

基于参考源的空间目标红外辐射特性测量

陈 川^{1,2}, 易维宁^{1*}, 崔文煜¹

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘 要:地基测量是获取空间目标红外辐射特性的主要手段。地基测量由于大气影响,测量结果含有严重误差。利用由大气光学参数测量设备和辐射传输软件构成的大气同步修正系统,可以减小大气影响引入的误差。然而,由于典型大气模式和测量参数精度限制,经大气修正后的测量误差仍高于 20%。提出一种基于红外标准星的辐射测量方法,使用与目标具有相近观测仰角的红外标准星作为参考源,准确获取空间目标观测光路上的透过率,分析了水汽、臭氧和观测仰角对透过率精度的影响。进行了红外星测量实验,利用文中方法测量的目标辐射误差为 4.65%,明显优于传统方法的 14.57%。结果说明文中方法能作为一种获取空间目标红外辐射的有效途径。

关键词: 辐射测量; 红外星; 空间目标

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0804004

Measurement of infrared radiation characteristics of spatial target based on reference source

Chen Chuan^{1,2}, Yi Weining^{1*}, Cui Wenyu¹

- (1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Ground-based measurement is a principal method to obtain the infrared radiation characteristics of spatial target. The measuring result contains significant deviation caused by the atmosphere's influence. The deviation can be reduced by using atmospheric synchronous correction system, which is composed of atmospheric optical parameters measurement equipment and radiation transfer software. However, due to the restriction of typical atmosphere models and precision of measured parameters, the corrected measurement accuracy is also greater than 20%. A radiation measurement method based on infrared standard star was proposed by using standard star which view pitch angle approximated to spatial target's as a reference source, which could obtain precisely the transmittance of optical path from measurement system to spatial target, and the transmittance accuracy affected by water vapor, ozone and observation elevation were analyzed. The experiment of measuring the infrared stars was carried out. The radiation error of the target measured by this method is 4.65%, which is better than the classic method's 14.57%.

收稿日期: 2018-03-13; 修订日期: 2018-04-17

基金项目: 中国科学院创新基金(CXJJ-17S004)

作者简介: 陈川(1989-), 男, 博士生, 主要从事目标红外辐射特性测量、全链路成像仿真方面的研究。Email: chuanch@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 易维宁(1956-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事遥感信息处理方面的研究。Email: yiwn@aiofm.ac.cn

The result shows that the proposed method can provide an effective way for acquisition of infrared radiation characteristics of spatial target.

Key words: radiation measurement; infrared star; spatial target

0 引言

空间目标的红外辐射特性及其变化规律是推断目标性质及其在轨工作状态的重要信息, 能为目标识别提供重要的依据^[1]。

目前, 地基测量系统是获取空间目标红外辐射特性的主要手段^[2]。利用地基测量系统对空间目标进行测量时, 由于大气的吸收和散射作用, 目标发出的红外辐射受到衰减并叠加大气自身的辐射而到达测量系统, 使得测量系统接收到的目标辐射信息失真。为得到空间目标本征辐射特性, 在反演过程中必须对测量数据进行大气订正^[3]。

通常将实测的大气光学参数, 如能见度、气溶胶廓线、温湿压等, 作为 MODTRAN、6S 等大气辐射传输软件的输入来计算大气透过率和程辐射。魏合理^[4]等人研制了目标辐射特性测量大气传输修正系统, 使用中分辨率通用辐射大气传输计算软件 (CART) 计算大气透过率和程辐射, 并对中波和长波红外波段大气传输修正精度做了定量评估。然而国内幅员辽阔, 不同地区的大气条件差异显著, 仅依靠几种统计得来的标准大气模式难以描述千变万化的实时大气现象, 使用标准大气模式计算的大气透过率误差可能会高达 30%^[5]。而且大气光学参数测量设备组成复杂, 对于具有较高机动性要求的野外流动测量站点, 存在运输困难、系统复杂等问题。

