

地基红外辐射测量系统联合辐射定标法

殷丽梅¹, 乔兵¹, 刘俊池¹, 黄智国², 张振铎¹, 李宏壮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 基于红外标准星和内部黑体标定源的联合辐射定标法可提高空间目标的红外辐射测量精度。黑体标定源位于红外辐射测量系统内部,用于定标光学系统响应率。依据大气消光模型,采用天文孔径测光法,通过观测不同仰角处的多颗具有较高光谱分辨率的红外标准星得到大气消光和系统透过率系数。700 mm 口径地基中波红外辐射测量系统验证性实验的结果表明,在恒星图像曝光充分的情况下,联合辐射定标法的恒星辐照度反演误差优于 11%。联合辐射定标法操作简单、成本低,可随时对测量设备进行现场标校。

关键词 测量; 联合辐射定标; 红外辐射; 红外标准星; 辐射反演; 大气消光

中图分类号 TP732.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0412001

Combined Radiation Calibration Method for Ground-Based Infrared Radiation Measurement System

Yin Limei¹, Qiao Bing¹, Liu Junchi¹, Huang Zhiguo², Zhang Zhenduo¹, Li Hongzhuang¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun, Jilin 130033, China;

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

Abstract Combined radiation calibration method based on infrared calibration stars and internal blackbody calibration source can improve the accuracy of infrared radiation measurement of spatial object. The blackbody calibration source is located inside the infrared radiation measurement system, which is used to calibrate the responsivity of the optical system. According to the atmospheric extinction model, using astronomical aperture metering method, the atmospheric extinction and system transmittance coefficient are obtained by observing multiple infrared calibration stars with higher spectral resolution at different elevation angles. The experimental results of the verification test of 700 mm aperture ground-based medium wave infrared radiation measurement system show that, in the case of sufficient exposure of star image, the inversion error of the star irradiance of the combined radiation calibration method is better than 11%. The combined radiation calibration method is simple and low cost, which can be used to calibrate the measurement equipment on-site at any time.

Key words measurement; combined radiation calibration; infrared radiation; infrared calibration stars; radiation inversion; atmospheric extinction

OCIS codes 120.0280; 120.2440; 120.5630; 040.3060

1 引 言

利用经过标定的光电系统对空间目标的红外辐射进行测量,是获取空间目标真实辐射特性的直接手段。而目标辐射特性的测量精度取决于辐射定标精度和大气透过率测量精度^[1]。

随着地基红外辐射测量设备的发展,设备口径

越来越大,测量精度要求也越来越高,传统的直接扩展源^[2-3]和大口径红外平行光管定标法^[4]由于机动性差且成本高,已难以满足设备现场标校的需求。在基于红外标准星和内部黑体标定源的联合辐射定标法^[5-6]中,小口径黑体标定源位于红外辐射测量系统内部,用于对系统后端光路进行标定。而已知光谱数据的红外标准星则用于测量大气消光及整层大

收稿日期: 2017-09-06; 收到修改稿日期: 2017-11-09

作者简介: 殷丽梅(1986—),女,硕士,助理研究员,主要从事空间目标红外辐射特性测量方面的研究。

E-mail: yinlimei302@163.com

0412001-1

气和前端光学系统的透过率系数。与仅利用红外标准星的红外辐射标校方法^[7-8]相比,联合辐射定标法是对每一个像元的响应率进行标定,消除了像元之间响应率的差异,可进一步提高辐射测量精度。

