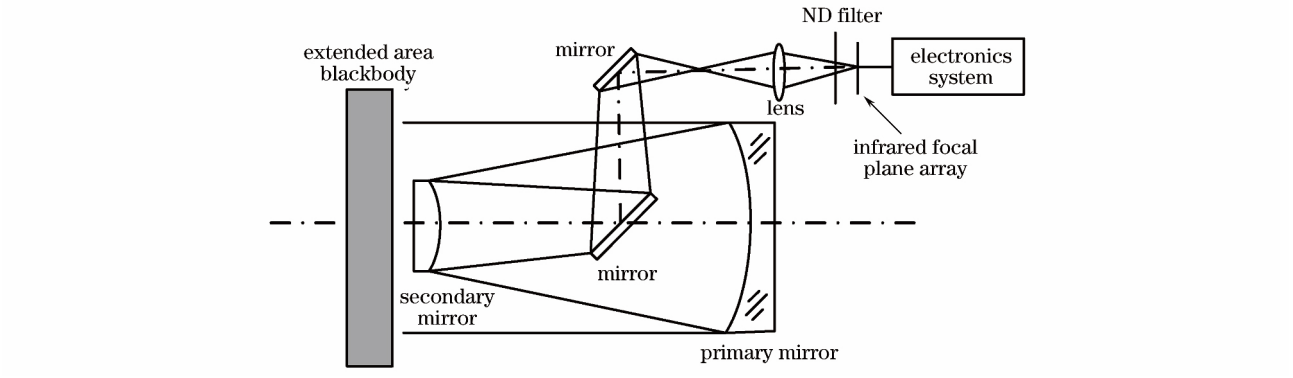


图 4　近距离扩展源法实验装置原理图

Fig. 4　Schematic of experimental setup for near-extended-source method

然后采用高温腔型黑体加平行光管的方法进行高温范围定标，如图 5 所示，设置积分时间为 1 ms，滤光片透过率为 100%，黑体温度分别设置为 100，150，200，250 ℃，采集红外图像后进行线性拟合，拟合结果为：$y=347.7528x+1163.3555$。由(8)式可得，平行光管的实际透过率为：$\tau_{\text{collimator}}=333.7406/347.7528=95.97\%$。