为了抑制大气透过率带来的测量误差, 杨词银等^[6]在目标附近的放置参考黑体, 实时测量目标与测量系统之间的大气透过率, 能够提升目标辐射测量精度。通过标准比较修正大气影响的思路是可行的, 但在实际探测应用中, 难以在空间目标附近放置标准黑体标准源。文中提出以标准红外星作为大气辐射修正的参考源, 结合大气参数的空间变化特性和对透过率的影响, 分析了水汽、臭氧和观测仰角对测量结果的影响, 论证了空间目标与特定参考源在探测路径上大气辐射影响的一定程度可等效性, 以及该方法的实际可行性。最后, 进行空间目标的测量

实验, 分别利用传统大气修正方法和参考源法反演空间目标的红外辐射, 并对结果进行了分析。

1 地基空间目标辐射测量

1.1 测量系统

地基红外辐射测量系统由成像系统、大气参数测量系统、辐射定标系统和数据处理软件四部分组成, 如图 1 所示。红外成像系统由工作中波(3~5 μm)和长波(7~9.5 μm)的大口径(直径 1 m)望远镜组成, 完成目标的红外图像采集; 大气测量系统由激光雷达、能见度仪和自动气象站组成, 完成能见度、气溶胶廓线、温湿压等大气光学参数的同步采集; 相机辐射定标系统包括低温面源黑体、高温腔式黑体和并行光管, 完成相机在大动态范围内的绝对辐射定标; 数据处理软件主要由标定模块和反演模块构成, 分别完成相机绝对辐射定标和目标提取、红外辐射反演。

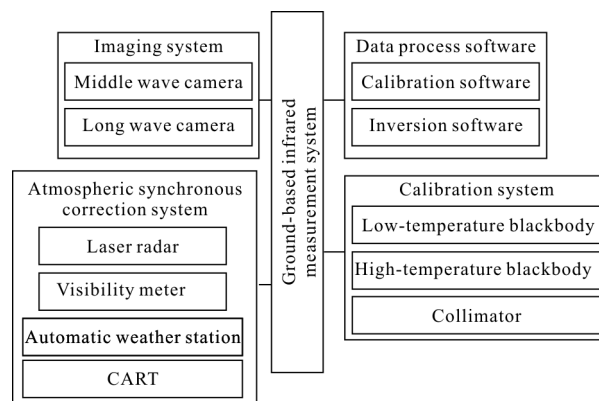


图 1 地基红外辐射测量系统

Fig.1 Ground-based infrared radiation measurement system

使用地基红外辐射测量系统进行辐射测量包括三个步骤: 第一步, 辐射定标, 确定探测器输出 DN 值与输入辐射的数值关系; 第二步, 使用红外相机对目标进行跟踪测量, 获取目标的红外数字图像, 同时测量大气的光学参数; 第三步, 红外辐射特性反演, 首先通过大气辐射传输软件计算目标与测量系统之间的大气透过率与程辐射, 然后由红外图像反演目

标的辐亮度、等效黑体温度、辐射强度等红外辐射特性。实际测量任务中,进行目标测量时的相机状态如积分时间、滤光片档位等未知,可以将第一、二步互换,只需对测量用到的相机状态进行辐射定标。

1.2 测量原理

空间目标发出的红外辐射通过大气层,受大气的吸收、散射作用而衰减,同时叠加大气自身红外辐射,到达红外相机并在传感器上形成数字图像,其成像模型可表示为:

$$DN_i = k * (\tau_\alpha * L_i + L_{path}) + b \quad (1)$$

式中: DN_i 为数字图像中目标的灰度值; k 和 b 分别为红外探测器的辐亮度响应和偏置,可通过对测量系统进行绝对辐射定标获得; L_i 为目标发出的有效红外辐射; τ_α 和 L_{path} 分别为测量系统与目标之间的透过率和大气自身红外辐射,可通过大气辐射传输软件计算得到。由公式(1)可反演得到目标的红外辐亮度为:

$$L_i = \frac{DN_i - b}{k} - L_{path} \quad (2)$$

另外,目标周围背景区域的探测器响应 DN_{bg} 由大气自身的红外辐射引起,可表示为:

$$DN_{bg} = k * L_{path} + b \quad (3)$$

可由公式(3)计算得到大气程辐射,代替辐射传输软件计算得到的程辐射,减少大气程辐射计算误差对测量结果的影响。

根据公式(2)、(3)反演得到目标的有效辐射:

$$L_i = \frac{DN_i - DN_{bg}}{k * \tau_\alpha} \quad (4)$$

根据公式(4)可知,目标红外辐射的测量精度主要依赖于探测器输出 DN ,传感器的辐亮度响应 k 和观测路径上的大气透过率。多次使用红外相机对相同温度的面源黑体进行测量,探测器输出 DN 值的标准差小于1%;红外辐射测量系统定标系数精度小于7%^[3];大气透过率的计算精度严重依赖于大气光学参数的测量精度和辐射传输软件的计算精度,较差天气情况下可能会超过30%;在天气较好的高纬度观测,可优于15%,大气透过率的测量精度一般取20%^[5]。综上,目标红外辐射测量的测量精度为21.24%。

从上述分析中可以看出,空间目标辐射特性测量的精度主要来自于大气透过率的计算精度。因此,文中提出一种基于空间参考源的红外辐射测量方法,利用与目标具有相近仰角的红外标准星计算观测路径上的透过率,取代传统方法中使用辐射传输软件计算的透过率,进而提高测量精度。

2 基于空间参考源的测量方法

基于空间参考源的红外辐射测量方法原理如图2所示。首先使用测量系统对仰角为 α 的空间目标进行测量,获得目标的红外数字图像;然后根据红外标准星星历,寻找与目标具有相近仰角 α' 的红外标准星,快速调整测量系统的方位角和仰角,对红外标准星进行测量;利用红外标准星的测量结果,根据公式(2)计算得到仰角 α' 下的大气透过率 $\tau_{\alpha'}$ 。

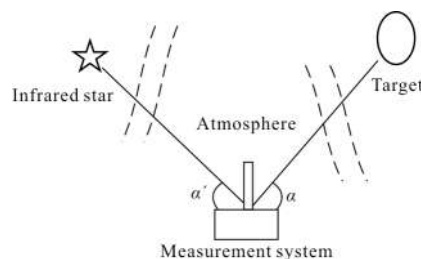


图 2 基于红外星的辐射测量方法原理图

Fig.2 Schematic diagram based on infrared star radiation measurement method

$$\tau_{\alpha'} = \frac{DN_{star} - DN_{star,bg}}{L_{s,star}} \quad (5)$$

式中: DN_{star} 和 $DN_{star,bg}$ 为红外星和红外星周围背景区域的灰度值; $L_{s,star}$ 为星库中红外星的辐射标称值。

与垂直方向呈 θ 夹角的光路上的透过率 τ 和光学厚度 δ 之间的关系可表示为:

$$\tau = e^{-\delta \sec(\theta)} \quad (6)$$

根据公式(5)、(6)可将仰角为 α 空间目标光路上的透过率表示为:

$$\tau_\alpha = e^{\frac{\sec(\pi/2-\alpha)}{\sec(\pi/2-\alpha')}} \ln \frac{DN_{star} - DN_{star,bg}}{L_{s,star}} \quad (7)$$

使用公式(7)计算的大气透过率对根据公式(4)反演目标的辐亮度:

$$L_{\text{target}} = \frac{DN_t - DN_{t, \text{bg}}}{k * e^{\frac{\sec(\pi/2 - \alpha)}{\sec(\pi/2 - \alpha')}} \ln \frac{DN_{\text{star}} - DN_{\text{star, bg}}}{L_{s, \text{star}}}} \quad (8)$$

从公式(8)中可以看出,空间目标的红外辐射测量精度主要依赖于探测器输出 DN 值、探测器绝对辐射定标系数 k 和红外星库中标准星的标称值 L_{target} 。