2 辐射测量原理

大气环境下,测量系统对目标进行红外辐射测量时,目标辐射在到达探测器的传输过程中受到大气的衰减。同时,大气自身辐射也叠加到目标辐射上一同到达探测器。当探测器响应为线性时,测量系统对空间目标和周围天空背景的辐射测量模型^[1]分别为:

$$D_t = \alpha(\tau_\theta E_t + E_a) + D_0, \quad (1)$$

$$D_a = \alpha E_a + D_0, \quad (2)$$

式中 E_t 、 E_a 分别代表待测目标和天空背景在望远镜入瞳处的辐照度, α 为光学系统的辐照度响应率, τ_θ 为天顶距 θ 处的大气透过率。获得空间目标图像后,首先执行天空背景去除,将(1)式和(2)式相减并整理,得到:

$$\Delta D = D_t - D_a = \alpha \tau_\theta E_t. \quad (3)$$

红外辐射测量系统的结构布局如图 1 所示。黑体标定源位于标定光路入瞳处,切换镜切入时,系统为成像模式,切换镜切出时,系统为定标模式。为了精确标定主焦面以后的光学系统,定标光路与系统光路的 F 数相同。

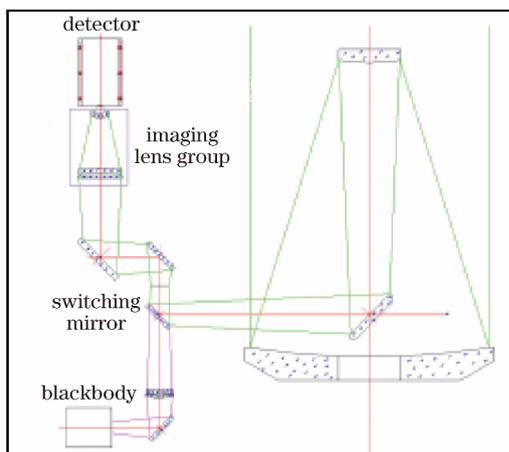


图 1 红外辐射测量系统的光学结构

Fig. 1 Optical structure of infrared radiation measurement system

半光路辐射定标时,黑体辐射未经前端光学系统,设 α' 为黑体定标响应率, t_{front} 为前端光学系统透过率, t_{cal} 为标定光学系统的透过率,测量系统的辐照度响应率可表示为:

$$\alpha = \alpha' \cdot t_{\text{front}} / t_{\text{cal}} \quad (4)$$

大气透过率的计算公式^[9]为:

$$\tau_\theta = t_{\text{atm}} \cdot \exp[-\kappa \cdot m(\theta)], \quad (5)$$

式中 t_{atm} 为大气透过率因子, $\exp[-\kappa \cdot m(\theta)]$ 代表了大气消光,即大气透过率随观测仰角增大而减小的趋势, κ 为总的垂直方向大气消光光学厚度,大气质量^[10] $m(\theta)$ 的公式为:

$$m(\theta) = \frac{1}{\cos \theta + 0.50572(96.07995 - \vartheta)^{-1.6364}}, \quad (6)$$

式中 θ 单位为弧度, ϑ 单位为角度。将(4)、(5)式代入(3)式后,两边取对数并整理得到:

$$\ln\left(\frac{\Delta D}{\alpha' \cdot E_t}\right) = -\kappa \cdot m(\theta) + \ln\left(\frac{t_{\text{front}} \cdot t_{\text{atm}}}{t_{\text{cal}}}\right). \quad (7)$$

黑体半光路定标得到 α' 后,于不同天顶距处快速拍摄多颗红外标准星。根据(7)式得到以 $m(\theta)$ 为横坐标,以 $\ln[\Delta D / (\alpha' \cdot E_t)]$ 为纵坐标的一系列数据点。对测量数据点进行线性拟合,拟合的斜率即为 $-\kappa$,截距为系统和大气透过率系数。得到 κ 后,任意天顶距方向的大气消光即可得到。

得到测量系统的红外辐射响应率、透过率系数和大气消光后,可由探测器输出数码值按(7)式直接得到等效大气层外待测目标的辐照度值。若需要知道空间目标的辐射强度,设 R 为目标到光学系统的距离,则空间目标的辐射强度 $I = E_t \cdot R^2$ 。由此,达到了通过红外辐射测量传感器输出图像反演得到空间目标辐射强度的目的。

