

## 国内典型天文台站大气红外背景辐射实测分析

&陈双远<sup>1,2</sup>, &张芳<sup>3</sup>, 齐琳琳<sup>4</sup>, 韩成鸣<sup>3</sup>, 曾丽<sup>3</sup>, 许方宇<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216; 2. 中国科学院国家天文台 FAST 运行和发展中心, 贵州 平塘 558300; 3. 中国人民解放军 63620 部队, 甘肃 兰州 732750; 4. 中国人民解放军 93213 部队, 北京 100089)

**摘要:** 大气背景辐射强弱决定了红外望远镜系统极限灵敏度, 直接影响系统设计, 背景辐射也是反映天文台站观测性能优劣与否的一项重要指标。实测了国内的阿里天文台、德令哈观测站、怀柔观测站等几个典型天文台站大气红外背景辐射, 尤其是获得了阿里天文台大气红外背景辐射的一手资料。实测结果表明: 阿里天文台大气红外背景辐射的强弱以及辐亮度均值的昼夜变化在几个台站中均最小, 其最大辐亮度均值为  $1.30 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ , 辐亮度均值的最大昼夜变化仅为 18%, 其红外背景辐射最优; 其次是德令哈观测站。将扫天实测辐亮度与 MODTRAN 模拟辐亮度进行对比, 发现对于国内如阿里等青藏高原高海拔地区无论是标准大气模式还是实际大气模式其模拟结果与实测间皆存在较大差异。

**关键词:** 大气光学; 大气辐射; 辐射测量; 辐射定标; 天顶角; 阿里天文台

**中图分类号:** P415.3+4; TN215; P422 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1203010

## Measurement and analysis of atmospheric infrared background radiation of typical astronomical observatories

&Chen Shuangyuan<sup>1,2</sup>, &Zhang Fang<sup>3</sup>, Qi Linlin<sup>4</sup>, Han Chengming<sup>3</sup>, Zeng Li<sup>3</sup>, Xu Fangyu<sup>1\*</sup>

(1. Yunnan Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;  
2. Operation and Development Center of FAST Engineering, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Pingtang 558300, China;  
3. Unit No.63620 of PLA, Lanzhou 732750, China;  
4. Unit No.93213 of PLA, Beijing 100089, China)

**Abstract:** The intensity of background radiation directly determines the sensitivity limit of the infrared telescope system and directly affects the system design. Background radiation is also an important index to reflect the astronomical observing conditions and performance of observatory stations. The atmospheric infrared background radiation of Ali, Delingha Observatory and Huairou Observatory astronomical observatories were measured, particularly the first-hand data of atmospheric infrared background radiation were obtained for the Ali astronomical observatories. The measured results show that the atmospheric infrared background radiation intensity and the diurnal variation of the radiance on the Ali astronomical observatories are the smallest among the three stations, and the average values of the highest radiance is  $1.30 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ . The maximum diurnal variation of Ali's radiance mean value is only 18%.

收稿日期: 2019-10-11; 修订日期: 2019-11-21

\*第一作者简介: 陈双远(1992-), 男, 硕士, 主要从事红外天文技术方面的研究。Email: chenshuangyuan16@mails.ucas.ac.cn

张芳(1992-), 男, 硕士, 主要从事大气对光电系统作用距离影响方面的研究。Email: 475613323@qq.com

通讯作者: 许方宇(1972-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事红外天文技术方面的研究。Email: xu\_fangyu@ynao.ac.cn

Therefore, the lowest infrared background radiation limits is Ali astronomical observatories. The second is Delingha Observatory. Finally, the measured radiance in sky sweeping was compared with the MODTRAN software simulated radiance. It is found that there is quite a difference between the simulation results and the actual measurement in the high altitude areas of the Qinghai-Tibet Plateau, whether it is the standard atmospheric mode or the actual atmospheric mode.

**Key words:** atmospheric optics; atmospheric radiance; radiation measurement; radiation calibration; zenith; Ali astronomical observatories

## 0 引言

地基红外天文观测的能力与信噪比有关,而信噪比受背景噪声的影响,背景噪声会降低目标-背景对比度,给目标探测和识别增加难度<sup>[1]</sup>。红外探测系统接收目标信号的强度和信噪比均与大气红外背景辐射限相关;大气红外背景辐射也是反映天文台站红外观测性能优劣与否的一项重要指标。在红外天文观测中,所测目标天体红外辐射信号中同时耦合有大气背景辐射和仪器背景辐射,这两种背景之间也相互耦合,难以分离。仪器背景的强弱可通过低温制冷得到有效控制,大气背景辐射的强弱则需通过实测来予以评价。当大气红外辐射作为系统测量目标时,它是一个弱信号,该信号强弱随波长变化的同时还强烈地依赖大气吸收,在强吸收波段大气背景辐射强;而对于红外天体目标观测而言,它又是一个强背景,而且其辐射强度随地域空间、时间变化较大。因此,精确测定大气红外辐射的大小,以及它随时间、空间的变化规律,对未来大口径红外望远镜设计以及台址性能评估均十分必要。