特别是,当红外星与空间目标具有相近仰角时,即 $\alpha \approx \alpha'$, 可直接使用红外星光路上的透过率 $\tau_{\alpha'}$ 作为空间目标光路上的透过率 τ_{α} , 有:

$$L_{\text{target}} = \frac{DN_{\text{target}} - DN_{\text{target, bg}}}{DN_{\text{star}} - DN_{\text{star, bg}}} * L_{s, \text{star}} \quad (9)$$

此时测量精度与探测器的绝对定标系数 k 无关,而与红外星光路上的透过率 $\tau_{\alpha'}$ 和目标光路上透过率 τ_{α} 之间的相对误差 $\xi(\tau_{\alpha}, \tau_{\alpha'})$ 相关,其中:

$$\xi(\tau_{\alpha}, \tau_{\alpha'}) = \frac{\text{abs}(\tau_{\alpha} - \tau_{\alpha'})}{\tau_{\alpha}} \times 100\% \quad (10)$$

当 $\xi(\tau_{\alpha}, \tau_{\alpha'})$ 小于探测器绝对辐射定标精度时,可采用公式(9)进行目标辐射反演。使用参考源方法测量空间目标的红外辐射, 避开了大气透过率测量引入的误差,提高了辐射反演精度,并且不需要大气同步测量系统,减少了测量系统的复杂程度,对于野外流动测量站点十分便利。

该方法中,能否方便获取作为参考源的标准星是十分重要的。近年来,国外已实施多个地基、空基以及天基的红外巡天观测计划,生成的红外星表覆盖了各个波段^[7]。大视场红外搜寻探测器^[8](Wide-field Infrared Survey Explorer, WISE)在中波波段完成了对 99%天空的搜索,其星表包含超过 5 亿颗目标的位置和测光信息;红外线天文卫星^[9](AKARI)在长波波段完成了对 96%的天空的搜索,生成的 AKARI/IRC 点源星表包含 844 649 个目标的位置和测光信息。这些数据目前是公开的。国内已知的红外标准星库相对国外而言,标准星数量有限、辐射照度覆盖波段范围较小,分布密集度较低。但是随着我国星库的不断扩展,可用于文中测量方法的标准星数据也会越来越完备。

3 透过率影响因素分析

使用参考源法测量空间目标辐射特性,假定测量站点附近的局域大气是平面平行的,即大气参数

(温度和气体分布廓线)只在垂直方向(即高度和气压)上变化,而在观测站点周围的方位圆上均匀分布^[6]。这种假定在物理意义上是适当的,但是在实际测量站点周围大气参数并非均匀分布,可能存在因两条光路上红外吸收气体的含量不同的情况,在使用公式(7)计算空间目标观测光路上的透过率会引入误差。因此需分析两条观测光路上因吸收气体含量不同而引起的透过率误差,这些气体主要包括水汽和臭氧。

3.1 水汽对透过率的影响

水汽是地球大气中主要的辐射和动力要素,90%以上的水汽分布在约 500 hPa 高度下的大气中,其浓度分布随空间变化较大,主要取决于对流层的局地水文循环和大尺度输送过程。使用参考源法对空间目标进行观测时,需考虑两条光路上水汽柱浓度差异对 τ_{α} 的影响。以西北戈壁中的某测量站点为例,假定空间目标观测光路上的水汽柱浓度 $C_{h_2, o, t}$ 为该站点年平均值 0.2 gm/cm², 大气模式为中纬度夏季,气溶胶模式为沙漠型,能见度 23 km,观测海拔 200 m,观测仰角 30°时,使用 MODTRAN 计算中波(3~5 μm)在水汽柱浓度在 $C_{h_2, o, t} \pm 30\%$ 范围(即 0.14~0.26 gm/cm²)时的透过率 $C_{h_2, o, t}$, 及该透过率与年平均水汽柱浓度下透过率 $\tau_{h_2, o, t}$ 之间的相对差异 $\xi(\tau_{h_2, o}, \tau_{h_2, o, t})$, 计算结果如图 3 所示。