2.1 绝对辐射定标

探测器单像元视场内,黑体辐射源在定标光路入瞳处的辐照度为^[11]:

$$E(T) = \frac{A_d}{f^2} L(T), \quad (8)$$

式中 A_d 为探测器单个像元的面积, f 为定标光学系统的焦距, $L(T)$ 为黑体的辐亮度, T 为温度。辐射定标时,切换镜切出系统光路,设定不同的黑体工作温度 T_i ,计算得到黑体在定标光路入瞳处的辐照度 $E(T_i)$,此时探测器输出为 D_i 。对获得的多组 $[D_i, E(T_i)]$,根据下式进行最小二乘线性拟合:

$$D_i = \alpha' \cdot E(T_i) + D_0, \quad (9)$$

得到对应于每个像元的标定光学系统辐照度响应率 α' 。半光路辐射定标不能测出前端光学系统引起的仪器响应变化,为了对比联合辐射定标和传统直接扩展源定标方法的反演精度,需要知道整个系统的辐照度响应率 α 。由此,建立一个从半光路辐射定标到等效全光路,即红外辐射测量系统入瞳处,等效

黑体辐照度的转换关系:

$$\alpha = k \cdot \alpha', \quad (10)$$

式中转换系数 k 由实验室内全光路和半光路联合定标结果给出。在实验室内同一温度、湿度条件下, 首先进行全光路定标。红外辐射测量系统切换至成像模式, 将 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 高精度面源黑体直接放置在系统入瞳处。分别设置黑体温度为 $31, 34, 37, 40, 43 \text{ }^\circ\text{C}$, 并采集图像, 处理得到整个系统的辐照度响应率 α ; 其次, 将红外辐射测量系统切换至定标模式, 系统内置的小口径面源黑体温度也分别设置为 $31, 34, 37, 40, 43 \text{ }^\circ\text{C}$, 并采集图像, 处理得到标定光学系统的辐照度响应率 α' ; 最后, 根据(10)式得到转换系数 k 。两次重复性实验得到 k 的均值为 0.75 。

2.2 红外标准星库

对于指定的光学系统, 定标用红外标准星的选择依据是: 1) 恒星光谱辐照度不随时间发生变化, 即恒星不能是变星; 2) 恒星亮度和观测仰角在望远镜探测能力范围内; 3) 恒星光谱波段涵盖系统工作波段。

目前, 拥有的红外标准星库中恒星光谱曲线覆盖 $1.2 \sim 35 \text{ } \mu\text{m}$, 其中 422 颗星的光谱分辨率为 $0.05 \text{ } \mu\text{m}$, 光谱精度优于 2% 。其余标准星的光谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda$ 约为 100 , 光谱不确定度优于 5% ^[12]。将星库中红外标准星的光谱数据插值后, 在系统工作波段范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内进行数值积分, 得到大气层外红外标准星的辐照度:

$$E_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d\lambda, \quad (11)$$

式中 $E(\lambda)$ 代表红外标准星的光谱辐照度。

3 辐射测量实验

3.1 定标实验

利用 700 mm 口径红外辐射测量系统开展中波红外辐射特性测量实验。系统工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \text{ } \mu\text{m}$, 探测器分辨率为 320×256 , 像元尺寸为 $30 \text{ } \mu\text{m}$, $F=4$ 。两次实验的积分时间分别是 5 ms 和 8 ms 。待相机输出稳定后开始定标, 黑体温度分别设置为 $23, 25, 27, 29, 31, 33 \text{ }^\circ\text{C}$ 。黑体定标完成后依次拍摄 20 颗红外亮星, 记录星号和观测俯仰角, 天顶距 θ 为望远镜观测仰角的余角。