NASA 的研究人员<sup>[2]</sup>早在 1970~1974 年间就对美国、墨西哥、智利等地一些优秀待选天文台站 10  $\mu\text{m}$  波段大气背景辐射进行测量。此后 Ashley 等<sup>[3-4]</sup>对南极背景光谱信息进行了大量的多波段测量和研究。Valenziano 等<sup>[5]</sup>测量了南极 Dome C 站点多个红外波段上大气背景辐射的起伏,分析了辐射的功率谱密度。Smith 等<sup>[6]</sup>也对南极大气背景辐射的起伏进行了测量和傅里叶分析。1999 年,Phillips 等<sup>[7]</sup>测量了南极冬季 1~5  $\mu\text{m}$  波段天光背景光谱信息,结果表明:3.7~4.8  $\mu\text{m}$  波段的背景辐射主要来自大气自身热辐射。同年 Evans 等<sup>[8]</sup>也在南极 Dome C 站点采用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)测量红外波段

的背景辐射。2005 年,Walden 等<sup>[9]</sup>利用大气辐射干涉仪测量了南极 Dome C 的红外大气背景辐射。国内,魏合理等<sup>[10]</sup>利用傅里叶变换光谱仪测量了 5~14  $\mu\text{m}$  背景辐射光谱分布;戴聪明等<sup>[11]</sup>采用傅里叶变换红外光谱仪在西藏羊八井实测了大气背景红外辐射;王东等<sup>[12]</sup>利用红外热像仪对 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~14  $\mu\text{m}$  的背景辐射进行了测量。大部分国内外相关测量工作,测量系统定标采用两点线性定标,外推测量严重,精度较低,没有考虑环境温度对仪器辐射的影响;一些测量工作中所用傅里叶变换光谱仪时间分辨率较低,不适用于背景辐射快变起伏的测量研究。赵志军等<sup>[13]</sup>对丽江及澄江天文观测站的大气红外辐射与消光特性进行了实测,但未有效扣除探测器坏点等的影响,导致测量结果偏大。

文中先介绍大气红外背景辐射测量系统以及系统的实验室定标,通过对测量系统进行低温制冷和恒温控制,目的是使系统自身红外辐射能够维持稳定并使其降到很低水平,减小仪器辐射对测量结果的干扰,提高测量精度。最后使用该系统实测了阿里观测站、德令哈观测站和怀柔观测站的大气红外背景辐射,并对实测结果进行了分析比较,为国家天文台 1 m 红外太阳望远镜选址提供关于背景辐射强弱的参考。并将扫天测量结果与 MODTRAN 软件模拟结果进行比较,说明在高海拔地区实测更可靠。

## 1 测量系统及系统实验室定标

### 1.1 测量系统概述

文中所述大气红外背景辐射测量系统是一台折射式红外望远镜,并配备数据采集与处理模块、制冷控温子系统,其关键参数见表 1。其中制冷、温控子系统主要采用冷却液循环制冷加半导体制冷的制冷方式。

表 1 系统参数

Tab.1 System parameters

Parameters	Values	Parameters	Values
Frame rate/Hz	25	Aperture/mm	75
Pixel number/pixel	320×256	<i>F</i> -number	2
Pixel size/μm	30	Detector type	HgCdTe
Response wavelength/μm	3.7~4.8	Response wavelength with the filter/μm	4.605~4.755

红外天文观测中对目标天体辐射信号进行测量时,测量系统自身红外辐射和大气红外辐射都作为测量过程中的背景噪音,该随机起伏的背景噪声将会淹没微弱的天体目标辐射信号,将限制红外望远镜系统的极限灵敏度。且在实验过程中发现,常温时测量系统自身红外辐射强于大气红外背景辐射 2 个量级;此外还面临系统自身红外辐射与目标大气辐射信号完全耦合,难以分离的问题;测量系统的自身红外辐射还受环境温度的影响不断变化。鉴于此,需要降低系统自身红外辐射并严格限制其起伏,使仪器辐射的贡献接近一个小的直流量,不影响对大气辐射快变起伏的测量研究。为了达到这一目的所采用的最主要关键手段是对望远镜内部产生热辐射的关键部位进行低温制冷和恒温控制,最终可将系统制冷-40℃。探测器采用工作于-200℃的深制冷型面阵探测器,响应波段 3.7~4.8 μm;加带通滤光片后的响应波段为 4.605~4.755 μm。

