

## 3~5 $\mu\text{m}$ 红外天空亮度测量的多元定标模型

赵志军<sup>1,4,5</sup>, 许方宇<sup>1,5</sup>, 高玲<sup>2</sup>, 郭杰<sup>3</sup>, 徐世春<sup>2</sup>, 刘忠<sup>1,5</sup>

- (1. 中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216; 2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223;  
3. 云南师范大学, 云南 昆明 650500; 4. 中国科学院大学, 北京 100049;  
5. 中国科学院天文大科学研究中心, 北京 100012)

**摘要:** 传统一元定标法测量红外天空亮度, 面临诸多困难, 如测量易受环境温度变化影响、仪器动态范围不足等。提出增加积分时间为自变量的二元定标模型, 解决了仪器动态范围不足的问题; 然后通过改变环境温度的系列实验, 掌握了二元定标模型中仪器辐射随环境温度变化的规律; 基于此, 提出再增加环境温度为自变量的三元定标模型。实验数据表明, 三元模型与实测数据拟合程度很高, 相关系数为 1.000, 模型参数  $a$ 、 $b$ 、 $d$ , 95% 置信度的相对不确定度均小于 0.82%, 当环境保持某一温度不变时, 三元模型退化为二元模型, 各模型参数稳定, 其相对偏差小于 0.6%。最后, 通过红外天空亮度实测, 验证并比较了三元和二元定标模型; 结果表明, 三元模型定标测量法使用条件宽泛, 既扩大了仪器动态范围, 又不受环境温度变化影响; 更重要的是, 不再需要现场定标, 提高了测量精度和测试效率。

**关键词:** 红外; 天空亮度; 最小二乘; 多元定标

**中图分类号:** P111; TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1004004

## Multivariate calibration model for measurement of 3–5 $\mu\text{m}$ infrared sky brightness

Zhao Zhijun<sup>1,4,5</sup>, Xu Fangyu<sup>1,5</sup>, Gao Ling<sup>2</sup>, Guo Jie<sup>3</sup>, Xu Shichun<sup>2</sup>, Liu Zhong<sup>1,5</sup>

- (1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;  
2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;  
3. Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;  
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
5. Center for Astronomical Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** The traditional univariate calibration method used in measuring infrared sky brightness is confronted with many issues, and two main issues are the insufficient dynamic response of the measuring instruments as well as the influence of the ambient temperature on the measurement result. In order to extend the dynamic response of the measuring instruments, a bivariate calibration model at the constant

收稿日期: 2017-02-25; 修订日期: 2017-03-21

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1231117, U1431122); 江苏省自然科学基金(BK20170566);

物质科学前沿与交叉研究 II (红太阳物理)

作者简介: 赵志军(1988-), 男, 博士生, 主要从事地基红外天文目标与背景辐射特性方面的研究。Email: zjzhao@ynao.ac.cn

导师简介: 刘忠(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事太阳物理、天文仪器与方法方面的研究。Email: lz@ynao.ac.cn

通讯作者: 许方宇(1972-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事红外天文仪器总体设计、红外天文仪器热控等方面的研究。

Email: xu\_fangyu@ynao.ac.cn

temperature was demonstrated in the paper, and its independent variables were radiance and exposure time. Then with the experiment data acquired in many temperatures, the variation of the bivariate calibration model in different temperature was analyzed. Thus trivariate calibration model was presented at the last part, and the goodness of the fit of the model and the experiment data was best.  $R$ -square is 1.000, and the relevant uncertainties in 95% confidence degree of  $a$ ,  $b$  and  $d$ , parameters of the trivariate calibration model, were all less than 0.82%, trivariate model can be degraded to bivariate at some certain temperature, the deviation of all of parameters of degraded model were less than 0.6%; Finally, with the outfield experiment of infrared sky brightness, bivariate and trivariate calibration model were validated and compared. The benefit of this trivariate calibration model is that it can extend the dynamic response of the measuring instruments, and the precision of its measuring result is not affected by the variation of ambient temperature. Hence this model can be widely used and can achieve high-precision and high-efficiency measurement without in-situ calibration.

