

文章编号 1004-924X(2015)06-1547-11

中波红外整层大气透过率测量及误差分析

刘俊池^{1,2}, 李洪文^{1*}, 王建立¹, 殷丽梅¹, 李宏壮¹, 张振铎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:为实现中波红外整层大气透过率的现场测量,提高空间目标红外辐射特性测量精度,研究了基于标准红外自然星的大气透过率测量方法。建立了基于 Beer 定律和 Langley-Plot 定标原理的测量实验数学模型,搭建了基于 1.2 m 口径地基光电望远镜的测量实验系统。采用了“准实时单点校正”“窗口提取”和“信噪比特性曲线”等方法有效降低了红外探测器非均匀性和自然星弥散成像等问题给测量精度带来的影响。最后,分析了测量实验的理论误差。实验数据显示:空间目标大气层外红外辐射照度测量的最大实际误差为 16.28%,中波红外整层大气透过率测量的理论误差为 11.75%。结果表明:基于标准红外自然星的大气透过率测量方法测量误差小,实验系统对外场观测任务适应性强,为空间目标红外辐射特性的地基测量提供了新的解决方案。

关键词:大气透过率测量;红外辐射;空间目标;标准红外自然星;地基大口径望远镜

中图分类号:TP732.2;P407.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152306.1547

Measurement of mid-infrared total atmospheric transmittance and its error analysis

LIU Jun-chi^{1,2}, LI Hong-wen^{1*}, WANG Jian-li¹, YIN Li-mei¹, LI Hong-zhuang¹, ZHANG Zhen-duo¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: lihongwen1970@yahoo.com*

Abstract: To measure the mid-infrared total atmospheric transmittance in a field and to improve the measuring accuracy of infrared radiation of spatial objects, a measuring method based on standard infrared stars was discussed. A mathematical model based on Beer's law and Langley-Plot calibration principle was established, and an experimental system based on the ground-based optic-electric telescope with an aperture of 1.2 m was set up. Then, "Quasi-real-time One-point Correction Method", "Window-extracted Method" and "SNR Characteristic Curve" were employed to reduce the effects of the non-uniformity of detectors and the diffusion imaging of stars on the measuring accuracy. Finally, the error of the measurement in the experiments was analyzed. Experiments and analysis show that the maximum measuring error of the infrared radiation illumination of spatial objects is 16.28%, and the theoretical measuring error of mid-infrared total atmospheric transmittance

收稿日期:2014-06-25;修订日期:2014-08-19.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2013AAXX1009)

is 11.75%. The results indicate that the measuring method proposed in this paper has a smaller measuring error, the experimental system is adapted to observation missions in the field and it provides a new solution for measuring the infrared radiation of spatial objects.

Key words: atmospheric transmittance measurement; infrared radiation; space target; standard infrared star; large-aperture ground-based telescope

1 引言

空间目标的红外辐射特性是目标识别、在轨信息判定的重要依据之一^[1-2]。红外辐射特性包括目标的温度和辐射照度等信息,通常采用地基测量方法进行测量。在地基测量中,获得高精度的中波红外整层大气透过率意义重大。

目前,中波红外大气透过率的获取途径主要有 3 种:大气模式计算法、二次修正的大气模式计算法以及直接测量法。大气模式计算法应用大气辐射传输计算软件,针对典型的大气模式由地面能见度、大气温湿压等参数计算大气透过率。MODTRAN 是国外较成熟的大气辐射传输计算软件,国内主要有安徽光机所的魏合理等人编制的通用辐射传输软件 CART^[5]。二次修正的大气模式计算法是对基于传统的大气模式计算法进行特定条件下的测量修正。典型的测量修正方法利用高精度的面源黑体模拟标准目标对大气透过率进行现场测量,根据现场测量结果对传统的大气模式计算法的计算结果进行二次修正。长春光机所的杨词银等人建立了大气透过率比例校正数学模型,并基于该模型对大气透过率做了二次测量修正^[6-8]。赵军等人讨论了野外远场测量中大气透过率的修正问题^[9]。李云红等人应用大气透过率的二次修正提高了红外热像仪的外场测温精度^[10]。直接测量法分为红外光谱透过率测量和宽带内平均透过率测量。魏合理、詹杰等人研制了昼夜兼用的可见光波段的大气光谱透过率测量仪^[11-12]。臧寿洪等人建立了红外波段大气透过率分段测量的数学模型^[13]。

不过,上述 3 种方法均存在局限性。其中,大气模式计算法受地面大气参数的测量精度影响较大,且辅助测量设备多,系统成本较高;二次修正的大气模式计算法受限于修正辐射源,无法测量整层大气透过率;传统的直接测量法需要面源黑体定标红外光电系统的绝对辐射响应度,受限于加工工艺,面源黑体尺寸无法覆盖地基大口径望

远镜光学系统的入瞳^[14-15]。因此,本文提出了一种基于标准红外自然星的中波红外整层大气透过率测量方法,该方法可直接应用于红外光电系统的绝对辐射响应度定标和空间目标的红外辐射特性测量。

2 测量原理与数学模型

根据红外辐射响应原理,红外光电系统对标准红外自然星的成像测量模型为:

$$DN = a \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot \tau_{\text{opt}} \cdot \Omega_s \cdot A_0 \cdot (E_{\text{star}} + E_{\text{sky}} + E_{\text{opt}}) + DN_0, \quad (1)$$

其中:DN 为红外光电系统对标准红外自然星成像的输出灰度值; a 为系统绝对辐射响应度; τ_{atm} 为大气透过率; τ_{opt} 为光学系统透过率; Ω_s 为系统像方立体角; A_0 为光学系统的入瞳面积; E_{star} 为标准红外自然星的大气层外辐射照度; E_{sky} 为天光背景的等效辐射照度; E_{opt} 为光学系统的等效杂散辐射照度; DN_0 为红外探测器输出灰度的固定偏置值。