1.2 测量系统的实验室定标

对测量系统进行实验室定标,即以不同强度的标准辐射信号作用于系统,获得输入信号强度与输出仪器读数间的对应关系。参考文献[14]中用一种同时考虑目标信号、仪器辐射和积分时间的三元定标模型,该定标模中仪器辐射随环境温度而变化。使用三元定标模型对该系统进行实验室定标,系统的实验室定标在环境实验箱中进行,环境实验箱可以设置不同的环境温度,考虑实际野外实测时的环境温度,在实验室定标时环境温度设定了以下 6 个温度:-25、-10、5、15、21、28.5℃;在每一个环境温度条件下设置了 5 个黑体温度作为目标温度(对应 5 个目标强度)分别是:0、5、10、15、20℃。将不同环境温度、不同黑体温度、不同积分时间下采集到的实验数据用三元模型拟合得到各定标系数,如表 2 所示。

表 2 三元模型拟合参数估计

Tab.2 Estimation of trivariate calibration model fitting parameters

Parameters	Values
<i>a</i> (×10 <sup>5</sup> )	4.875±0.008
<i>b</i> (×10 <sup>5</sup> )	8.49±0.38
<i>C</i>	2.549 2±0.020
<i>d</i> (×10 <sup>5</sup> )	0.707 0±0.005
<i>r</i> <sup>2</sup>	1.000
RMSE	4.160

表 2 中参数值为 95%置信度的估计值和估计区间,拟合的复相关系数 *r*<sup>2</sup> 为 1.000,均方根误差 RMSE 为 4.160 个数字读数。最终所得定标公式如下。

$$R=4.875 \times 10^5 \times L_{\text{signal}} \times t + 8.49 \times 10^3 \times L_{\text{amb}} \times t + 2.549 \ 2 \times t + 707.00 \quad (1)$$

式中:*t* 为积分时间;*R* 为仪器输出读数;*L*<sub>signal</sub> 为目标信号在工作波段内的积分亮度;*L*<sub>amb</sub> 为环境温度变化所引起的仪器辐射在工作波段内的积分辐亮度。通过对系统进行低温制冷和恒温控制,在大幅降低仪器辐射的同时也严格限制了仪器辐射的起伏,再对系统进行三元模型定标,从中分离出积分时间和仪器辐射对测量结果的影响。提高了系统测量精度与稳定性,最终实现对大气红外辐射及其起伏的测量。

2 国内典型天文观测站的大气红外背景辐射实测及模拟

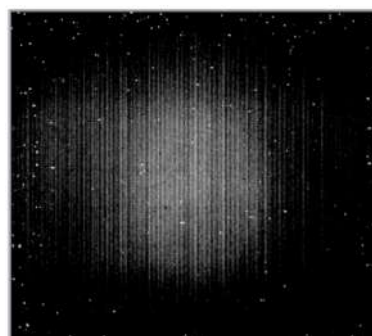
分别于 2017 年 10 月 18~25 日在阿里天文台、2017 年 11 月 4~8 日在紫金山天文台德令哈观测站、2017 年 11 月 16~21 日在国家天文台怀柔观测站实测了这三个站点的大气红外背景辐射,测量实验分为对正天顶的连续凝视测量和快速扫描天顶角测量两种模式。凝视测量指将望远镜指向天顶方向对其进行连续的监视测量,该模式可获取各站点背景辐射昼夜及强弱对比;而快速扫描天顶角测量是指在短时间(一般在 10 s)内快速测量不同天顶角下的大气红外背景辐射,该模式可得到大气红外背景