数据处理时发现, 各路放大器参数不一致引起的条纹噪声严重, 影响数据提取结果。因此绝对辐射定标时采集原始图像, 而拍摄恒星时采集校正了非均匀性后的图像, 否则无法识别目标。采用非均匀性评定标准:

$$U = \frac{1}{R} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [D(i, j) - R]^2} \times 100\%, \quad (12)$$

式中 R 代表红外探测器整个靶面 M 行 \times N 列的灰度均值。对比了基于黑体的两点校正法、基于黑体与天光背景的两点校正法以及根据望远镜仰角分段单点校正法的校正效果, 结果如表 1 和图 2 所示。其中, 基于黑体与天光背景的两点校正法操作简单且校正效果最佳。

表 1 非均匀性校正效果对比

Table 1 Comparison of nonuniformity correction results

Elevation / ($^\circ$)	Uncorrected result / 10^{-2}	Two-point correction of blackbody / 10^{-3}	Two-point correction / 10^{-4}	Segmented single point calibration / 10^{-4}
20	3.90	3.26	-	-
25	3.89	3.29	2.15	8.01
30	3.89	3.36	3.71	5.87
35	3.88	3.38	3.86	4.32
40	3.88	3.42	3.82	3.69
45	3.88	3.47	3.96	2.91
50	3.88	3.47	4.07	2.75
55	3.87	3.48	4.25	2.26
60	3.87	3.48	4.17	1.99
65	3.87	3.50	4.25	2.03
70	3.87	3.51	4.16	2.12
75	3.87	3.52	4.18	1.93
80	3.86	3.50	4.24	1.68
86	3.86	3.45	4.61	1.84

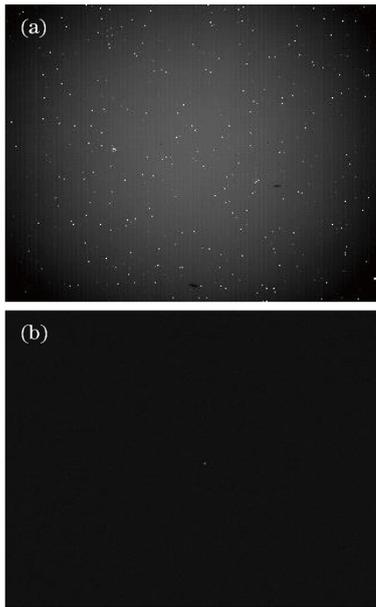


图 2 (a)原始图像;(b)两点校正后的恒星图像
Fig. 2 (a) Original image; (b) stellar image after two-point correction

恒星观测数据提取采用孔径测光法,于星点像周围足够远处的环形面积内采集天空背景均值。对整个靶面执行背景扣除后,得到星点像在探测器靶面上总的输出数码值。按(7)式进行线性拟合时发现个别样本点严重偏离拟合曲线。假设拟合误差是服从正态分布的随机变量,定义拟合残差(即定标点处样本值与回归模型点预测值之差) $R_{fitting} = y - \hat{y}$,其中 $y = \ln[\Delta D / (\alpha' \cdot E_t)]$, \hat{y} 为点预测值。当拟合残差置信度为 95% 时,其置信区间的估计如图 3 所示。残差超过回归模型置信区间的样本点为局外点,认为其存在系统误差或者粗大误差^[13], 直接将其剔除后重新进行曲线拟合。图 3(a)为 2017 年 7 月 25 日的实验数据,无局外点;图 3(b)为 2017 年 8 月 30 日的实验数据,第 7、8 个点为局外点。

图 4 为曲线拟合结果,两次实验数据的相关系数 R^2 分别为 0.5849 和 0.7774,均方根误差(RMSE)分别为 0.1082 和 0.0549。两次实验定标得到大气消光光学厚度 κ 分别为 0.1243 和 0.1787, $\ln(t_{front} \cdot t_{atm} / t_{cal})$ 分别为 -1.139 和 -0.5789。系统透过率系数 t_{front} 和 t_{cal} 在短期内变化极小,两次实验拟合曲线截距的差异为大气透过率因子 t_{atm} 的差异。