对于确定的光学系统,式(1)可变为:

$$\alpha = a \cdot \tau_{\text{opt}} \cdot \Omega_s \cdot A_0, \quad (2)$$

$$DN'_0 = \alpha \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot (E_{\text{sky}} + E_{\text{opt}}) + DN_0. \quad (3)$$

经整理,得:

$$DN = \alpha \cdot \tau_{\text{atm}} \cdot E_{\text{star}} + DN'_0, \quad (4)$$

其中: α 为系统的等效绝对辐射响应度; DN'_0 为红外探测器的背景输出灰度值。

根据 Beer 定律及 Langley-Plot 定标原理可知,整层大气透过率随观测天顶角遵守数学模型:

$$\tau_{\text{atm}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \exp(-\beta(\lambda) \cdot \sec \theta) d\lambda, \quad (5)$$

其中: λ_1, λ_2 分别为系统探测波段的上下限; β 为大气消光系数; θ 为观测天顶角。本实验方法不进行光谱测量,则式(5)简化为^[16]:

$$\tau_{\text{atm}} = \exp(-\beta \cdot \sec \theta). \quad (6)$$

将式(6)代入式(4),得到大气透过率测量实验的基本数学模型:

$$\ln \left[\frac{DN - DN'_0}{E_{\text{star}}} \right] = -\beta \cdot \sec \theta + \ln \alpha. \quad (7)$$

3 大气透过率测量实验

大气透过率测量实验以式(7)所述的数学模型为理论基础开展。

3.1 测量实验系统

测量实验系统依托某 1.2 m 口径地基光电望远镜,该望远镜主要由地平式双轴跟踪架、主光学系统、红外成像终端、捕获系统、跟踪系统、伺服控制系统、操作控制系统及若干功能性软件系统构成。实验系统结构如图 1 所示,系统实物如图 2 所示。

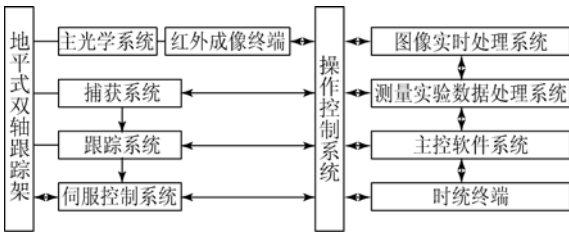


图 1 大气透过率测量实验系统的结构框图

Fig. 1 Block diagram of atmospheric transmittance measuring system

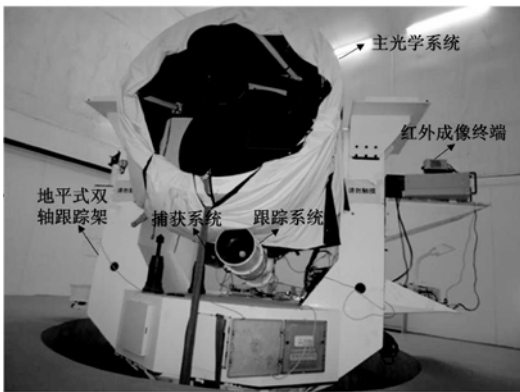


图 2 测量实验系统实物图

Fig. 2 Photo of atmospheric transmittance measuring system

表 1 全光路光学系统参数

Tab. 1 Parameters of total optic system

参数	数值	参数	数值
帧频	25 Hz	探测波段	3.7~4.8 μm
积分时间	6 ms	口径	1.23 m
分辨率	320×256	F 数	4
像元尺寸	30 μm	调焦极限	无穷远处

红外成像终端由中波红外探测器及终端光路成像透镜组成,它搭接在地基光电望远镜的卡塞格林焦点平台上,由此构成全光路光学系统^[17-18]。全光路光学系统参数见表 1。

3.2 测量实验

大气透过率测量实验在 2014 年 3 月 5 日晚 18:10 至 19:50 进行,实验流程如图 3 所示。

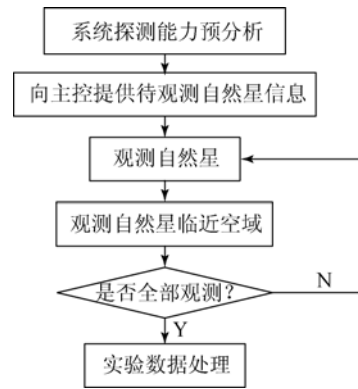


图 3 大气透过率测量实验流程图

Fig. 3 Flowchart of atmospheric transmittance measurement

3.2.1 前期准备阶段

应用光子计数法对测量实验系统的探测能力进行预分析,理论探测信噪比 $SNR > 20$ 的可观测自然星数量为 11。将 11 颗标准红外自然星按规格制成星表,并提供给地基光电望远镜主控操作人员。标准红外自然星数据见表 2。

表 2 标准红外自然星数据

Tab. 2 Data of standard infrared stars

自然星名称	观测仰角	观测时间	大气层外照度 /(W·cm ⁻²)	理论 SNR
星宿一	33°14'	18:57	1.243×10 ⁻¹⁴	82.79
HD131873	37°34'	19:17	1.311×10 ⁻¹⁴	83.26
β Umi	38°21'	18:49	1.282×10 ⁻¹⁴	83.10
毕宿五	41°21'	19:09	5.714×10 ⁻¹⁴	390.94
HD98262	46°44'	18:46	3.098×10 ⁻¹⁵	22.36
HD89484	47°31'	19:21	7.408×10 ⁻¹⁵	48.43
HD95689	55°22'	19:06	7.556×10 ⁻¹⁵	50.68
HD89758	59°03'	18:52	8.722×10 ⁻¹⁵	58.74
μ Uma	63°31'	19:14	8.325×10 ⁻¹⁵	55.29
HD44478	65°02'	18:42	2.398×10 ⁻¹⁴	187.27
北河三	74°06'	19:01	1.130×10 ⁻¹⁴	82.55