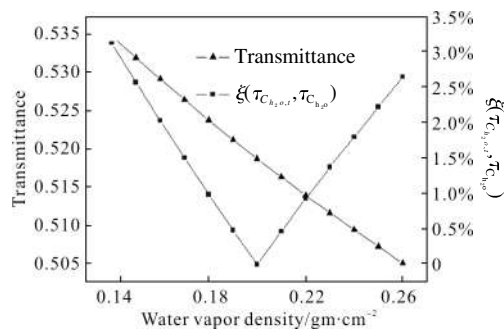


图 3 透过率随水汽柱浓度的变化

Fig.3 Variation of transmittance with the water vapor column density

从图 3 中可以看出,透过率随水汽含量的增大而降低,水汽含量越低,因相同水汽含量变化引起的透过率变化越大。当红外星与空间目标两条观测光路上水汽含量相对差异不大于 30%时,根据公式(7)计算的透过率误差小于 3.12%。

3.2 臭氧对透过率的影响

臭氧主要出现在 15~30 km 的高度范围内,且

在空间上具有较大的变化。使用测量系统进行较低仰角(小于 45°)测量时,光路会穿过离测量站点水平距离 30 km 外的大气层上空,使用参考源法对空间目标进行测量时,需考虑两条光路上臭氧含量差异对 τ_α 的影响。以上述西北戈壁某测量站点为例,假定大气模式为中纬度夏季,气溶胶模式为沙漠型,能见度 23 km,观测海拔 200 m,观测仰角 30°时,使用 MODTRAN 计算中波(3~5 μm)在臭氧含量在默认值 $C_{O_3, \text{default}}$ 的 0.5~1.5 倍范围内的大气透过率 $\tau_{C_{O_3}}$ 及该透过率与臭氧含量在默认值时的透过率 $\tau_{C_{O_3, \text{default}}}$ 之间的相对差异 $\xi(\tau_{C_{O_3, \text{default}}}, \tau_{C_{O_3}})$, 计算结果如图 4 所示。

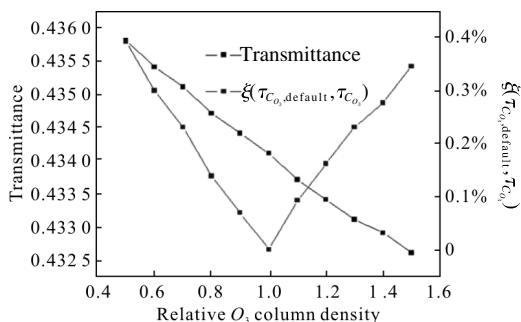


图 4 透过率随臭氧相对柱浓度的变化

Fig.4 Variation of transmittance with the ozone column density

从图 4 中可以看出,透过率随臭氧含量的增高而降低,以 MODTRAN 默认的臭氧含量为参考值,当臭氧含量在其 0.5~1.5 倍之间时,因臭氧含量引起的透过率变化小于 0.4%。臭氧含量变化对透过率的影响小于水汽含量变化的影响。

3.3 观测仰角对透过率的影响

特别的,当使用公式(9)反演目标红外辐射时,还应考虑 $\xi(\tau_\alpha, \tau_{\alpha'})$ 对测量结果的影响。假设在目标测量时大气稳定,水汽、臭氧等吸收气体在测量站点的方位圆上均匀分布,则大气透过率只与观测仰角相关。假定大气模式为中纬度夏季,气溶胶模式为沙漠型,能见度 23 km,观测海拔 200 m,观测仰角 30°,使用 MODTRAN 计算中波(3~5 μm)在不同观测仰角下的透过率,计算结果如图 5 所示。

从图中可以看出,随着观测仰角增大,光线经过的光路变短,透过率越来越高,透过率的变化速度逐渐缓慢,趋于稳定。空间目标与红外星观测光路上的透过率相对误差 $\xi(\tau_\alpha, \tau_{\alpha'})$ 分布如图 6 所示。其中, X 轴表

示空间目标观测仰角 α , Y 轴表示红外星观测仰角 α' , Z 轴表示红外星光路上的透过率 $\tau_{\alpha'}$ 和目标光路上透过率 τ_α 之间的相对误差 $\xi(\tau_\alpha, \tau_{\alpha'})$ 。