3.2 反演误差

为了验证联合辐射定标法的反演精度,首先,由黑体定标数据计算得到测量系统的辐照度响应率 α' ;其次,依次选定一颗标准星作为待测目标

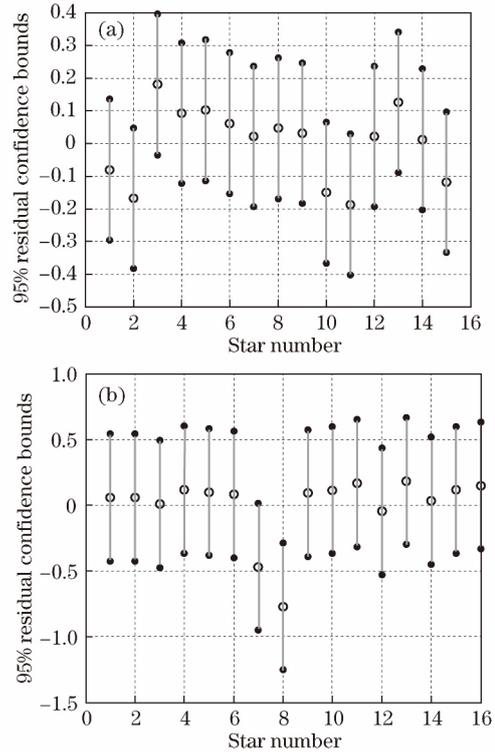


图 3 数据拟合的残差区间。(a) 2017 年 7 月 25 日;
(b) 2017 年 8 月 30 日
Fig. 3 Residual bounds of data fitting.
(a) July 25, 2017; (b) August 30, 2017

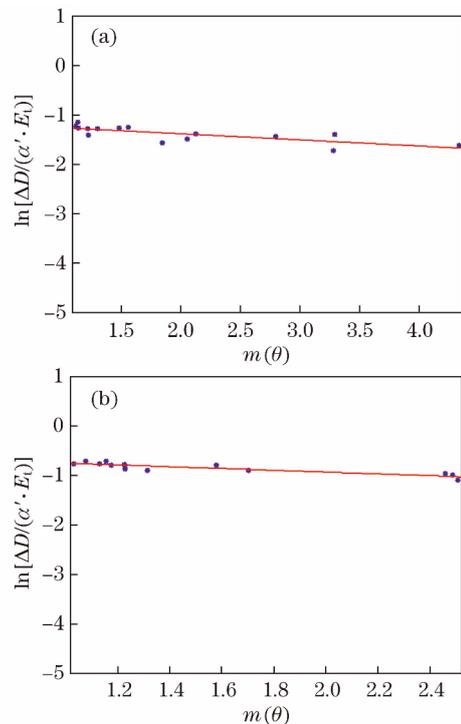


图 4 定标曲线拟合结果。(a) 2017 年 7 月 25 日;
(b) 2017 年 8 月 30 日
Fig. 4 Fitting result of calibration curve.
(a) July 25, 2017; (b) August 30, 2017

星,其余作为定标星,按(7)式拟合得到多组 $\{\kappa_i, [\ln(t_{\text{front}} \cdot t_{\text{atm}}/t_{\text{cal}})]_i\}$,进而得到透过率系数和目
标星处的大气消光;最后,将响应率、待测目标星的 ΔD 值、透过率系数和天顶距等值代入到(7)式中,反
演得到待测目标星的大气外辐照度。恒星辐照度反
演误差为计算的目标星大气外反演辐照度的相对误

差。对比实验的大气透过率由 MODTRAN 计算得
到,而全系统辐照度响应率 α 等于 α' 和转换系数 k 的
乘积。由(3)式直接计算得到标准星的大气外辐照度。