辐射随不同天顶角的变化规律。

### 2.1 大气红外背景辐射的凝视测量

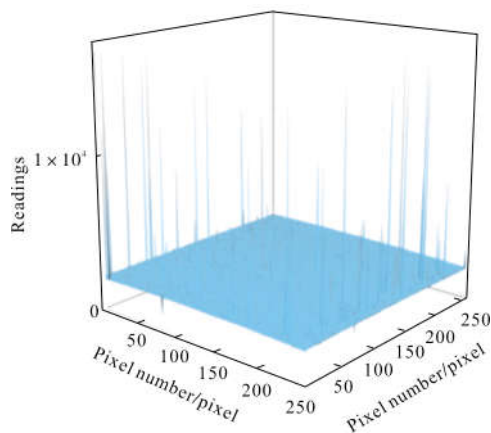
三地测量实验皆是在天气晴朗、无明显阴雨天的条件下进行。具体实验过程如下,开机后对系统进行约 2 h 的低温制冷,使望远镜整机内部温度维持在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,待系统输出读数充分稳定后即可开始进行测量。系统配备的探测器帧频为 25 Hz,1 min 内可采集 1 500 张图像。实测中探测器采集的 1 帧大气红外背景辐射原始图像如图 1 所示,其中,图 1(a)为原始 FITS 图,图 1(b)为原始三维图,图中  $z$  方向代表仪器读数, $x,y$  方向对应探测器版面。由图 1(a)、(b)可知在图像获取的过程中存在噪声影响,尤其是红外探测器坏点的影响非常严重,所以为了消除红外探测器坏点的影响,需对测量的图像数据进行预处理,改进图像质量,采取的方法是对所测的每帧图像进行中值滤波,滤波后的 FITS 图和三维图分别如图 1(c)、(d)所示,最后将滤波后的每张图像数据整体取平均值作为一个系统输出读数。经图像处理及数据平均得到系统输出读数后再按照定标模型即可解算出各地大气红外背景辐射亮度的实测结果。从测量实验数据中整理出几个台站大气红外背景辐射的最低、最高辐亮度结果,分别如图 2(a)、(b)所示,发现最低辐亮度通常出现在夜间,取 1 min 内的测量均值进行比较,得到阿里、德令哈、怀柔三地最低辐亮度均值分别为  $1.10\times 10^{-6}$ 、 $1.64\times 10^{-6}$ 、 $2.67\times 10^{-6}\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ ,标准差分别为  $7.07\times 10^{-10}$ 、 $1.17\times 10^{-9}$ 、 $2.08\times 10^{-9}$ ,标准差系数分别为 0.065%、0.071%、0.080%。就最低辐亮度均值而言,怀柔是德令哈的 1.63 倍,德令哈为阿里的 1.50 倍;最高辐亮度都是出现在白天,三地最高辐亮度均值分别为  $1.30\times 10^{-6}$ 、 $2.44\times 10^{-6}$ 、 $4.10\times 10^{-6}\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ ,标准差分别为  $3.54\times 10^{-9}$ 、 $2.53\times 10^{-9}$ 、 $2.41\times 10^{-9}$ ,标准差系数分别为 0.27%、0.10%、0.06%,怀柔的最高辐亮度均值是德令哈的 1.68 倍,德令哈是阿里的 1.88 倍。辐亮度均值可直观地反映 3 个站点大气背景辐射的相对强弱,在三站点的大气背景辐射中无论是最低、最高辐亮度均值都是怀柔最强,德令哈次之,阿里最弱;由辐亮度标准差和标准差系数可以比较三站点在测量时段内辐亮度的起伏情况,它代表了大气的稳定水平,选择的各个站点的最低、最高辐亮度数据

均是相对较为稳定的昼夜数据,可以看出:在夜间怀柔辐亮度起伏较强,德令哈次之,阿里较稳定;而白天阿里辐亮度起伏较强,德令哈次之,怀柔较弱。所有站点白天的大气红外背景辐射都比夜间强,阿里、德令哈、怀柔白天最强时的辐亮度均值比夜间最弱的辐亮度均值分别强 18%、49%、53%,它反映各站点间辐亮度的昼夜变化。可知阿里站的辐亮度均值及其昼夜变化水平最低,其红外背景辐射限最优。