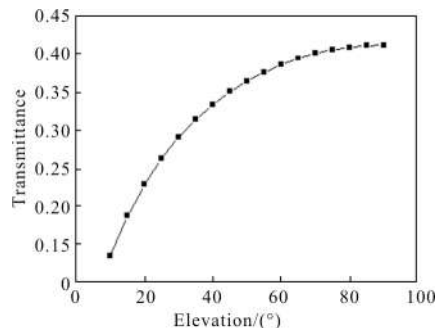


图 5 透过率 τ_α 随观测仰角的变化

Fig.5 Variation of transmittance with observation elevation

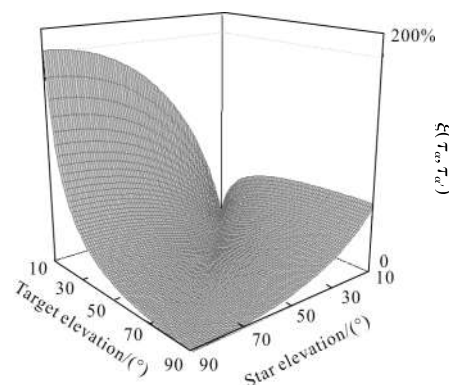


图 6 τ_α 与 $\tau_{\alpha'}$ 之间的相对误差随仰角的分布

Fig.6 Distribution of relative error between τ_α and $\tau_{\alpha'}$ with elevation

从图中可以看出,当仰角较大时,可使用较大仰角范围内的红外星计算的透过率来反演目标;随着仰角的降低,透过率相对误差 $\xi(\tau_\alpha, \tau_{\alpha'})$ 变化加快。当目标仰角小于 25°时,超过 2°的仰角变化都会引起透过率较大的变化;当目标仰角为 30°时,使用 $\pm 5^\circ$ 仰角范围内的红外星计算透过率误差最大可达 10.99%;当目标仰角为 70°时,使用 [90~60°] 仰角范围内的红外星做参考,引入的透过率误差小于 3.4%,该误差远小于辐射传输软件计算的大气透过率误差。

4 辐射测量实验

为验证该方法的有效性,使用西北地区某地基红外辐射测量系统对多颗红外标准星进行了辐射测量和反演实验。该相机测量波段为 3.4~5.12 μm ,标准星的红外图像如图 7 所示。根据大气参数测量系

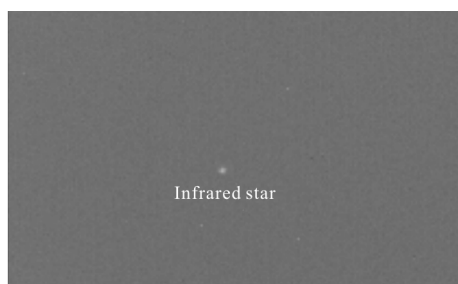


图 7 标准星红外图像

Fig.7 Infrared image of standard star

统同步获取大气光学参数,使用 CART 软件计算不同仰角上的大气透过率,并基于该透过率使用传统方法反演标准星的红外辐射;然后根据标准星的仰角分布结合透过率相对误差随仰角的变化,将标准星分为四组,选取组内第一颗标准星做参考源,根据公式(5)计算该仰角下的大气透过率,最后分别根据公式(8)、(9)反演组内其他标准星的红外辐射。表 1 给出了传统反演方法的反演结果,表 2、表 3 分别给出了根据公式(9)、(8)的反演结果。