计算结果见表 2 和表 3,相对误差 1 为联合辐
射定标法的反演误差,相对误差 2 为传统定标法的
反演误差。

表 2 2017 年 7 月 25 日恒星辐照度反演误差
Table 2 Inversion error of star irradiance in July 25, 2017

Number	Star	Elevation / (°)	Position	$\alpha' /$ ($10^{12} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$)	ΔD	Irradiance / ($10^{-11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)	Relative error 1 / %	MODTRAN transmittance	Relative error 2 / %
1	HD3712	29.00	(139,168)	8.4482	99.87	5.27	10.17	0.3423	12.76
2	HD12929	20.82	(143,168)	8.4604	142.78	7.11	5.60	0.2862	10.36
3	HD18884	17.50	(143,169)	8.4142	397.93	19.2	20.18	0.2562	27.98
4	HD19058	39.85	(144,165)	8.4706	605.96	25.1	8.71	0.3926	3.36
5	HD25025	13.10	(142,171)	8.4185	159.12	9.60	10.37	0.2083	25.83
6	HD29139	42.37	(143,165)	8.4409	1351.15	57.1	5.82	0.4016	7.08
7	HD32068	61.38	(143,163)	8.4466	91.08	3.82	1.77	0.4476	16.05
8	HD44478	63.12	(141,163)	8.4388	588.24	24.00	5.02	0.4504	14.16
9	HD48915	27.97	(132,171)	8.4061	277.19	13.20	1.82	0.3363	1.12
10	HD52877	17.57	(136,171)	8.4285	101.20	6.79	20.35	0.2575	8.58
11	HD81797	32.75	(131,167)	8.4046	217.58	12.40	19.29	0.3622	23.27
12	HD89484	50.30	(125,162)	8.4191	172.82	7.41	1.99	0.4249	13.21
13	HD89758	61.92	(126,159)	8.4209	220.39	8.32	15.17	0.4485	6.63
14	HD95689	55.00	(129,161)	8.4084	176.54	7.56	1.25	0.4358	15.17
15	HD96833	54.65	(127,160)	8.4279	54.68	2.67	12.87	0.4350	25.64

表 3 2017 年 8 月 30 日恒星辐照度反演误差
Table 3 Inversion error of star irradiance in August 30, 2017

Number	Star	Elevation / (°)	Position	$\alpha' /$ ($10^{12} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$)	ΔD	Irradiance / ($10^{-11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)	Relative error 1 / %	MODTRAN transmittance	Relative error 2 / %
1	HD3712	23.60	(175,200)	8.2745	161.62	5.27	4.37	0.3128	1.49
2	HD29139	35.91	(179,193)	8.2997	1925.70	57.14	1.97	0.3798	11.04
3	HD31398	49.41	(179,186)	8.3794	271.11	8.01	9.63	0.4244	20.84
4	HD39003	62.05	(167,44)	8.3040	39.97	1.04	0.70	0.4487	14.56
5	HD44478	58.09	(177,181)	8.3810	904.01	23.98	1.08	0.4432	15.56
6	HD48915	23.87	(168,201)	8.2512	414.44	13.21	7.59	0.3146	0.59
7	HD69267	54.44	(169,183)	8.3794	132.25	3.56	1.66	0.4361	15.43
8	HD80493	75.33	(161,170)	8.4569	273.19	6.96	0.49	0.4646	16.90
9	HD89758	67.94	(161,173)	8.4173	341.43	8.32	6.17	0.4578	11.45
10	HD90432	23.40	(164,201)	8.2846	79.96	2.90	10.25	0.3062	9.60
11	HD95689	59.86	(165,178)	8.4109	311.66	7.56	8.48	0.4464	8.60
12	HD100029	54.48	(167,182)	8.3880	165.28	4.71	7.78	0.4362	20.22
13	HD102224	54.56	(163,182)	8.3962	66.20	1.73	1.11	0.4348	12.98
14	HD131873	39.97	(166,190)	8.3715	461.50	12.82	7.24	0.3930	4.51