得到平行光管实际透过率后，即可对高温模型进行修正。设置高温腔型黑体温度分别为 100，200，300，

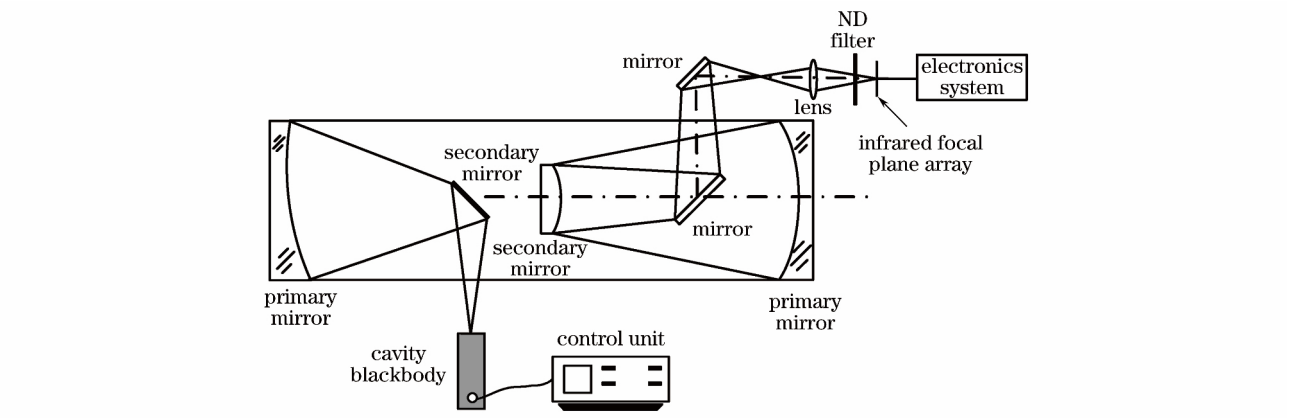


图 5　平行光管法实验装置原理图

Fig. 5　Schematic of experimental setup for collimator method

400 ℃，积分时间选取 1，2，3 ms，选取透过率为 2%和 10%的两档滤光片分别进行辐射定标。拟合后的原始定标方程和修正后的定标方程如表 1 所示。

表 1　原始定标方程和修正后的定标方程

Table 1　Original calibration formulas and corrected calibration formulas

Transmittance	Integration time /ms	Original calibration formula	Corrected calibration formula
2%	1	$y=9.3713x+1380.7414$	$y=9.7648x+1380.7414$
	2	$y=19.4722x+2624.2971$	$y=20.2899x+2624.2971$
	3	$y=29.0939x+3902.1070$	$y=30.3156x+3902.107$
10%	1	$y=39.8615x+1204.9488$	$y=41.5354x+1204.9488$
	2	$y=83.3200x+2196.0837$	$y=86.8188x+2196.0837$
	3	$y=124.5257x+3261.3390$	$y=129.7548x+3261.339$

4.2　高温小目标辐射特性测量结果

为验证所提方法对高温小目标测量的有效性，采用 CI 公司的 SR-800-12HT 高温黑体作为测量目标，黑体温度范围为 50～600 ℃，发射率为 0.97，温度精度为±0.1 ℃，黑体发射面大小为 300 mm×300 mm。将黑体放置在距离测量系统 760 m 处，即 $l_1=760$ m，为了模拟高温小目标，在高温黑体前放置中心开口为 100 mm×100 mm 的铁板，小目标辐射测量原理如图 6 所示。

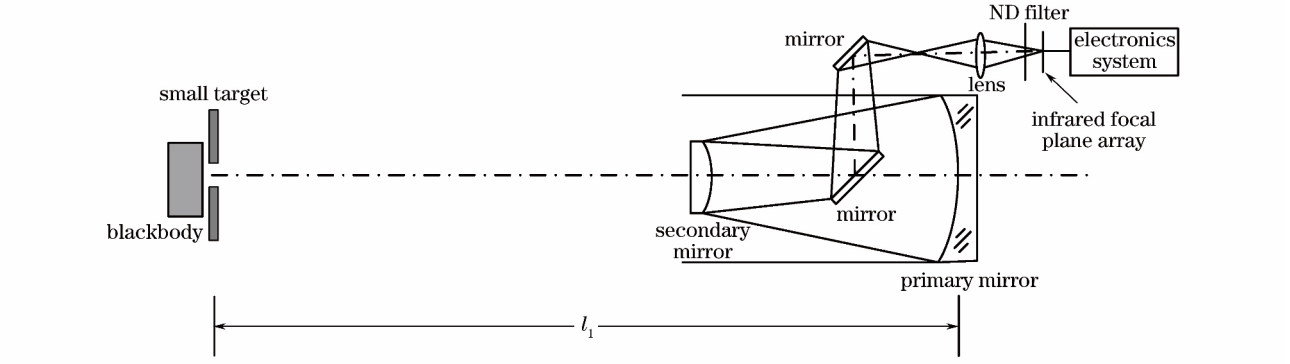


图 6　小目标辐射特性测量原理图

Fig. 6　Schematic of small target radiometric characteristics measurement

测量过程选取探测器积分时间分别为 1，2，3 ms，滤光片透过率选取 2%和 10%，测量黑体温度分别设置为 200，300，400 ℃。图 7 为积分时间为 2 ms、目标温度为 300 ℃、滤光片透过率为 2%时采集的红外图像。由图 7 可见，小目标成像在整个靶面上仅占据很小的区域，而且小目标边缘出现明显的模糊现象，灰度分布不均匀，与理论分析结果一致。