表 1 基于 CART 计算透过率的辐射测量结果

Tab.1 Radiation measuring results based on CART calculated transmittance

Group No.	Elevation/ (°)	Azimuth/ (°)	Transmittance calculated by CART	Irradiance/W·m ⁻²		Relative errors
				Nominal values	Retrieval values	
1	29.04	13.32	0.559	2.93×10 ⁻¹¹	3.36×10 ⁻¹¹	14.63%
	29.30	261.90	0.559	2.34×10 ⁻¹¹	2.84×10 ⁻¹¹	21.55%
	31.07	154.09	0.559	2.77×10 ⁻¹¹	3.15×10 ⁻¹¹	13.65%
2	44.23	106.76	0.601	1.64×10 ⁻¹¹	1.86×10 ⁻¹¹	13.47%
	44.90	46.30	0.607	3.29×10 ⁻¹¹	3.55×10 ⁻¹¹	7.77%
3	54.07	315.41	0.621	1.31×10 ⁻¹¹	1.60×10 ⁻¹¹	22.01%
	54.37	79.64	0.621	1.11×10 ⁻¹¹	1.21×10 ⁻¹¹	9.21%
	63.75	247.59	0.633	1.39×10 ⁻¹¹	1.58×10 ⁻¹¹	13.34%
4	64.73	113.74	0.634	1.21×10 ⁻¹¹	1.45×10 ⁻¹¹	19.97%
	66.22	83.80	0.635	3.18×10 ⁻¹¹	3.48×10 ⁻¹¹	9.39%
	71.79	19.86	0.639	1.32×10 ⁻¹¹	1.52×10 ⁻¹¹	15.08%
Average error				14.57%		

表 2 基于相近仰角红外星透过率的辐射测量结果

Tab.2 Radiation measuring results based on transmittance of infrared star at approximate elevation

Group No.	Elevation/(°)	Azimuth/(°)	Transmittance of infrared star at approximate elevation	Irradiance/W·m ⁻²		Relative errors
				Nominal values	Retrieval values	
1	29.04	13.32	0.641	2.93×10 ⁻¹¹	2.93×10 ⁻¹¹	0.00%
	29.30	261.90	0.641	2.34×10 ⁻¹¹	2.47×10 ⁻¹¹	5.45%
	31.07	154.09	0.641	2.77×10 ⁻¹¹	2.67×10 ⁻¹¹	3.65%
2	44.23	106.76	0.681	1.64×10 ⁻¹¹	1.64×10 ⁻¹¹	0.00%
	44.90	46.30	0.681	3.29×10 ⁻¹¹	3.15×10 ⁻¹¹	4.26%
3	54.07	315.41	0.759	1.31×10 ⁻¹¹	1.31×10 ⁻¹¹	0.00%
	54.37	79.64	0.759	1.11×10 ⁻¹¹	0.99×10 ⁻¹¹	10.87%
	63.75	247.59	0.719	1.39×10 ⁻¹¹	1.39×10 ⁻¹¹	0.00%
4	64.73	113.74	0.719	1.21×10 ⁻¹¹	1.27×10 ⁻¹¹	5.30%
	66.22	83.80	0.719	3.18×10 ⁻¹¹	3.05×10 ⁻¹¹	4.08%
	71.79	19.86	0.719	1.32×10 ⁻¹¹	1.32×10 ⁻¹¹	0.26%
Average error				4.84%		

表 3 基于红外星推算的透过率的辐射测量结果

Tab.3 Radiation measuring results based on transmittance inversed by infrared star

Group No.	Elevation/ (°)	Azimuth/ (°)	Transmittance inversed by infrared star	Irradiance/W·m ⁻²		Relative errors
				Nominal values	Retrieval values	
1	29.04	13.32	0.641	2.93×10 ⁻¹¹	2.93×10 ⁻¹¹	0.00%
	29.30	261.90	0.644	2.34×10 ⁻¹¹	2.48×10 ⁻¹¹	5.87%
	31.07	154.09	0.660	2.77×10 ⁻¹¹	2.75×10 ⁻¹¹	0.83%
2	44.23	106.76	0.681	1.64×10 ⁻¹¹	1.64×10 ⁻¹¹	0.00%
	44.90	46.30	0.684	3.29×10 ⁻¹¹	3.16×10 ⁻¹¹	3.81%
3	54.07	315.41	0.759	1.31×10 ⁻¹¹	1.31×10 ⁻¹¹	0.00%
	54.37	79.64	0.760	1.11×10 ⁻¹¹	0.99×10 ⁻¹¹	10.75%
	63.75	247.59	0.719	1.39×10 ⁻¹¹	1.39×10 ⁻¹¹	0.00%
4	64.73	113.74	0.722	1.21×10 ⁻¹¹	1.28×10 ⁻¹¹	5.61%
	66.22	83.80	0.724	3.18×10 ⁻¹¹	3.07×10 ⁻¹¹	3.41%
	71.79	19.86	0.734	1.32×10 ⁻¹¹	1.35×10 ⁻¹¹	2.28%
Average error				4.65%		