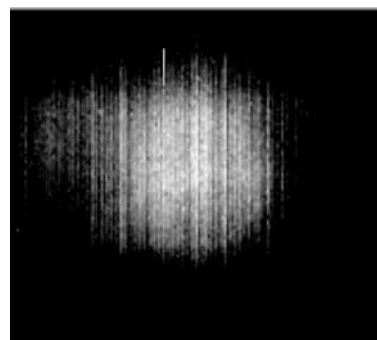
(a) 原始 FITS 图

(a) Raw FITS image



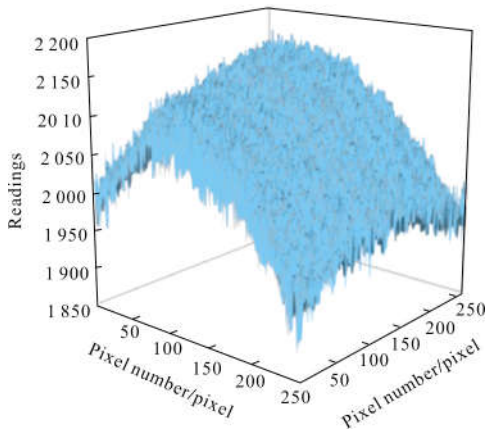
(b) 原始三维图

(b) Raw 3D image



(c) 滤波后的 FITS 图

(c) Filtered FITS image

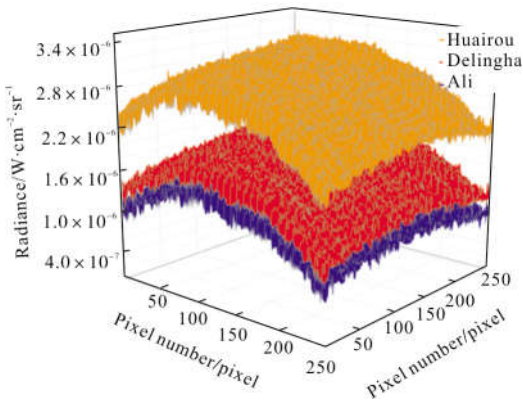


(d) 滤波后的三维图

(d) Filtered 3D image

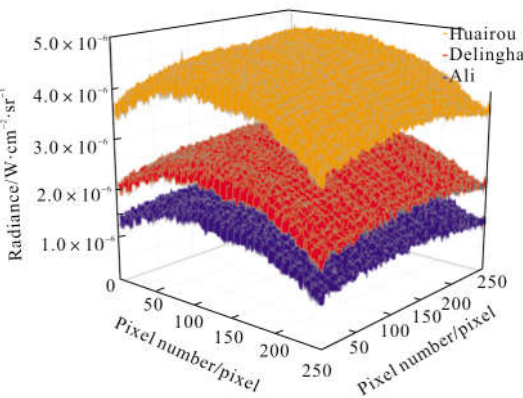
图 1 探测器采集的原始图像

Fig.1 Raw image acquired by detector



(a) 最低辐亮度

(a) Lowest radiance



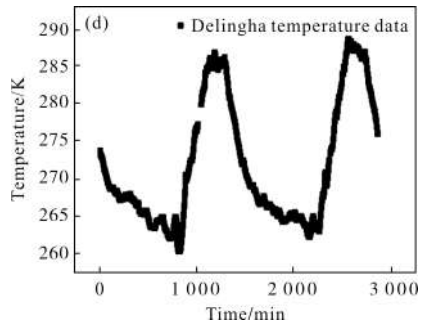
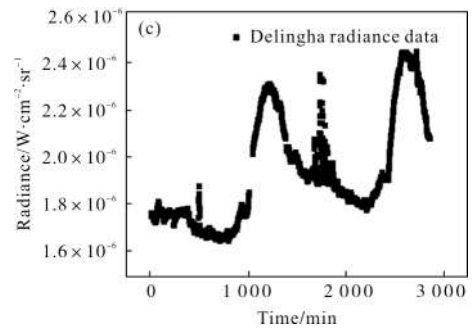
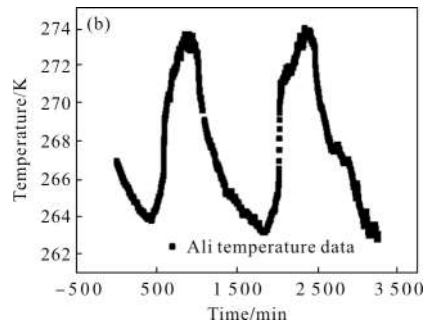
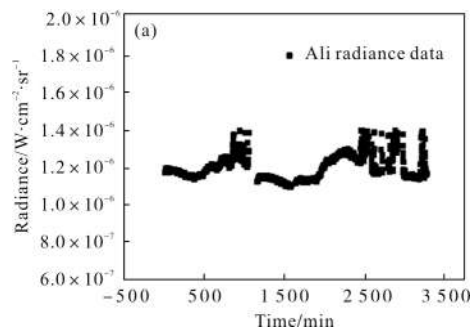
(b) 最高辐亮度

(b) Highest radiance

图 2 3 个台站最低和最高辐亮度

Fig.2 Lowest and the highest radiance of three astronomical observatories

为了直观反映出各站点大气背景辐射在所测时段内的连续变化,取 1 500 个读数的中值来代表这 1 min 内的输出,这样系统 1 min 输出 1 个读数,由此可得到三个台站大气红外背景辐射在所测时段内的连续测量结果以及测量期间环境温度的变化,如图 3 所示。其中阿里测量时间为:2017 年 10 月 23 日 02 点 06 分~10 月 25 日 08 点 33 分;德令哈测量时间:2017 年 11 月 06 日 18 点 35 分~11 月 08 日 18 点 12 分;怀柔测量时间:2017 年 11 月 18 日 12 点 49 分~11 月 21 日 14 点 31 分。长时间连续凝视测量