3.2.2 观测阶段

观测阶段分为观测自然星和观测自然星临近空域两部分,后者的作用是在实验数据处理阶段对自然星图像进行准实时单点校正。由于自然星在中波红外波段成像存在接收能量弱、对比度低等特点,红外探测器的非均匀性对测量精度的影响极为明显。传统的利用面源黑体的单点、两点校正以及利用天光背景的单点、两点直接校正方法难以达到较高的测量精度,因此,测量实验采用观测自然星临近空域天光背景的准实时单点校正法。

4 实验数据处理

为了获得高精度的大气透过率,实验数据处理阶段需要解决低残差的非均匀性校正问题和星点弥散光斑的灰度提取问题^[19]。

4.1 准实时单点校正

随观测仰角的增加,天光背景在光学系统入瞳处的等效辐射照度和成像灰度均值单调递减。对观测仰角为 26,36,47,57,66,76 和 84°的天光背景进行成像测量,天光背景成像的灰度均值分布如图 4 所示。

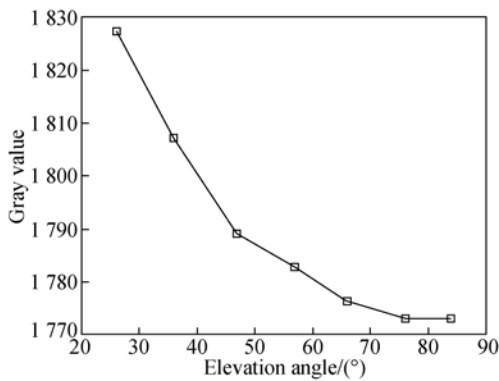


图 4 天光背景成像灰度均值随观测仰角分布

Fig. 4 Distribution of average gray value of background to elevation angle

单点非均匀性校正的数学模型为:

$$O_{ij} = DN_{ij} - \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1, j=1}^{M, N} DN_{ij}, \quad (8)$$

$$DN'_{ij} = DN_{ij} + O_{ij}. \quad (9)$$

两点非均匀性校正的数学模型为:

$$\overline{DN_H} = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1, j=1}^{M, N} DN_{H, ij}, \quad (10)$$

$$\overline{DN_L} = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1, j=1}^{M, N} DN_{L, ij}, \quad (11)$$

$$G_{ij} = \frac{\overline{DN_H} - \overline{DN_L}}{DN_{H, ij} - DN_{L, ij}}, \quad (12)$$

$$O_{ij} = \frac{DN_{H, ij} \cdot \overline{DN_L} - DN_{L, ij} \cdot \overline{DN_H}}{DN_{H, ij} - DN_{L, ij}}, \quad (13)$$

$$DN'_{ij} = G_{ij} \cdot DN_{ij} + O_{ij}, \quad (14)$$

其中: M, N 分别为红外探测器像素的行、列数; DN_{ij}, DN'_{ij} 分别为像素的原始灰度值和校正后灰度值; $DN_{H, ij}, DN_{L, ij}$ 分别为高、低灰度校正模板的像素灰度值; $\overline{DN_H}, \overline{DN_L}$ 分别为高、低灰度校正模板的灰度均值; G_{ij}, O_{ij} 分别为校正增益和校正偏置。

由上述数学模型可知,无论是单点校正还是两点校正,校正后非均匀性残差随待校正图像与校正模板的灰度差值的增加而单调递增。这里以观测仰角为 26°的天光背景为校正模板对各天光背景图像做单点校正,以观测仰角为 26°,84°的天光背景为校正模板对各天光背景图像做两点校正,得到校正残差随观测仰角的分布如图 5 所示。

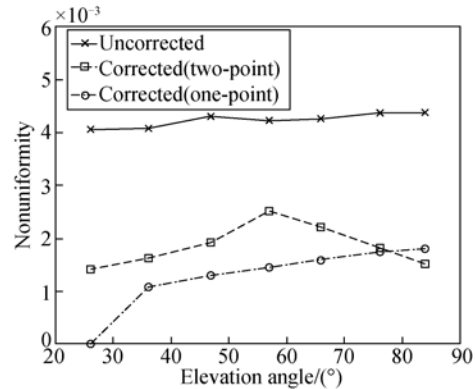


图 5 校正残差随观测仰角分布

Fig. 5 Distribution of non-uniformity to elevation angle

由以上数据分析可知,采用相同观测仰角的天光背景图像对某标准红外自然星成像图像进行单点校正的校正效果最为理想。然而要在短时间内完成 11 颗观测仰角范围较大的标准红外自然星的观测任务,实时单一校正模板的校正方法显然不适用。

准实时单点校正方法的基本原理是以标准红

外自然星成像视场附近且相同观测仰角的天光背景图像为校正模板,对标准红外自然星图像进行单点校正,校正过程在数据处理阶段完成,因此是非实时的校正方法。标准红外自然星“HD44478”的校正效果如图 6 所示。



图 6 准实时单点校正效果

Fig. 6 Result of quasi-real-time one-point correction

4.2 星点弥散光斑灰度提取

受光学系统衍射极限、光学系统像差以及大气扰动等因素的影响,测量系统对标准红外自然星的成像存在弥散,即实际成像区域大于理论设计的一个像元^[20]。星点弥散光斑灰度的提取质量又直接影响着大气透过率的测量精度。针对上述情况,本文采用“迭代质心法”确定星点弥散光斑的质心位置,采用“窗口提取法”提取星点弥散光斑的灰度值。