**Key words:** infrared; sky brightness; least squares; multivariate calibration

## 0 引言

不同于可见光,在地基红外天文观测中,总是会受强烈的天空及望远镜自身热辐射所引起的噪声限制<sup>[1]</sup>。为了最大化地基红外望远镜的观测灵敏度,通常的做法是将红外望远镜放置在红外天空较暗且较稳定的台址<sup>[2]</sup>。中国西部干燥的高海拔地区是潜在的红外天文观测台址,所以,对这些潜在红外天文台址的红外天空亮度及其变化进行精确测量就显得尤为重要,而精确测量辐射亮度的关键则在于辐射定标的准确性。

国外,Smith.C.H 等人对南极点 8~19  $\mu\text{m}$  红外天空亮度及其起伏进行了测量,通过对红外天空亮度测量仪器的主体进行制冷和温控并且在 -30  $^{\circ}\text{C}$  和液氮温度两点定标,达到了一定的测量精度,但也增加了系统复杂性,而且未考虑环境温度变化对定天镜的影响,而定天镜是暴露于环境中的<sup>[2]</sup>;Z.Mariani 等人利用傅里叶变换光谱仪测量了加拿大北极圈内的 3~25  $\mu\text{m}$  红外天空亮度光谱分布,考虑到环境温度变化对仪器辐射影响,在天空测量前后各进行一次两点定标,将定标结果依时间线性内插到天空观测,但大多数情况下,环境温度随时间的变化并非线性<sup>[3]</sup>。国内,魏合理等人利用傅里叶变换光谱仪测量了 5~14  $\mu\text{m}$  天空亮度光谱分布,在 60  $^{\circ}\text{C}$  和 30  $^{\circ}\text{C}$  进行两点定标<sup>[4]</sup>;王东等人利用热像仪对 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~14  $\mu\text{m}$  的天空亮度进行了测量,采用多个温度点定标<sup>[5]</sup>。以

上工作所用定标模型均为一元模型,其动态范围有限,无力测量亮度起伏,也没有解决环境温度对仪器辐射影响的问题。

红外天空亮度及其起伏信号较弱,定标黑体辐射信号相对较强,传统一元定标模型动态范围无法兼顾弱的天空信号和强的黑体信号,同时模型易受环境温度变化的影响,严重影响红外天空亮度的精确测量。文中先提出二元定标模型,即信号强度(黑体温度)和积分时间都是自变量的定标模型<sup>[6-7]</sup>,解决了动态范围不足的问题。然后,在高低温环境箱中,实验验证了二元模型的稳定性,研究了其随环境温度的变化规律。基于高低温环境箱的实验结果,提出引入环境温度作为第三个自变量的三元定标模型测量法,通过外场实验验证了三元模型用于红外天空亮度测量的有效性。

## 1 红外天空辐射特性

天空亮度起伏包含两方面意思:(1) 天空亮度随时间的起伏;(2) 天顶角变化引起的天空亮度变化<sup>[8]</sup>。

定义信号的动态范围如下式:

$$DR = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (1)$$

对于天空亮度测量, $I_{\min}$  表示期望测量的天空亮度的起伏,或需要测量的最小信号变化, $I_{\max}$  表示测试和定标过程中天空亮度信号的最大值。

由此可见,天空亮度最大值和亮度起伏值的比就是天空亮度信号的动态范围,信号的动态范围决

定了红外天空测量装置的动态范围。

### 1.1 天空亮度及时间起伏

通过逐线积分大气辐射传输模型 LBLRTM, 利用昆明 2016 年 04 月 22 日探空数据, 对天顶方向 3~5 μm 波段红外辐射进行了计算, 得到 3~5 μm 的天空光谱辐射亮度, 如图 1 所示。

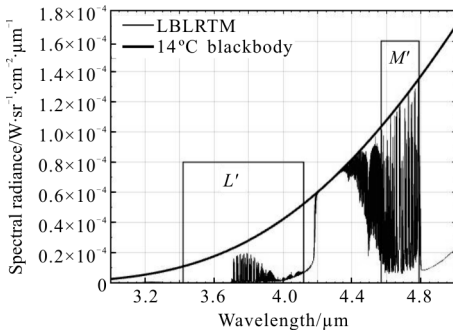


图 1 昆明天空红外光谱辐射亮度

Fig.1 Spectral radiation brightness of infrared sky in Kunming

图 1 中矩形区域对应红外天文测光带  $L'$  (3.42~4.12 μm) 和  $M'$  (4.57~4.79 μm)。参考近地环境温度 14 °C 的黑体, 归一化各波段天空的平均发射率。对于探测器工作波段 3.7~4.8 μm, 天空平均发射率为 0.45, 等效于 -4.9 °C 黑体的亮度; 对于  $M'$  波段, 天空平均发射率为 0.26, 等效于 -17.7 °C 黑体的亮度; 对于更暗的  $L'$  波段, 天空平均发射率仅为 0.06, 等效于 -37.4 °C 黑体的亮度。