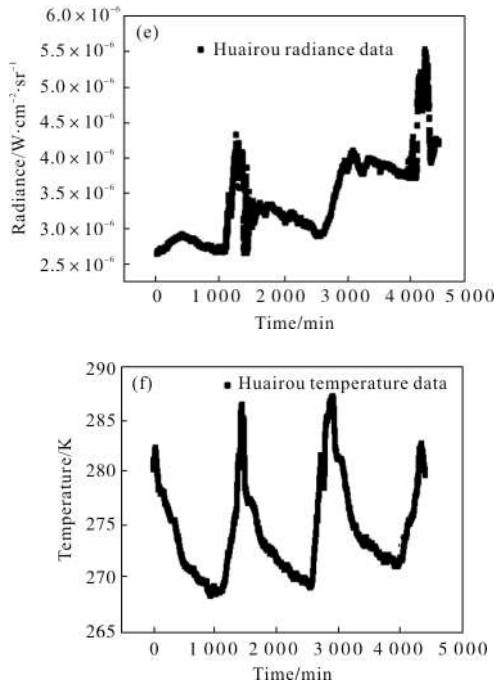


图 3 三地实测辐亮度与环境温度

Fig.3 Radiance and ambient temperature of three observing station

过程中会有云的影响,但这些云的影响将很容易从测量实验数据中辨认出,如图 3 中辐亮度尖锐突起部分。另外由图 3 可知台站大气红外背景辐射的连续时间序列具有准周期性规律,其周期变化趋势与地面温度的周期变化呈正相关,如阿里和德令哈两地这种正相关关系十分明显;怀柔的对应关系则不明显,是因为观测期间怀柔早晚雾霾严重且云层较多;表明对大气红外辐射波动影响最大的因素是温度的变化和云层,其中温度是影响红外辐射的最重要因素,温度的高低直接决定了大气红外辐射的强弱;而云层对大气辐射波动的影响也较大,当天空中有云时,由于云层的影响三地辐亮度最大可增加 3 倍。但是辐射量的变化与温度量的变化并不保持同步,即温度达到最高时辐亮度并没有达到最大,温度达到最低时辐亮度也并没有减到最小,辐射的变化要滞后于温度的变化;这是由于大气热惯量所导致,热惯量的大小与大气密度、比热容、热传导率等有关。

2.2 扫天测量及模拟

快速测量不同天顶角下的大气红外辐射的过程简称“扫天”。“扫天”过程要求测量尽可能在短的时间里进行,因为大气条件变化很快,测量时间如果跨

度过长,在这期间大气环境发生变化将导致测量不准确。各地扫天测量实验皆是在晴朗无云时进行,依天气情况,分别在白天和晚上间隔若干小时测量一次,每次一组;阿里站测得数据十组,德令哈和怀柔站分别测得三十组。一般在 10 s 内完成从正天顶到最大天顶角的扫描测量,扫描步长 0~4°。天顶角( $\theta$ )扫描范围包含 0~60°,最大不超过 80°,因为当  $\theta \geq 80^\circ$  时由于地球表面的弯曲和光的折射效应的影响,以  $\sec \theta$  计算大气质量将存在较大差异。数据处理过程仍先对每帧图像进行中值滤波,以消除红外探测器坏点的影响;此外,为消除扫描过程中的随机误差,需在每个天顶角位置进行多帧采集,将采集的多帧图像数据叠加后取平均值后作为这个天顶角下仪器的输出读数。由输出的仪器读数,通过定标模型即可解算出某次扫天实测辐亮度随天顶角的变化如图 4 中实线所示,其中阿里扫天测量时刻为 2017 年 10 月 25 日晚 21:48,德令哈扫天测量时刻为 2017 年 11 月 11 日 11:10,怀柔扫天测量时刻为 2017 年 11 月 22 日 16:20;而用标准大气模式模拟各个台站不同天顶角下大气红外辐射在测量波段内的平均辐亮度值分别如图 4 中虚线所示,模拟条件为:中纬度冬季大气模式、无云无降水,根据三个站点的实际天气情况,德令哈和阿里选择能见度为 23 km 的乡村型气溶胶,怀柔选择能见度为 5 km 的城市型气溶胶。

从扫天实测结果可知:天顶角从最小扫描至最大的过程中,阿里、德令哈、怀柔的实测大气红外辐射分别增加了 37.05%、57.57%、51.92%;各站点增

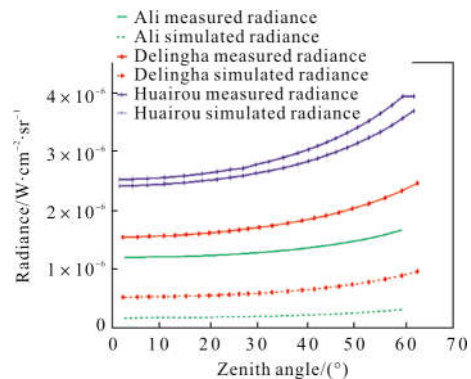


图 4 扫天测量与标准大气模式模拟比较

Fig.4 Comparison between sweeping measurement with standard atmospheric model simulation