目标的理想成像面积可由(11)式得到，背景灰度值可由(10)式得到，修正后高温定标模型可由表 1 直接

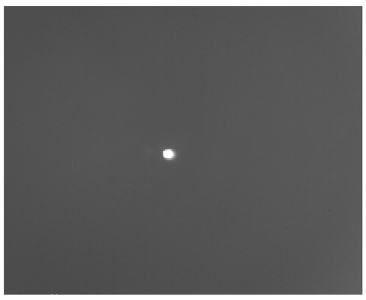


图 7　红外小目标图像

Fig. 7　Image of infrared small target

获取。测量过程中大气特性稳定，可以采用测量过程中的大气参数平均值计算大气特性。采用气象分析仪采集温湿度等基本信息，代入软件中得到测量过程中的大气平均程辐射 $L_{\mathrm{path}}=0.2101\ \mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot sr^{-1}}$，大气平均透过率 $\tau_{\mathrm{atm}}=0.7319$。利用所提高温小目标辐射测量方法，计算目标辐射特性，目标辐射亮度及温度测量结果如表 2 所示。

表 2　高温小目标辐射测量结果

Table 2　Radiometric measurement results of high temperature small target

Transmittance	Integration time /ms	Temperature /℃	Measurement value of temperature /℃	Error of temperature / %	Radiance / (W·m^{-2}·sr^{-1})	Measurement value of Radiance / (W·m^{-2}·sr^{-1})	Error of radiance /%
2%	1	200	197	−1.50	75.91874	72.8515	−4.04
		300	288	−4.00	259.8459	228.2612	−12.16
		400	394	−1.50	623.2651	597.6970	−4.10
	2	200	190	−5.00	75.91874	65.5042	−13.72
		300	280	−6.67	259.8459	210.1410	−19.13
		400	376	−6.00	623.2651	518.6436	−16.79
	3	200	192	−4.00	75.91874	67.4159	−11.20
		300	284	−5.33	259.8459	218.9849	−15.73
		400	374	−6.50	623.2651	511.0230	−18.01
10%	1	200	192	−4.00	75.91874	67.6893	−10.84
		300	294	−2.00	259.8459	243.5343	−6.28
		400	395	−1.25	623.2651	599.9909	−3.73
	2	200	193	−3.50	75.91874	68.5651	−9.69
		300	285	−5.00	259.8459	222.7334	−14.28
		400	Saturation	—	623.2651	Saturation	—
	3	200	194	−3.00	75.91874	69.0497	−9.05
		300	Saturation	—	259.8459	Saturation	—
		400	Saturation	—	623.2651	Saturation	—

由表 2 测量结果可知，所提出的高温小目标测量方法辐射亮度最大测量误差为 19.13%，温度测量最大误差为 6.67%，说明方法对于高温小目标具有较高的测量精度。测量误差主要是由大气特性计算偏差和测量过程中的环境温度变化引起的。

5　结　　论

提出一种高温小目标辐射特性测量方法，并通过外场实验验证了方法的有效性。为实现高温目标辐射测量，必须提前在高温范围标定测量系统，同时修正平行光管透过率对高温定标模型的影响。考虑到目标能量虽弥散到多个像元内，但是到达探测器靶面的总能量不变，提出针对高温小目标的辐射测量方法。该方法需要提前获得目标的大小和成像距离，以得到目标的理想成像大小。在外场进行高温黑体模拟小目标成像

实验，结果表明，考虑大气透过率和大气程辐射后，该方法反演黑体辐射亮度最大测量误差为19.13%，反演黑体温度测量最大误差为6.67%，表明该方法可以在外场实现高温小目标较高精度的测量。