4.2.1 迭代质心法

迭代质心法是对传统的几何质心求解方法进行迭代运算,当迭代达到收敛条件时迭代收敛,求解出弥散光斑的最终质心。其数学模型为:

$$C_{x,i+1} = \frac{\sum_{x=C_{x,i}-d}^{C_{x,i}+d} x \cdot DN_{x,y}}{\sum_{x=C_{x,i}-d}^{C_{x,i}+d} x}, \quad (15)$$

$$\overline{DN}_{bg} = \left(\sum_{x=x_0, y=y_0}^{x_0+29, y_0+4} DN_{x,y} + \sum_{x=x_0, y=y_0+5}^{x_0+4, y_0+24} DN_{x,y} + \sum_{x=x_0+25, y=y_0+5}^{x_0+29, y_0+24} DN_{x,y} + \sum_{x=x_0, y=y_0+25}^{x_0+29, y_0+29} DN_{x,y} \right) / 500, \quad (21)$$

$$C_{y,i+1} = \frac{\sum_{y=C_{y,i}-d}^{C_{y,i}+d} y \cdot DN_{x,y}}{\sum_{y=C_{y,i}-d}^{C_{y,i}+d} y}. \quad (16)$$

迭代初始条件选择弥散光斑灰度最大点,此处称为“亮心”,则迭代初始条件为:

$$C_{x,0} = x |_{DN_{x,y}=DN_{max}}, \quad (17)$$

$$C_{y,0} = y |_{DN_{x,y}=DN_{max}}. \quad (18)$$

由数字图像处理原理可知,当坐标 x 和 y 迭代残差同时小于 0.5 pixel 时,则迭代收敛,质心由此确定。即迭代收敛条件为:

$$\delta_x = |C_{x,i+1} - C_{x,i}| < 0.5, \quad (19)$$

$$\delta_y = |C_{y,i+1} - C_{y,i}| < 0.5, \quad (20)$$

式中: x, y 为对应像素的横、纵坐标; $DN_{x,y}$ 为对应像素的灰度值; $C_{x,i}, C_{y,i}$ 为上次迭代计算得到的质心的横、纵坐标; $C_{x,i+1}, C_{y,i+1}$ 为本次迭代计算得到的质心的横、纵坐标; d 为质心计算区域半幅宽; i 为迭代次数。

4.2.2 窗口提取法

窗口提取法利用“目标窗口”和“背景窗口”两个掩模分别提取目标和背景灰度。“目标窗口”掩模是大小待定的正方形区域,“背景窗口”掩模是 30×30 中心扣除 20×20 的正方形边框区域。窗口提取法的掩模示意图如图 7 所示。

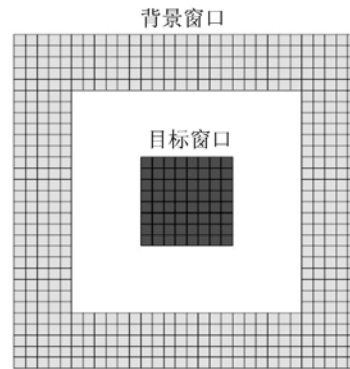


图 7 窗口提取法示意图

Fig. 7 Schematic diagram of window-extracted method

“背景窗口”掩模提取背景灰度的数学表达式为:

其中： x_0, y_0 为背景窗口掩模左上角像素的横、纵坐标； $DN_{x,y}$ 为对应像素的灰度值； $\overline{DN_{bg}}$ 为背景灰度均值。

在星点弥散光斑的灰度提取中，针对提取区域面积并没有直观的计算方法和评价标准；然而，区域大小又直接影响着标准红外自然星成像灰度的提取质量。因此，存在“定区域”的难题。

鉴于上述情况，这里提出了基于信噪比特性曲线确定目标窗口掩模的方法。在确定目标窗口掩模的初始大小后，有规律地扩大掩模，掩模每次变化后计算目标信噪比，并绘制信噪比特性曲线。然后观察信噪比特性曲线是否到达拐点，若确定到达拐点，则拐点处对应着理想掩模。具体流程如图 8 所示。

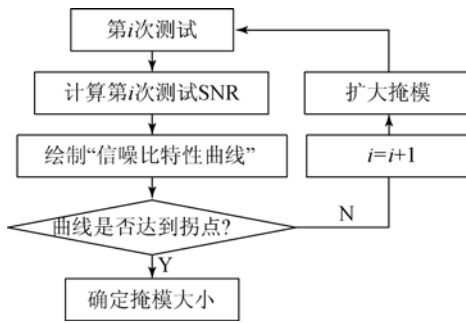


图 8 掩模确定流程图

Fig. 8 Flowchart of mask size calculation

信噪比计算公式为：

$$SNR = \left(\sum_{x=C_x-d, y=C_y-d}^{C_x+d, C_y+d} DN_{x,y} - \overline{DN_{bg}} \cdot (2d+1)^2 \right) / \sigma_{bg} \quad (22)$$

其中： C_x, C_y 为星点弥散光斑质心的横、纵坐标； d 为目标窗口掩模的半幅宽； σ_{bg} 为背景灰度标准差；SNR 为目标成像信噪比。

用该方法对标准红外自然星“北河三”进行测试计算，得到的信噪比特性曲线如图 9 所示。图中，横轴对应的是测试次数 i ，目标窗口掩模大小等于 $(2i+1) \times (2i+1)$ 。由图 9 可知，第 6 次测试对应的掩模为理想掩模，则理想掩模大小为 13×13 。