量不同,其中阿里站增量最低,德令哈和怀柔增量都超过 50%,说明阿里大气红外辐射随天顶角的变化较小,而德令哈和怀柔的变化很大。阿里、德令哈、怀柔分别代表不同的海拔梯度,各自海拔分别为 5 100、3160、62 m,大气红外背景辐射随海拔变化的总体趋势是,随着海拔的增加,背景辐射将显著减小。因为近地面气温随着海拔的升高而逐渐降低,大气厚度变薄,低层大气中水蒸气的含量也大幅降低,导致对系统测量结果起最大贡献的低层大气中水汽辐射减弱,低层大气的辐射也减弱。由模拟结果可知:天顶角从最小增至最大,三地模拟的大气红外辐射分别增加 62.35%、74.66%、54.26%。对比模拟和实测结果可以看到:实测辐亮度与模拟辐亮度随天顶角的变化趋势相同,两者都随观测天顶角的增大而增大,其中怀柔站不同天顶角的模拟辐亮度与实测辐亮度间的最大相对偏差为 10.22%,而随着天顶角增加,模拟值与实测值逐渐增大,即在小天顶角条件下,模拟效果较好,而在高海拔的阿里和德令哈,模拟值与实测值差异都很大,模拟效果不好,说明标准大气模式不适用于模拟国内如阿里等青藏高原高海拔地区。

为了进一步分析实际大气模式对高海拔地区的模拟效果,文中查找了阿里和德令哈临近站点相近时间的探空气象数据,用地理位置接近的那曲站探空气象数据代表阿里站,用都兰站代表德令哈站,原站点和替代站点的海拔高度、经纬度信息如表 3 所示。除了大气温度的变化和云层外,大气水汽含量、气溶胶等也影响大气红外背景辐射。由于未对台站的气溶胶进行实测,模拟时仍选择标准大气模式中能见度为 23 km 的乡村型气溶胶;由实际探空温度和相对湿度根据参考文献[15]计算大气水汽含量  $q$  如下所示。

表 3 各站点信息

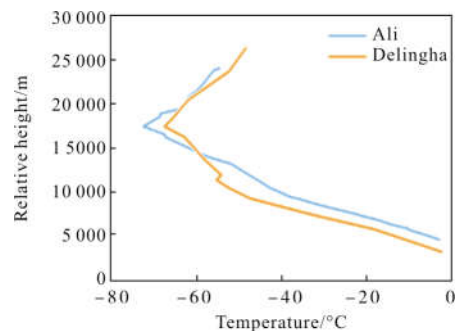
Tab.3 Information of every sites

Parameters	Ali	Naqu	Delingha	Dulan
Altitude/m	5 100	4 507	3 160	3 189
Longitude and latitude/(°)	80E, 32.5N	92.07E, 31.48N	97.33E, 37.22N	98.1E, 36.3N

$$E=6.112\exp\left(\frac{17.67 t}{t+243.5}\right) \quad (2)$$

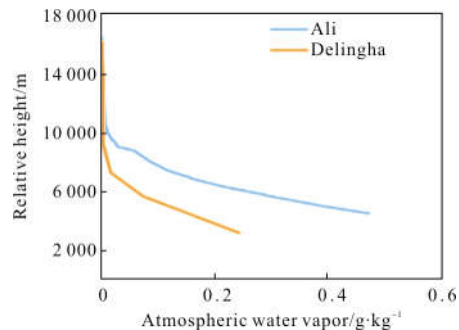
$$q=0.622\frac{f \times E}{P} \quad (3)$$

式中: $t$ 为温度; $f$ 为相对湿度; $p$ 为气压; $E$ 为饱和水汽压。可得到替代站点的气压和水汽含量廓线如图 5 所示。将探空气象数据输入到 MODTRAN 中,模拟得到实际大气条件下阿里、德令哈两地的背景辐射值。图 6 为阿里和德令哈两站点实际大气模拟值与测量值的对比,分析可知,输入实际探空气象参数后,不同天顶角的模拟辐亮度与实测辐亮度间相对偏差最大值与最小值之间的差值(PV 值),阿里为 9.96%,德令哈为 9.64%,两地实际大气模拟结果较标准大气模拟结果有了较大改善,替代效果较好;但无论是标准大气模式还是实际大气模式其最终模拟结果与实测结果间仍有较大偏差,且海拔越高模拟与实测间的偏差越大。所以在实际应用中,应尽可能考虑真实大气对红外辐射的影响。



(a) 温度

(a) Temperature



(b) 大气水汽含量

(b) Atmospheric water vapor

图 5 阿里德令哈站实际探空气象数据

Fig.5 Radiosonde data of Ali and Delingha station

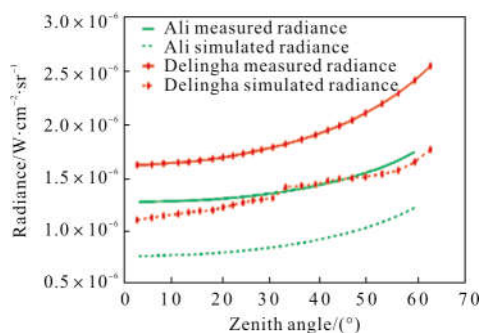


图 6 扫天测量与实际大气模拟比较

Fig.6 Comparison between sweeping measurement with actual atmospheric mode simulation