从反演误差的角度来看,2017年7月25日联合辐射定标法较传统定标法的优势不明显。而2017年8月30日实验时,由于延长了积分时间,恒星图像曝光更充分,信噪比提高使得数据提取精度提高,反演误差明显降低,基本在10%以内,最大仅为11%。因此,联合定标拍摄恒星时,在相机线性响应区间内,应尽可能延长曝光时间,增大系统探测信噪比,提高数据处理精度。

4 结 论

介绍了适用于地基红外辐射特性测量系统的定标方法,小口径面源黑体位于定标光学系统入瞳处。与传统定标方法相比,该方法的优点是操作简单,极大地提高了测量精度、降低了设备成本,且可实现现场标校。传统定标方法的红外辐射测量精度在10%~30%范围内,而多次实验验证结果显示联合辐射定标法的测量精度优于20%。

参 考 文 献

- [1] Yang C Y, Zhang J P, Cao L H. Ground-based spatial object infrared radiation feature measurement technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2): 304-310.
杨词银, 张建萍, 曹立华. 地基空间目标红外辐射特性测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 304-310.
- [2] Yang C Y, Cao L H. Radiation calibration and error analysis for a large-aperture infrared opto-electric system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9): 1624-1628.
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.
- [3] 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, 何锋赞, 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.
- [4] Li X S, Ren J W, Zhang L G, *et al.* Research on a radiometric calibration device for a large aperture infrared opto-electric system on spot[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2006, 17(2): 175-178.
李宪圣, 任建伟, 张立国, 等. 大口径红外光电系统现场辐射定标装置的研制[J]. 光电子·激光, 2006, 17(2): 175-178.
- [5] Air Force Research Lab. AMOS users's manual[EB/OL]. [2017-09-06]. <http://ulua.hpcc.af.mil/amos.html>.
- [6] Liu Y Q, Liu X Y. Research on technology of ground-based infrared radiation feature measurement for space target[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512003.
刘莹奇, 刘祥意. 空间目标的地基红外辐射特性测量技术研究[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512003.
- [7] Yin L M, Liu J C, Wang J L, *et al.* Infrared radiation calibration based on infrared calibration stars[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(12): 1204004.
殷丽梅, 刘俊池, 王建立, 等. 基于红外标准星的红外辐射标校方法[J]. 光子学报, 2014, 43(12): 1204004.
- [8] Liu J C, Li H W, Wang J L, *et al.* Measurement of mid-infrared total atmospheric transmittance and its error analysis[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(6): 1547-1557.
刘俊池, 李洪文, 王建立, 等. 中波红外整层大气透过率测量及误差分析[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1547-1557.
- [9] Cutri R M, Skrutskie M F, Van Dyk S. Explanatory supplement to the 2MASS all sky data release and extended mission products [EB/OL]. (2008-09-07) [2017-09-06]. <https://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/allsky/doc/explsup.html>.
- [10] Kasten F, Young A T. Revised optical air mass tables and approximation formula[J]. Applied Optics, 1989, 28(22): 4735-4738.
- [11] Tian Q J, Li Z, Chang S T, *et al.* Radiometric measurement for high-temperature infrared small target[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1012004.
田棋杰, 李周, 常松涛, 等. 高温小目标红外辐射特性测量方法[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1012004.
- [12] Cohen M, Walker G R, Carter B, *et al.* Spectral irradiance calibration in the infrared. X. A self-consistent radiometric all-sky network of absolutely calibrated stellar spectra[J]. The Astronomical Journal, 1999, 117(4): 1864-1889.
- [13] Cao L H, Li N, Yang C Y, *et al.* Radiance calibration for 3-5 μm infrared detector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 858-864.
曹立华, 李宁, 杨词银, 等. 3~5 μm 红外探测器的辐射定标[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 858-864.