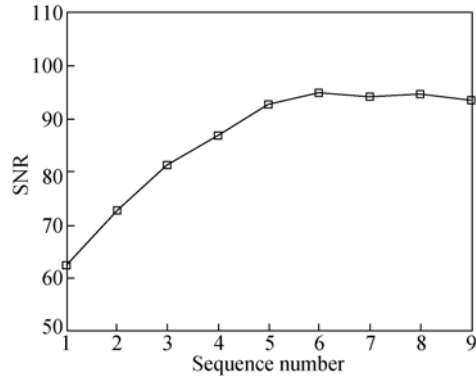


图 9 信噪比特性曲线

Fig. 9 SNR characteristic curve

因此，测量实验的基本数学模型重新定义如下：

$$\ln \left(\frac{\sum_{x=C_x-i, y=C_y-i}^{C_x+i, C_y+i} (DN_{x,y} - \overline{DN_{bg}})}{E_{star}} \right) = -\beta \cdot \sec \theta + \ln \alpha \quad (23)$$

4.3 实验数据拟合

根据大气透过率测量实验的基本数学模型得到：

$$A = \ln \left(\frac{\sum_{x=C_x-i, y=C_y-i}^{C_x+i, C_y+i} (DN_{x,y} - \overline{DN_{bg}})}{E_{star}} \right) = \ln \left(\frac{\Delta DN}{E_{star}} \right) \quad (24)$$

$$B = \sec \theta \quad (25)$$

式中： ΔDN 为提取的目标灰度值。对多次测量值 A 和 B 做最小二乘线性拟合，拟合曲线如图 10 所示。

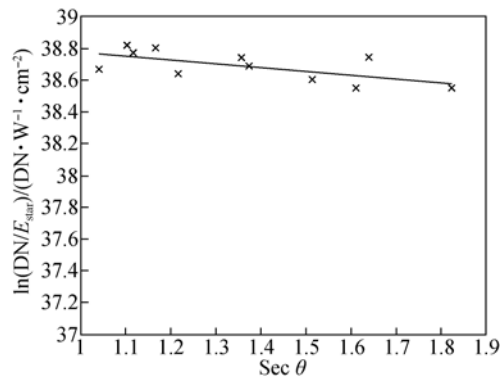


图 10 实验数据拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of data

由拟合结果计算得: $\hat{\beta}=0.298\ 5, \hat{\alpha}=8.760\ 4e+16$; 拟合均方根误差为 0.067 2, 拟合精度满足实验要求。计算得出天顶区域(观测仰角为 90°)的大气透过率为 0.741 9。

依据测量实验的基本数学模型,由拟合估计值 $\hat{\beta}$ 和 $\hat{\alpha}$ 可计算出各标准红外自然星对应观测区域的大气透过率和光学系统的绝对辐射响应度。

4.4 实验对比及结果

作为本实验方法的对比实验,本文开展了基于黑体定标光学系统绝对辐射响应度,并应用 MODTRAN 软件计算大气透过率的空间目标红外辐射特性测量实验。

由于测量实验系统的光学口径为 1.23 m,若采用直接定标法,面源黑体无法覆盖光学系统入瞳,因此本实验采用等效入瞳法,即在光学系统卡塞格林焦点附近设计一条定标光路。定标光路由定标透镜组和一个平面反射镜组成,构造了全光路光学系统的等效入瞳。将面源黑体置于等效入瞳处,合理设定温度采集点,并通过最小二乘线性拟合方法处理采集数据,从而完成了定标光路光学系统的辐射定标。定标数据拟合曲线如图 11 所示。

全光路光学系统与定标光路光学系统的辐射

定标遵循以下关系:

$$\alpha_{opt} = \frac{\alpha_{cal} \cdot \tau_{mir1} \cdot \tau_{mir2} \cdot \tau_{mir3}}{\prod_i \tau_{cal,i}}, \quad (26)$$

其中: $\alpha_{opt}, \alpha_{cal}$ 分别为全光路光学系统和定标光路光学系统的绝对辐射响应度; $\tau_{mir1}, \tau_{mir2}, \tau_{mir3}$ 分别为位于望远镜卡塞格林焦点前的主镜、次镜和三镜的反射率; $\tau_{cal,i}$ 为定标光路中透镜组的透过率或反射镜的反射率。