从反演结果可以看出，传统方法的平均误差为 14.57%，文中方法的反演结果平均误差分别为 4.84% 和 4.65%，均明显优于传统方法。反演结果提高的精度约等于辐射传输软件计算的透过率和使用红外星反演的透过率之间的相对误差，可认为文中的反演方法避免了大气透过率对反演结果的影响，提高了反演精度。

5 结 论

使用辐射传输软件基于大气光学参数的方法来测量透过率，受限于辐射传输软件大气模式和大气光学参数的精度，严重制约了地基红外辐射测量系统的测量精度，且增加了系统的复杂性。文中提出一种基于空间参考源的测量方法，不需要大气光学参数同步测量设备，使用红外标准星计算空间目标光路上的大气透过率来反演目标红外辐射，从而避免了辐射传输软件计算的透过率对测量结果的影响。并分析了水汽、臭氧和观测仰角等因素对空间目标透过率的影响。最后通过对红外标准星进行的测量实验，使用传统方法和文中方法对其做了辐射反演，反演精度为 4.65% 和 4.84%，明显高于传统反演方法的反演精度 14.57%。在实际应用中，空间目标与标准星的成像尺度相当，传输路径上都是用过整层

大气介质，因此在算法上人造空间目标的辐射反演方法与文中提出的标准星反演方法相同。文中方法能够有效抑制大气对的影响，能较好地应用于空间目标的辐射测量，尤其是不便携带大量大气光学参数测量装置的移动测量站点。

参考文献：

- [1] Cui Wenyu, Chen Chuan, Yi Weining. Radiation characteristic inversion of space point source target based on infrared imagery[C]//SPIE, 2015, 9674: 96742Y.
- [2] Wang Guoqiang, Wu Yuanhao. Ground-based measurement on the infrared characteristic of space target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1634-1639. (in Chinese) 王国强, 吴元昊. 空间目标红外辐射特征的地基测量[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(9): 1634-1639.
- [3] Yang Ciyin, Zhang Jianping, Cao Lihua. Infrared radiation measurement based on real-time correction [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, 30(3): 284-288. (in Chinese) 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.
- [4] Wei Heli, Dai Congming. Research of atmospheric transfer correction in radiance measurement: atmospheric transfer correction system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014,

- 43(4): 1019–1024. (in Chinese)
魏合理, 戴聪明. 辐射特性测量大气传输修正研究: 大气传输修正系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1019–1024.
- [5] Wei Heli, Chen Xiuhong, Zhan Jie, et al. Atmospheric correction in measurement of infrared radiance [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 472–478. (in Chinese)
魏合理, 陈秀红, 詹杰, 等. 红外辐射测量的大气修正[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 472–478.
- [6] Liao Guonan, Guo Caili, Zhou Shijian. An Introduction to Atmospheric Radiation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 122–123. (in Chinese)
廖国男, 郭彩丽, 周诗健. 大气辐射导论 [M]. 北京: 气象出版社, 2004: 122–123.
- [7] Huang Chen, Wang Jianjun, Gao Xin, et al. Application of infrared star catalog in ground-based infrared radiation measurement system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2901–2906. (in Chinese)
黄晨, 王建军, 高昕, 等. 红外星表在地基红外辐射测量系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 2901–2906.
- [8] Wright E L, Eisenhardt P R, Mainzer A K, et al. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): mission description and initial on-orbit performance [J]. *Web Science*, 2010, 140(6): 1868–1881.
- [9] Kataza H, Alfageme C, Cassatella A, et al. AKARI/IRC all sky survey point source catalogue version 1.0 [EB/OL]. <http://www.ir.isas.jaxa.jp/AKARI/Observation>, 2010.