关于 3~5 μm 波段内天空亮度随时间的起伏, 文献报道比较少, 考证 Smith C H 对于澳大利亚  $N$  波段 (7.7~13.5 μm) 的测量结果, 在感兴趣的频率范围内, 需要表征的亮度起伏小于最大天空亮度的 0.1%<sup>[2]</sup>, 即信号动态范围超过 1 000。

### 1.2 天空亮度空间分布

天空亮度信号, 在正天顶时最小, 随着天顶角增大而连续增大。对天空辐射亮度在天顶附近小角度变化的情况进行分析 (此时需要表征的信号的动态范围最大)。此信号的动态范围决定测量仪器动态范围的下限。

通过 LBLRTM 传输模型, 利用昆明 2016 年 04 月 22 日探空数据, 分别计算了  $L'$ 、 $M'$ 、3.7~4.8 μm 三个波段, 天顶角 2°~5° 的天空亮度相对于正天顶方向亮度的变化, 结果如表 1 所示。

表 1 相对于天顶的天空亮度变化

Tab.1 Changes of sky brightness relative to zenith

Wave band	2°	3°	4°	5°
$L'$	0.05%	0.12%	0.22%	0.34%
$M'$	0.04%	0.08%	0.14%	0.22%
3.7~4.8 μm	0.02%	0.04%	0.06%	0.1%

从表 1 可知, 在小天顶角范围内, 天空亮度的变化很小。以  $L'$  波段为例, 从正天顶到 3° 天顶角, 亮度变化为 0.12%, 信号动态范围 833。

## 2 红外天空亮度测量与模型定标

红外测试系统的响应, 或称仪器读数, 既包括对信号的响应, 还包括对仪器自身的热辐射的响应<sup>[9]</sup>。红外天空亮度信号较弱, 其起伏更弱。在红外天空亮度测量时, 仪器辐射是相对大的量; 些许环境温度变化都会导致仪器辐射发生变化, 严重干扰测量结果。因此红外天空亮度测量, 对仪器和环境提出很高要求。

以  $L'$  波段为例, 从正天顶到 3° 天顶角时亮度变化 0.12%, 若期望这个变化有三个仪器读值, 则  $L'$  波段的天空亮度读数要达到 2 500。同时, 为保障正确定标, 外场定标各温度点都须高于露点温度。某次外场实验最高定标温度 31 °C, 31 °C 黑体辐射强度将会达到天空亮度的 34.55 倍, 仪器读数将达到 86 375。文中的测试系统, 线性区域大约是 200~7 600, 必须调整积分时间才能满足测量要求。

而传统红外天空亮度测量, 通常假定测试系统对输入亮度信号的响应是一元线性的<sup>[10-12]</sup>:

$$I_{ij} = a_{ij} \cdot L + b_{ij} \quad (2)$$

式中:  $I_{ij}$  为探测器像元读数;  $L$  为信号 (定标黑体或天空) 波段内积分辐射亮度, 单位  $W \cdot sr^{-1} \cdot cm^{-2}$ ; 直线斜率  $a_{ij}$  和系统  $F$  数、透过率、积分时间等有关; 直线截距  $b_{ij}$  主要包括探测器偏置读数、暗电流的时间累积、仪器辐射的时间累积等。定标时, 采用公式 (2) 进行两点 (或多点) 定标, 通过拟合来确定模型系数  $a_{ij}$  和  $b_{ij}$ , 得到测试系统模型。

测量时, 必须保证系数  $a_{ij}$  和  $b_{ij}$  未发生变化。这就对定标和测量提出了要求: (1) 测试与定标过程中积分时间不能改变。(2) 仪器辐射强度和环境温度有关, 因此必须保证定标时和测试时环境同温。

实测时显然难以一一满足这些要求, 因此, 传统

一元线性模型用于红外天空亮度测量, 仅具估算价值。需要发展可以改变积分时间, 又不受环境温度变化影响的多元定标模型。

### 3 二元定标模型

对于一个均匀的辐射源, 某个像元读数同信号辐射亮度及积分时间的关系可以用下面的数学表达式<sup>[13-14]</sup>:

$$I_{ij}=a_{ij} \cdot t \cdot L+b_{ij} \cdot t+c_{ij} \quad (3)$$

式中:  $I_{ij}$  和  $L$  的意义同前;  $t$  是积分时间;  $a_{ij}$ 、 $b_{ij}$ 、 $c_{ij}$  是模型系数; 公式(3)右边由三项组成。第一项是系统对目标的响应项, 系数  $a_{ij}$  表征测试系统对目标单位时间的响应度。第二项既包括系统对仪器辐射的响应又包括探测器暗电流的时间累积, 单位时间总的响应系数是  $b_{ij}$ 。第三项截距项, 系数  $c_{ij}$  在一定条件下是常数。