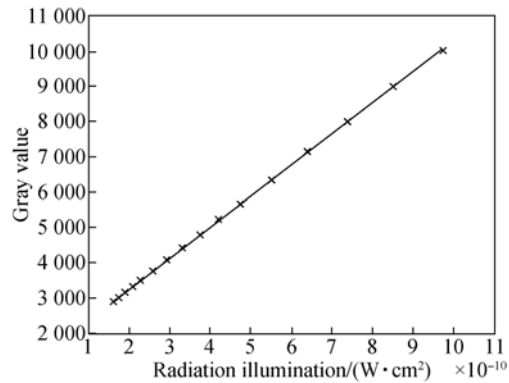


图 11 定标数据拟合曲线

Fig. 11 Fitting curve of calibration data

以标准红外自然星为观测目标,使用前述两种方法测定的参数对目标的大气层外辐射照度进行反演,两种实验方法的结果对比如表 3 所示。

表 3 实验对比结果

Tab. 3 Results of measurement and calculation

自然星名称	观测仰角	大气层外理论辐射照度/(W·cm ⁻²)	MODTRAN 计算大气透过率	实测大气透过率	大气层外辐射照度/(W·cm ⁻²)		相对误差/%	
					对比实验	测量实验	对比实验	测量实验
星宿一	33°14'	1.243e-014	0.542 7	0.580 0	1.277e-014	1.355e-014	2.74	9.01
HD131873	37°34'	1.311e-014	0.577 3	0.612 9	1.169e-014	1.234e-014	10.83	5.86
β Umi	38°21'	1.282e-014	0.582 8	0.618 1	1.349e-014	1.384e-014	5.23	7.99
毕宿五	41°21'	5.714e-014	0.602 3	0.636 5	4.935e-014	5.187e-014	13.63	9.23
HD98262	46°44'	3.098e-015	0.631 2	0.663 7	2.764e-015	3.171e-015	10.78	0.37
HD89484	47°31'	7.408e-015	0.634 9	0.667 2	6.016e-015	6.202e-015	18.79	16.28
HD95689	55°22'	7.556e-015	0.665 5	0.695 7	8.039e-015	8.257e-015	6.39	9.28
HD89758	59°03'	8.722e-015	0.676 6	0.706 1	8.199e-015	8.440e-015	6.00	3.23
μ Uma	63°31'	8.325e-015	0.687 8	0.716 4	8.964e-015	9.337e-015	7.68	12.15
HD44478	65°02'	2.398e-014	0.691 1	0.719 4	2.181e-014	2.274e-014	9.05	5.16
北河三	74°06'	1.130e-014	0.705 9	0.733 2	1.168e-014	1.182e-014	3.36	4.62

5 误差分析

依据误差分析理论,合成不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_m^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j} \rho_{ij} u_i u_j} \quad (27)$$

在式(7)中, $DN, DN', E_{star}, \theta$ 不相关,因此各项相关系数 ρ_{ij} 全部为 0,则测量实验的不确定度为:

$$u_\beta = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial \Delta DN}\right)^2 \cdot u_{DN}^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial E_{star}}\right)^2 \cdot u_{E_{star}}^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial \theta}\right)^2 \cdot u_\theta^2} \quad (28)$$

$$u_\alpha = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial \Delta DN}\right)^2 \cdot u_{DN}^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial E_{star}}\right)^2 \cdot u_{E_{star}}^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \theta}\right)^2 \cdot u_\theta^2} \quad (29)$$

式中: $\hat{\beta}, \hat{\alpha}$ 分别为大气消光系数 β 和系统等效绝对辐射响应度 α 的估计值; $u_\beta, u_\alpha, u_{DN}, u_{E_{star}}, u_\theta$ 分别为大气消光系数 β 、系统等效绝对辐射响应度 α 、像素灰度 DN 、标准红外自然星大气层外照度基准 E_{star} 和观测天顶角 θ 的不确定度。

红外探测器的区域非均匀性与时域不稳定性构成了测量实验中像素灰度 DN 的不确定度。区域非均匀性是由探测器像元间增益与偏置的差异造成的,而时域不稳定性的形成因素较为复杂^[21-26],直观表现为单个像元灰度值在时域上的不规则抖动。

像素灰度 DN 不确定度的数学表达式为:

$$u_{DN} = \sqrt{\alpha_{NUC}^2 + \alpha_{TUC}^2} \cdot D\hat{N}, \quad (30)$$

式中: $\alpha_{NUC}, \alpha_{TUC}$ 分别为红外探测器的区域非均匀性与时域不确定性; $D\hat{N}$ 为像素灰度 DN 的估计值。

以测量实验中像素灰度最大值为 DN 的估计值, $D\hat{N} = 2254$; 以测量实验中提取的目标灰度最大值为 ΔDN 的估计值, $\Delta D\hat{N} = 3128$, 对各标准红外自然星成像图像非“目标窗口”区域进行非均匀性计算,得到非均匀性平均值 $\alpha_{NUC} = 0.04\%$ 。

然后针对红外探测器的时域不稳定性进行了测量实验。在 1 min 内探测器的帧频为 25 Hz, 测量某像素灰度 X , 抽样样本容量(帧频 \times 测试时间)为 1500。抽样样本的时域分布和灰度直方图分别如图 12、13 所示。

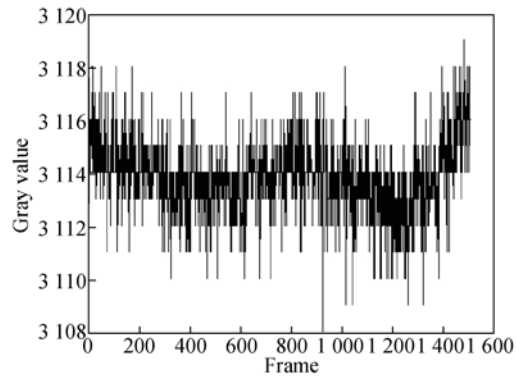


图 12 抽样样本时域分布

Fig. 12 Distribution of time domin of samples

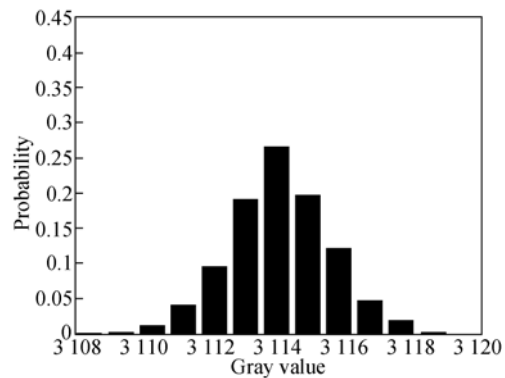


图 13 抽样样本直方图

Fig. 13 Histogram of samples

由于抽样样本容量较大,且从样本分布直方图看测量值 X 是服从正态分布 $N(\mu, \sigma)$ 的随机变量。经计算可得, $\mu = 3114, \sigma = 1.416$ 。则有:

$$\alpha_{TUC} = \frac{u_X}{\bar{X}} = \frac{3\sigma}{\mu} = \frac{3 \times 1.416}{3114} = 0.14\%$$