该方法可用于研究已知大小和成像距离的合作目标，可以实现对该类目标较高精度的辐射测量。但是对于非合作目标或者未知目标，由于无法计算其理想像大小，该方法不适用。通过对高温小目标辐射特性的测量，可以评价远距离目标的红外隐身特性，检验红外光学系统和探测器的性能，分析系统的作用距离等。由于制冷型红外探测器对于热源特别敏感，测量过程中环境温度变化会对测量精度产生一定的影响。此外，大气辐射特性计算偏差也会引入一定的测量误差。后续研究的重点是对系统温度漂移进行补偿以提高测量精度，同时提高大气辐射特性计算软件的精度，并且测量不同形状和辐射特性的目标，以验证该方法的通用性。

参 考 文 献

[1] Cao Lihua, Wan Chunming, Zhang Yunfeng, *et al*. Infrared radiation characteristic measure method of point target[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34(4): 460-464.
曹立华, 万春明, 张云峰, 等. 点目标的红外辐射特性测量方法[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(4): 460-464.

[2] Chang Songtao, Sun Zhiyuan, Zhang Yaoyu, *et al*. Radiation measurement of small targets based on PSF[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11): 2879-2887.
常松涛, 孙志远, 张尧禹, 等. 基于点扩散函数的小目标辐射测量[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(11): 2879-2887.

[3] Chang Songtao, Zhang Yaoyu, Sun Zhiyuan, *et al*. Radiation measurement method for infrared small targets[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0504001.
常松涛, 张尧禹, 孙志远, 等. 红外小目标辐射测量方法[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0504001.

[4] Tartakovsky A G, Blazek R B. Effective adaptive spatial-temporal technique for clutter rejection in IRST[C]. SPIE, 2000, 4048: 85-95.

[5] Tartakovsky A G, Kligys S, Petrov A. Adaptive sequential algorithms for detecting targets in a heavy IR clutter[C]. SPIE, 1999, 3809: 119-130.

[6] Wang X, Lü G F, Xu L Z. Infrared dim target detection based on visual attention[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(6): 513-521.

[7] Bae T W, Kim B I, Kim Y C, *et al*. Small target detection using cross product based on temporal profile in infrared image sequences[J]. Computers & Electrical Engineering, 2010, 36(6): 1156-1164.

[8] Qi S X, Xu G J, Mou Z Y, *et al*. A fast-saliency method for real-time infrared small target detection[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 77: 440-450.

[9] Deng H, Liu J G. Infrared small target detection based on the self-information map[J]. Infrared Physics & Technology, 2011, 54(2): 100-107.

[10] Zheng C Y, Li H. Small infrared target detection based on harmonic and sparse matrix decomposition[J]. Optical Engineering, 2013, 52(6): 066401.

[11] Holst G C. Testing and evaluation of infrared imaging systems[M]. 2nd ed. Bellingham: JCD and SPIE Optical Engineering Press, 1998.

[12] Li Ning, Zhang Yunfeng, Liu Chunxiang, *et al*. Calibration of 1 m aperture infrared theodolite[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8): 2054-2060.
李宁, 张云峰, 刘春香, 等. 1 m口径红外测量系统的辐射定标[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(8): 2054-2060.

[13] 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.

[14] 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.

[15] Yang Ciyin, Cao Lihua, Zhang Jianping. Measurement of infrared radiation for target airplane based on real-time atmospheric correction[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(7): 1751-1759.
杨词银, 曹立华, 张建萍. 基于大气实时修正的飞机辐射特性测量[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(7): 1751-1759.

[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] 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.

[18] Tian Q J, Chang S T, He F Y, *et al*. Compensation to the output drift for cooled infrared imaging systems at various ambient temperatures[J]. Optoelectronics Letters, 2017, 13(2): 123-126.

[19] Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei, *et al*. Radiation 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.

[20] Tian Qijie, Chang Songtao, Qiao Yanfeng, *et al*. Radiometric calibration based on low-temperature area blackbody for infrared systems with high dynamic range[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 0412003.
田棋杰, 常松涛, 乔彦峰, 等. 采用低温面源黑体实现红外系统宽动态范围定标[J]. **光子学报**, 2017, 46(4): 0412003.