显然, 相比于一元定标模型, 二元模型不仅允许在测量和定标时选用不同的积分时间, 而且在固定积分时间下, 二元定标模型可以退化为一元模型。可见, 相比一元模型, 二元模型更加完备, 适用范围更加广泛。

### 4 二元定标模型实验验证

为了验证二元定标模型的精度和稳定性, 并探求二元模型随环境温度变化规律, 在实验室和外场均进行了定标实验。

#### 4.1 实验装置

实验仪器为自主研发的 3~5  $\mu\text{m}$  红外天空背景测量装置, 设备口径 7.5 cm,  $F$  数为 2; 红外探测器像元大小 30  $\mu\text{m}$ , 像素 320×256, 工作波段 3.7~4.8  $\mu\text{m}$ ; 定标黑体选用 CI 公司的常温黑体, 温度范围 0~125  $^{\circ}\text{C}$ 。

#### 4.2 定标流程

测量仪器可以通过 Camlink 采集卡直接采集数

据到计算机, 探测器积分时间在 4~600 内可调, 对应积分时间 0.256~38.4 ms。根据实验室测量结果, 像元平均读数在 4 100~11 500 之间时, 探测器响应线性度良好。所以, 定标与测量时调整积分时间控制探测器读数在线性区间内, 以读数 11 000 附近为佳。

2016 年 07 月 07 日在实验室进行高低温定标实验, 分别在 20、15、10、-12  $^{\circ}\text{C}$  等四个环境温度下进行。在每个环境温度条件下, 控制目标黑体温度 0~20  $^{\circ}\text{C}$ , 温度间隔为 5  $^{\circ}\text{C}$ , 这样每个环境温度条件下得到五个状态。一共 20 个状态, 每个状态下用若干积分时间分别采集 750 帧图像。

2016 年 08 月 08 日和 08 月 14 日在云南澄江抚仙湖畔进行了红外天空亮度实测以及外场定标。外场条件下, 环境温度不可控, 记录环境温度随时间的变化。定标仅改变目标黑体温度(各黑体温度点均需高于露点, 以避免黑体结露), 控制目标黑体温度 19~31  $^{\circ}\text{C}$ , 温度间隔 3  $^{\circ}\text{C}$ , 这样得到相似环境温度下的五个状态, 每个状态下用若干积分时间分别采集 500 帧图像。

#### 4.3 定标数据处理

为了抑制随机误差影响, 将每帧 320×256 个像元的仪器读数平均; 同时为了消除环境实验箱温度起伏变化的影响, 再将连续 750 帧的像元均值再求平均, 记录该值; 这样得到了某一信号强度某一积分时间的输出值。由此, 可以得到一个二元自变量的数组, 两个变量分别是信号强度和积分时间。不同信号强度、不同积分时间的输出值, 用最小二乘法按公式(3)中的模型进行二元曲面拟合, 获得定标模型。

所有实验过程中使用的温度测控设备均使用标准温度计标定; 将修正了偏差后的温度测量结果记入表 2; 实验室及外场, 不同条件下的二元定标模型拟合参数如表 2 所示。

表 2 不同环境温度下二元模型拟合参数估计

Tab.2 Estimation of fitting parameters of bivariate model in different ambient temperature

Ambient temperature/ $^{\circ}\text{C}$	$a(\times 10^5)$	$b$	$c(\times 10^3)$	$R$ -square	RMSE
Lab -10.6	3.700±0.013	2.984±0.067	3.805±0.006	1.000	7.176
Lab 11.1	3.707±0.018	6.978±0.087	3.826±0.006	1.000	6.998
Lab 16.0	3.699±0.018	8.487±0.088	3.810±0.006	1.000	6.713
Lab 21.0	3.674±0.017	10.193±0.092	3.800±0.006	1.000	6.462
Outfield 19.9	3.675±0.026	9.734±0.246	3.775±0.007	1.000	6.215
Outfield 22.0	3.688±0.039	10.442±0.425	3.775±0.007	1.000	5.163