由此计算得:

$$u_{DN} = \sqrt{\alpha_{NUC}^2 + \alpha_{TUC}^2} \cdot D\hat{N} = \sqrt{(0.04\%)^2 + (0.14\%)^2} \times 2254 = 3.28$$

由星库中标准红外自然星大气层外照度 E_{star} 得出: 典型不确定度 $u_{E_{star}} = 1.927 \times 10^{-18} \text{ W/cm}^2$; E_{star} 的经验估计值 $\hat{E}_{star} = 1.000 \times 10^{-14} \text{ W/cm}^2$ 。

由于标准红外自然星在观测测量中与地基望远镜主光轴之间的相对位移较小,所以认为望远镜俯仰轴伺服控制系统的稳态误差即为观测天顶角 θ 的不确定度。因此, $u_\theta = 10''$, 转换为弧度制为 $4.846 \times 10^{-5} \text{ rad}$; θ 的经验估计值 $\hat{\theta} = 45^\circ$, 转换为弧度制为 0.785 rad。

由此计算得到大气消光系数 β 及系统等效绝

对辐射响应度 α 的不确定度,分别为:

$$u_{\beta} = \left[\sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial \Delta DN} \right)^2 \cdot u_{\Delta DN}^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial E_{\text{star}}} \right)^2 \cdot u_{E_{\text{star}}}^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial \theta} \right)^2 \cdot u_{\theta}^2} \right] \Big|_{\Delta DN, E_{\text{star}}, \theta, \hat{\alpha}} = 0.064 9,$$

$$u_{\alpha} = \left[\sqrt{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial \Delta DN} \right)^2 \cdot u_{\Delta DN}^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial E_{\text{star}}} \right)^2 \cdot u_{E_{\text{star}}}^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \theta} \right)^2 \cdot u_{\theta}^2} \right] \Big|_{\Delta DN, E_{\text{star}}, \theta, \hat{\beta}} = 5.028 6 \times 10^{14} \text{ DN}/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}).$$

由此计算大气透过率 τ 的不确定度为:

$$u_{\tau} = \sqrt{\left(\frac{\partial \tau}{\partial \beta} \Big|_{\hat{\beta}, \hat{\theta}} \right)^2 \cdot u_{\beta}^2 + \left(\frac{\partial \tau}{\partial \theta} \Big|_{\hat{\beta}, \hat{\theta}} \right)^2 \cdot u_{\theta}^2} = 0.076 4.$$

选择 $\hat{\theta}$ 对应的大气透过率为 τ 的估计值 $\hat{\tau}$, 则计算大气透过率 τ 的归一化不确定度为:

$$\sigma_{\tau} = \frac{u_{\tau}}{\hat{\tau}} = 11.75\%.$$

6 结 论

本文搭建的中波红外整层大气透过率测量实验系统简单有效、易装调、成本低、外场适应性强。

参考文献:

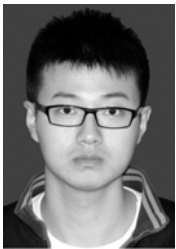
- [1] 杨词银,曹立华. 大口径红外光电系统辐射定标及误差分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1624-1628.
YANG C Y, CAO L H. Radiation calibration and error analysis for a large-aperture infrared opto-electric system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1624-1628. (in Chinese)
- [2] MICHAEL S, PAUL R S, GERARD B, *et al.*. Thermal-infrared field radiometer for vicarious cross-calibration; characterization and comparisons with other field instruments [J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(2): 345-356.
- [3] 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.
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. (in Chinese)
- [4] 卜正明,李满良. 路基长波红外辐射测量技术研究[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(4): 309-311.
BU ZH M, LI M L. Study of ground-based LW infrared radiation measurement [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2005, 24(4): 309-311. (in Chinese)
- [5] 魏合理,陈秀红,詹杰. 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.
WEI H L, CHEN X H, ZHAN J, *et al.*. Atmospheric correction in the measurement of infrared radiance [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 472-478. (in Chinese)
- [6] 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.
YANG C Y, ZHANG J P, CAO L H. Infrared radiation measurement based on proportional corrected atmospheric transmittance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1626-1635. (in Chinese)
- [7] 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. Waves*, 2011, 30(3): 284-288. (in Chinese)
- [8] 曹立华,杨词银,万春明. 基于标校的双波段比色测温发[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1882-1888.
CAO L H, YANG C Y, WAN CH M. Correction-based dual-waveband color comparison thermometric method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(8): 1882-1888. (in Chinese)
- [9] 赵军,张建,杜翠兰. 红外辐射大气透过率修正函数[J]. 激光与红外, 2006, 36(9): 866-867.
ZHAO J, ZHANG J, DU C L. Revisable function of IR radiation atmospheric transmissivity [J]. *Laser*

由于系统不需要面源黑体,从而解决了地基大口径红外光电设备辐射定标受限于黑体尺寸的问题。该方法在一次测量实验中可同时完成光学系统绝对辐射响应度定标和大气透过率的测量,因此可直接应用于空间目标红外辐射特性测量中。实验和分析结果表明,大气透过率的理论测量误差为 11.75%,空间目标大气层外辐射照度的最大测量误差为 16.28%;相比传统的基于黑体定标光学系统绝对辐射响应度和 MODTRAN 等软件计算大气透过率的方法(最大测量误差为 18.79%),本文所述方法的测量精度更高。