### 3 结论

通过对测量系统进行低温制冷和恒温控制,可有效扣除仪器辐射对测量结果的影响;通过三元模型定标,可提高目标大气辐射信号的解算精度;对所采集的图像进行滤波、帧平均处理等工作提高了测量系统的稳定性,使得系统能够测量出微弱的大气辐射及其随时间的起伏,同时系统具有良好的野外适应性。

利用定标后的系统对国内的阿里观测站、德令哈观测站、怀柔观测基地等几个典型天文台站的大气红外背景辐射进行实测分析,从测量结果可知:对大气辐射波动影响最大的因素是温度的变化和云层,其中温度是影响红外辐射的最重要因素。实测结果表明,在晴朗无云的天气条件下,三地的最高辐射亮度均值分别为:  $1.30 \times 10^{-6}$ 、 $2.44 \times 10^{-6}$ 、 $4.10 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。由此比较得到各台站大气红外背景辐射的相对强弱为:怀柔最强,德令哈次之,阿里最弱,此外阿里辐亮度昼夜变化也最小,相比之下在阿里红外背景辐射限最优,就背景辐射的实测评估而言,阿里台址最优,德令哈次之。

最后将辐射扫天测量结果与模拟结果进行比较,用标准大气模式分别计算了三地辐亮度结果,发现随着天顶角的增大,模拟与实测间的偏差逐渐增大,怀柔地区用标准大气模式且在小天顶角度下可得到较好的模拟结果,但是在高海拔地区(阿里、德令哈)且大天顶角下,不管是标准大气模式还是输入探空气象参数的实际大气模式,模拟与实测间都存在较大差异,不能简单地只由 MODTRAN 软件来模拟,最好实测。

### 参考文献:

- [1] Luo Qingming, Zeng Shaoqun, Liu Xiande. Simulation of infrared radiation of earth-atmosphere system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1996, 23 (1): 1-6. (in Chinese)  
 骆清铭, 曾绍群, 刘贤德. 地球大气系统红外辐射的仿真 [J]. 光电工程, 1996, 23(1): 1-6.
- [2] Westphal J. Infrared sky noise surver [C]//NASA-CR, Pssadena: California Institute of Technology (CALTECH), 1974.
- [3] Ashley M C, Burton M G, Storey J W, et al. South Pole observations of the near-infrared sky brightness [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1996, 108(726): 721-723.
- [4] Ashley M C. The near-IR and mid-IR sky background at the South Pole [C]//Proceedings of the Astrophysics From Antarctica, F, 1998.
- [5] Valenziano L, Cavaliere F, Miriametro A. Site testing in Antarctica: a mid-IR sky-noise measurement [J]. *Experimental Astronomy*, 1997, 7(4): 421-425.
- [6] 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, 110 (748): 747-753.
- [7] Phillips A, Burton M G, Ashley M C B, et al. The near-infrared sky emission at the South Pole in the winter [J]. *The Astrophysical Journal*, 1999, 527(2): 1009-1022.
- [8] Evans W F J, Puckrin E. Combined measurements of thermal emission and solar absorption of atmospheric carbon monoxide [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(13): 2081-2088.
- [9] Walden V, Town M, Halter B, et al. First measurements of the infrared sky brightness at Dome C, Antarctica [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2005, 117(829): 300-308.
- [10] Wei Heli, Chen Xionghong, Dai Congming, et al. Ground-based measurements of infrared atmospheric background spectral radiances [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 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(2): 284-290.
- [11] Dai Congming, Zhang Zhiyong, Ma Li, et al. Measuring and analysis of atmospheric transfer and environment



- background character on infrared telescope site [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 32–38. (in Chinese)
- 戴聪明, 张志勇, 马力, 等. 红外望远镜站址大气传输和环境背景特性的测量分析研究 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 32–38.
- [12] Wang Dong, Zhao Wei, Chen Yong, et al. Measurement of sky background infrared radiant intensity and analysis of it's effect on target detection [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(9): 774–777. (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): 774–777.
- [13] Zhao Zhijun, Xu Fangyu, Xu Shichun, et al. Measurement of atmospheric infrared radiance and extinction characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0401004. (in Chinese)
- 赵志军, 许方宇, 徐世春, 等. 大气红外辐射及消光特性实测研究[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0401004.
- [14] Chen Shuangyuan, Xu Fangyu, Wang Feixiang, et al. Measurement system and error analysis of mid-infrared atmospheric background radiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0301001. (in Chinese)
- 陈双远, 许方宇, 王飞翔, 等. 中红外大气背景辐射测量系统及误差分析[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0301001.
- [15] Guo Yanjun, Ding Yihui. Upper-air specific humidity change over China during 1958 - 2005 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38 (1): 1–12. (in Chinese)
- 郭艳君, 丁一汇. 1958–2005 年中国高空大气比湿变化[J]. 大气科学, 2014, 38(1): 1–12.