注: 统一取小数点后三位有效数字

表 2 中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  参数所对应列的值为参数的点估计值和 95% 置信度的区间估计;  $R$ -square 为定标数据和拟合函数的相关系数, 表明模型对定标数据点的拟合程度; RMSE 为各数据点的均方根误差。

### 5 二元定标实验结果分析

从实验结果表 2 中可以看出, 不同环境温度下获得的模型, 定标数据的拟合度很高, 三个参数所对应的置信区间都很小。在不同环境温度实验中, 95% 置信度下, 模型参数  $a$  的相对不确定度小于 0.5%; 参数  $c$  的相对不确定度小于 0.16%; 参数  $b$  的相对不确定度小于 2% (可能因环境实验箱控温稳定性而影响了数据精度)。外场实验, 模型参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的相对不确定度分别小于 1%、4% 和 0.19%。

根据模型的物理意义可知:  $a$  代表系统响应度, 应不随环境温度变化;  $c$  代表探测器本底, 也不随环境温度变化;  $b$  代表仪器辐射和暗电流, 是环境温度的函数。

如果模型稳定, 参数  $a$ 、 $c$  不应存在与温度相关的变化。为了评估参数  $a$ 、 $c$  的稳定性, 对高低温实验和外场实验的参数  $a$ 、 $c$  拟合结果进行统计分析, 定义参数  $a$ 、 $c$  的相对变化为:

$$\Delta a = \frac{\text{rms}(a)}{a}$$

$$\Delta c = \frac{\text{rms}(c)}{c} \quad (4)$$

按照公式(4)对表 2 中的拟合参数  $a$ 、 $c$  进行统计分析, 可以得到,  $\Delta a=0.36\%$ 、 $\Delta c=0.49\%$ , 由此可见, 在不同环境温度、不同测量条件下,  $a$ 、 $c$  参数变化很小。

如果环境温度变化的过程中, 仪器的发射率不发生变化, 则表征仪器辐射的参数  $b$  随温度的变化规律应该符合普朗克函数的规律, 对高低温环境实验中参数  $b$  的估计量进行拟合, 并同外场定标参数  $b$  进行比较, 结果如图 2 所示。

拟合曲线和数据的相关系数  $R$ -square 接近 1, RMSE 为 0.034, 外场定标参数  $b$  同拟合曲线符合的很好, 由此表明, 参数  $b$  随温度的变化规律符合普朗克函数。

根据以上分析, 在不同的环境下, 二元定标模型精度和稳定度都很高。在外场环境温度恒定或者仪器稳定控温的条件下, 二元模型可以用于天空背景

及其起伏的高精度测量。

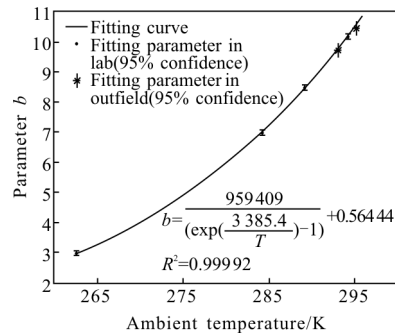


图 2 仪器辐射随环境温度变化曲线

Fig.2 Changes of instrument radiation with ambient temperature

### 6 三元定标模型及外场实验验证

#### 6.1 三元定标模型

尽管在环境温度稳定的条件下, 用公式(3)中的二元模型进行定标可以达到很高的精度和准确度。但是, 外场环境温度并不能由人所控制, 目标观测和定标观测两个时间段之间由于环境温度变化导致的仪器辐射的变化会给测量工作引入误差。

由对二元模型参数  $b$  变化规律的分析结果可知, 在观测过程中, 仪器辐射随环境温度按黑体辐射规律变化。基于此, 对公式(3)中的模型进行改进, 引入环境温度变量(第三个变量), 可得如下三元定标模型:

$$I_{ij} = a_{ij} \cdot t \cdot L_s + b_{ij} \cdot t \cdot L_{amb} + c_{ij} \cdot t + d_{ij} \quad (5)$$

式中:  $a_{ij}$ 、 $b_{ij}$ 、 $c_{ij}$ 、 $d_{ij}$  是系数;  $L_s$  为信号 (定标黑体或天空) 在波段内积分辐射亮度;  $L_{amb}$  为对应温度黑体在波段内积分辐射亮度。公式(5)右边由四项组成。第一项是系统对目标的响应项, 系数  $a_{ij}$  表征测试系统对目标单位时间的响应度。第二项表征仪器辐射的时间累积, 与环境温度相关, 单位时间响应系数是  $b_{ij}$ 。第三项是仅随时间积累的项, 表征探测器的暗电流以及不随环境温度改变的部分仪器辐射,  $c_{ij}$  是单位时间响应系数。第四项, 是截距项, 参数  $d_{ij}$  代表探测器的截距。