- & *Infrared*, 2006, 36(9): 866-867. (in Chinese)
- [10] 李云红, 张龙, 王延年. 红外热像仪外场测温的大气透过率二次标定[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(10): 2143-2149.
LI Y H, ZHANG L, WANG Y N. Second calibration of atmospheric transmission coefficients on temperature measurement of infrared thermal imager in fields [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2143-2149. (in Chinese)
- [11] 詹杰, 郭瑞鹏, 饶瑞中. 可见到近红外波段整层大气透过率的测量[J]. *大气与环境光学学报*, 2006, 1(3): 179-183.
ZHAN J, GUO R P, RAO R ZH. Measurement of atmospheric transmittance in the visible and near-infrared [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, 1(3): 179-183. (in Chinese)
- [12] 朱明, 詹杰. 利用恒星辐射测量整层大气透过率的多目标星定标[J]. *强粒子与激光束*, 2010, 22(12): 2843-2847.
ZHU M, ZHAN J. Multi-objective star calibration study of total atmospheric transmittance measurement with stellar irradiance [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(12): 2843-2847. (in Chinese)
- [13] 臧寿洪, 白云塔, 欧阳艺. 大气透过率测量方法的研究[J]. *红外*, 2009, 30(3): 26-29.
ZANG SH H, BAI Y T, OUYANG Y. Research on atmospheric transmittance measuring method [J]. *Infrared*, 2009, 30(3): 26-29. (in Chinese)
- [14] 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.
LI X SH, REN J W, ZHANG L G, *et al.*. Research on a radiometric calibration device for a large aperture infrared opto-electric system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(2): 175-178. (in Chinese)
- [15] 王国强, 吴元昊, 曹景太. 提高空间目标温度测量精度的波段优选方法[J]. *应用光学*, 2012, 33(4): 738-742.
WANG G Q, WU Y H, CAO J T. Waveband optimization method for enhancing precision of measuring space object's temperature [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(4): 738-742. (in Chinese)
- [16] 刘莹奇. 空间目标红外多波段温度分布反演[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 556-561.
LIU Y Q. Inversion of space target infrared multi-band temperature distribution [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 556-561. (in Chinese)
- [17] 张蓬勃, 陈旭海, 李玉榕, 等. 基于红外热成像的 PCR 温控系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2012, 26(6): 541-547.
ZHANG P B, CHEN X H, LI Y R, *et al.*. PCR temperature control system based on thermal infrared imager [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2012, 26(6): 541-547. (in Chinese)
- [18] 王世涛, 张伟, 王强. 红外探测器件在低温背景下的探测率测试[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(3): 484-491.
WANG SH T, ZHANG W, WANG Q. Measurement for detectivity of infrared detectors in low temperature background [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 484-491. (in Chinese)
- [19] 曾开华, 彭青玉. 高精度恒星孔径测光注释[J]. *天文研究与技术*, 2010, 7(2): 124-131.
ZENG K H, PENG Q Y. Notes on high precision aperture photometry of stars [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2010, 7(2): 124-131. (in Chinese)
- [20] TALGHADER J J, GAWARIKAR A S, SHEA R P. Spectral selectivity in infrared thermal detection [J]. *Light: Science & Applications*, 2012, 1(8): 6-16.
- [21] QIU H, HU L, ZHANG Y, *et al.*. Absolute radiometric calibration of earth radiation measurement on FY-3B and its comparison with CERES/aqua data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(12): 4965-4974.
- [22] 孙成明, 袁艳, 黄锋振, 等. 空间目标红外成像特性建模与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 563-568.
SUN CH M, YUAN Y, HUANG ZH F, *et al.*. Modeling and simulation on infrared imaging characteristics of space target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 563-568. (in Chinese)
- [23] 王盈, 来宵毅, 黄建明, 等. 基于 Sinda/G 和 Matlab 的空间目标红外辐射特性分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1113-1118.
WANG Y, LAI X Y, HUANG J M, *et al.*. Infrared radiation analysis of space target based on Sinda/G and Matlab [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1113-1118. (in Chinese)
- [24] 聂宏宾, 侯晴宇, 赵明, 等. 基于似然函数 EM 迭代的红外与可见光图像配准[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(3): 657-663.

- NIE H B, HOU Q Y, ZHAO M, *et al.*. IR/visible image registration based on EM iteration of log-likelihood function [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 657-663. (in Chinese)
- [25] 张晓龙, 刘英, 王健, 等. 不同非均匀性校正温度的红外测温技术[J]. *中国光学*, 2014, 7(1): 150-155.
- ZHANG X L, LIU Y, WANG J, *et al.*. Infrared thermometry technology with different nonuniformity correction temperatures [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 150-155. (in Chinese)
- [26] 曾蔚, 王汇源, 刘莹奇, 等. 基于 IR-SFS 算法空间目标红外影像 3D 重建[J]. *中国光学*, 2014, 7(3): 376-388.
- ZENG W, WANG H Y, LIU Y Q, *et al.*. 3D reconstruction of space target IR image based on IR-SFS algorithm [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 376-388. (in Chinese)

作者简介:



刘俊池(1988—),男,吉林省吉林人,博士研究生,2011年于吉林大学获得学士学位,主要从事空间目标红外辐射特性测量方面的研究。E-mail: liujunchi703@163.com

导师简介:



王建立(1971—),男,山东曲阜人,博士,研究员,博士生导师,1999年、2002年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像光电望远镜总体技术等方面的研究。E-mail: Wangjianli@ciomp.ac.cn

通讯作者:



李洪文(1970—),男,四川乐至人,博士,研究员,博士生导师,1996年于吉林工业大学获得硕士学位,2007年于吉林大学获得博士学位,主要从事地基高分辨率成像光电望远镜电控系统总体设计及电机控制方面的研究。E-mail: lihongwen1970@yahoo.com

(版权所有 未经许可 不得转载)