显然, 相比于二元模型, 三元模型更加完备, 各参数有清晰明确的物理意义。

根据公式(5)中的三元定标模型对 2016 年 07 月 07 日的高低温箱中不同环境温度下的实验数据进行拟合, 得到各拟合参数估计结果如表 3 所示。

表 3 三元模型拟合参数估计

Tab.3 Estimation of fitting parameters of trivariate model

Parameter	$a(\times 10^5)$	$b(\times 10^4)$	$c$	$d(\times 10^3)$	R-square	RMSE
Value	3.694±0.016	9.530±0.075	0.503±0.09	3.810±0.007	1.000	14.665

注:统一取小数点后三位有效数字

表 3 中参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  所对应列的值为参数的点估计值和 95%置信度的区间估计,从拟合结果看,四个参数的置信区间都很小,这表明拟合参数估计量的可信程度很高; $R$ -square 为 1.000,模型和数据的拟合度很高。三元模型参数  $a$  和  $d$  分别对应于二元模型参数的  $a$  和  $c$ ,相对于表 2 中的参数  $a$  和  $c$  的平均值,相对偏差分别为 0.08%和 0.29%;在确定温度下三元模型退化为二元模型,可得到表 2 中某一环境温度下的二元模型参数  $b$ ,相应表达式如下:

$$b^* = b \cdot I_{amb} + c \quad (6)$$

式中: $b^*$  表示由三元模型退化为二元模型后的合成参数; $b$ 、 $c$  表示三元模型参数。

根据公式(6),将表 3 中的三元模型退化成二元模型,将所得参数  $b^*$  同表 2 中相应的参数  $b$  进行比较,如表 4 所示。

表 4 三元模型退化参数  $b^*$  和二元模型参数  $b$  的比较

Tab.4 Comparison between composite parameter  $b^*$  of trivariate model and parameter  $b$  of bivariate model

Ambient temperature/°C	Parameter $b$ of bivariate model	Composite parameter $b^*$ of trivariate model	Deviation of parameter $b$
Lab -10.6	2.984±0.067	3.026	0.042(1.4%)
Lab 11.1	6.978±0.087	7.027	0.049(0.7%)
Lab 16.0	8.487±0.088	8.460	-0.027(0.3%)
Lab 21.0	10.193±0.092	10.148	-0.045(0.4%)
Outfield 19.9	9.734±0.246	9.749	0.015(0.2%)
Outfield 22.0	10.442±0.425	10.518	0.076(0.7%)

在不同环境温度下,将三元模型退化为二元模型后,模型参数  $b$  的平均相对偏差为 0.6%。

综合以上分析结果,三元模型退化为某温度的二元模型后,三个模型参数的相对偏差均小于 0.6%。这说明,三元模型和二元模型,表征的物理过程是相似的。区别仅在于,若限制环境温度的变化,三元模型中

仪器辐射项为稳恒值,三元模型退化为二元模型;若环境温度可变,定标必须采用三元模型。

### 6.2 外场天空亮度测量

采用三元模型,于 2016 年 08 月 14 日晚,在云南省澄江县抚仙湖观测站对 3~5  $\mu\text{m}$  波段天空亮度进行了实测。分别对天空亮度的时间变化和空间变化进行了测量。

时间变化的测量在正天顶方向,从 21:03~21:13,连续观测 10 min,期间环境温度 22.8  $^{\circ}\text{C}$ ;

空间变化的测量从正天顶到 60°天顶角进行扫描观测,时间从 21:33~21:42,历时 9 min,期间环境温度为 22.6  $^{\circ}\text{C}$ ;

现场定标观测从 22:10~22:32,历时 22 min,期间环境温度为 22  $^{\circ}\text{C}$ ,定标模型参数见表 2。

为了表征信号的微弱起伏变化,实测实验采用了相对长的曝光时间;时变信号测量时,曝光时间选用 12.8  $\mu\text{s}$ ,空变信号测量时,曝光时间选用 11.52  $\mu\text{s}$ 。同样的曝光时间,由于黑体亮度远高于天空,定标时均超出探测器的线性区,因此一元线性测量法已经无法完成测量,以下实测结果分别是二元模型和三元模型得到。

图 3(a)是天空亮度随时间变化的测量结果,图 3(b)是天空亮度随天顶角变化的测量结果,采用二元模型和三元模型,测量结果略有差异;图 3(c)是时变曲线的局部放大,曲线已经能够表征天空亮度随时间变化的细微的起伏。

测量显示,采用二元定标模型现场定标测得的天空亮度比三元模型的结果整体约高了 3%。因为使用三元定标模型,可以将天空测量时的环境温度代入模型,测量结果不受环境温度变化的影响;而使用二元定标模型时,天空测量和定标测量前后相隔 30 min,环境温度发生了变化(定标时比实测时环境温度低了 0.6  $^{\circ}\text{C}$ ),产生了误差。实测结果表明,在没有对仪器进行温控的情况下,使用三元模型进行定标,可以克服由于目标观测和定标观测之间仪器辐

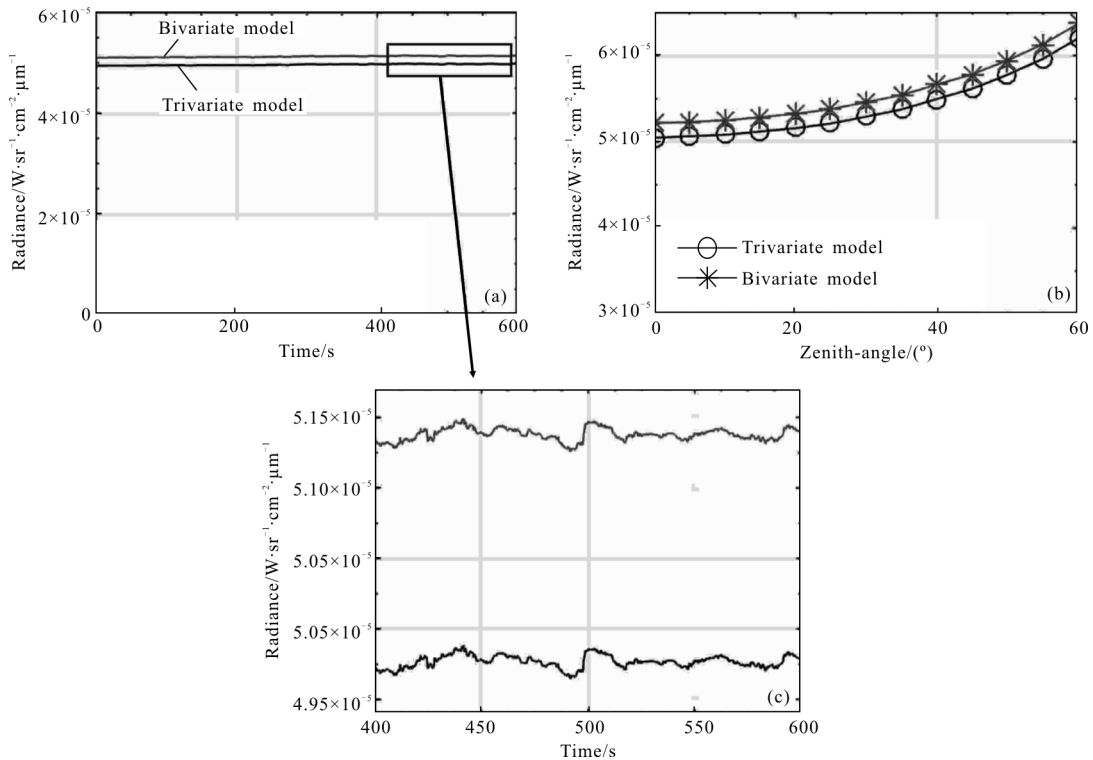


图 3 红外天空亮度测量结果

Fig.3 Result of the measurement of infrared sky brightness

射差异带来的系统误差,提高了测量精度;同时,只需测量外场的环境温度,不需要进行外场辐射定标,提高了观测效率。

### 7 结论

文从天空亮度的测量需要出发,发现传统一元线性定标法存在诸多问题;限于红外探测器狭窄的线性区间,使用一元线性模型的仪器难以适应大动态信号的测量需求;文中增加积分时间变量,建立了红外信号测量的二元定标法。二元模型允许调整测量的积分时间,从而使测试大动态范围信号成为可能。二元模型参数  $a$ 、 $c$  在不同的温度环境下很稳定,实测模型参数  $a$ 、 $c$  相对变化分别为  $\Delta a=0.35\%$ 、 $\Delta c=0.49\%$ ;模型参数  $b$  随环境温度变化而变化,在环境温度不变时,二元模型是稳定的。

红外微弱信号测量时,仪器辐射是相对大的量;环境温度变化导致仪器辐射发生变化,严重干扰测量结果。文中提出了红外测量的三元定标法,实测三元模型的  $a$ 、 $b$ 、 $d$  三个参数相对不确定度均小于 0.82%;当环境维持某一温度时,三元模型可以退化

为二元模型,模型各参数相对偏差小于 0.6%。三元定标法可以把环境温度对测试装置的影响分离出来,实际测量时,只需记录环境温度,就能够扣除环境温度变化造成的仪器辐射变化对测量结果的影响。因此,三元模型解决了环境温度变化影响测量结果的问题。

文中所提定标模型,可以广泛地应用于高精度红外信号测量,例如精确测温、暗弱目标的辐射特性测量、宽动态范围目标的辐射特性测量等。

### 参考文献:

- [1] Glasse A, Casali M. Infrared measurements of the sky noise power spectrum at Mauna Kea [C]//Future Observational Directions, 1993.
- [2] Smith C H, Harper D A. Mid-infrared sky brightness site testing at the South Pole [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1998, 748(110): 747-753.
- [3] Mariani Z, Strong K, Wolff M, et al. Infrared measurements in the arctic using two atmospheric emitted radiance interferometers [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(2): 329-344.

- [4] Wei Heli, Chen Xiuhong, Dai Congming, et al. Ground-based measurements of infrared atmospheric background spectral radiances[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 284-290. (in Chinese)  
魏合理, 陈秀红, 戴聪明, 等. 地基大气背景红外光谱辐射特性测量 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 284-290.
- [5] Wang Dong, Zhao Wei, Chen Yong, et al. Measurement of sky background infrared radiant intensity and analysis of its effect on target detection [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(9): 774-779. (in Chinese)  
王东, 赵威, 陈勇, 等. 天空背景红外辐射亮度测量及其对目标探测的影响分析 [J]. 红外技术, 2015, 37(9): 774-779.
- [6] Wang Rui, Shao Xiaopeng, Xu Jun, et al. Study on improving dynamic range of infrared imaging system based on calibrating integration time [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(7): 381-385. (in Chinese)  
王锐, 邵晓鹏, 徐军, 等. 基于定标积分时间法提高红外成像系统动态范围的研究[J]. 红外技术, 2009, 31(7): 381-385.
- [7] Luo Maojie, Zhou Jinmei, Fu Jingneng, et al. Integration time as variable for radiometric calibration of infrared system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 36-40. (in Chinese)  
罗茂捷, 周金梅, 傅景能, 等. 考虑积分时间变量的红外系统辐射响应定标[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 36-40.
- [8] Kurt Sköld, David L Price, Neutron Scutlering [M]//Martonl, Marton C. Methods of Experimental Physics Orlando, Academic Press Inc, 1987.
- [9] Yan Peipei, Li Gang, Liu Kai, et al. Stray light suppression of different ground-based photoelectric detection systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 917-922. (in Chinese)  
闫佩佩, 李刚, 刘凯, 等. 不同结构地基光电探测系统的杂散光抑制[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 917-922.
- [10] Cao Lihua, Li Ning, Yang Ciyin, et al. Radiance calibration for 3-5  $\mu\text{m}$  infrared detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 858-864. (in Chinese)  
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(2): 858-864.
- [11] Liang Chao, Ma Tianxiang. Design of infrared imaging nonuniformity correction system based on black body calibration [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 385-393. (in Chinese)  
梁超, 马天翔. 基于黑体标定的红外图像非均匀性校正系统设计[J]. 中国光学, 2016, 9(3): 385-393.
- [12] Li Bin, Wu Haiying, Wang Wentao, et al. Design of a simple infrared calibration system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 458-463. (in Chinese)  
李斌, 吴海英, 王文涛, 等. 一种简易红外标定系统的设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 458-463.
- [13] Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei, et al. Radiation calibration of infrared system by amendment of inner and outer calibrations[J]. *Opt Precision Eng*, 2015, 23(2): 356-362. (in Chinese)  
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.
- [14] Yang Ciyin, Zhang Jianping, Cao Lihua. Infrared radiation measurement based on proportional corrected atmospheric transmittance [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(7): 1626-1635. (in Chinese)  
杨词银, 张建萍, 曹立华. 基于大气透过率比例校正的目标辐射测量[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1626-1635.