

大气红外辐射及消光特性实测研究

赵志军^{1,3}, 许方宇^{1*}, 徐世春², 黄一彬², 高玲²

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中国科学院大学, 北京 100049

摘要 应大口径红外望远镜选址需求, 研制了一台红外辐射测量设备, 对丽江天文观测站及澄江 M' 波段(4.605~4.755 μm)大气红外辐射与消光特性进行了实测。用 Allan 方差法和大气辐射传输方程分别对大气辐射的时间和空间变化数据进行了分析, 讨论了辐射时空变化对红外天文观测的影响。结果表明, 低频区的辐射涨落较大, Allan 方差随积分时间呈指数增加, 丽江和澄江的 Allan 方差拟合参数分别为 0.794 和 1.238。从天顶到 60° 天顶角, 丽江和澄江站的辐射亮度分别增大了 68% 和 72%, 透过率分别降至 0.46 和 0.52; 红外天文观测需斩波, 在丽江站, 探测器单像元、2×2 Binning、4×4 Binning 最佳斩波频率分别为 0.030, 0.070, 0.144 Hz。实测所得 Allan 方差、大气消光、最佳斩波频率可用于指导大口径红外望远镜的选址及设计。

关键词 大气光学; 红外探测; 大气辐射涨落; Allan 方差法; 大气消光; 天顶角扫描; 最佳斩波频率

中图分类号 TN215; P183.4; P422

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0401004

Measurement of Atmospheric Infrared Radiance and Extinction Characteristics

Zhao Zhijun^{1,3}, Xu Fangyu¹, Xu Shichun², Huang Yibin², Gao Ling²

¹Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China;

²Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on the demand of site selection for large infrared telescopes, an infrared radiation measurement device is developed to measure the M' band (4.605-4.755 μm) atmospheric infrared radiance and extinction characteristics at Lijiang and Chengjiang observatories. The data of temporal and spatial variations of atmospheric radiation is analyzed by Allan variance method and atmospheric radiative transfer equation, and the influence of temporal-spatial variation of radiation on infrared astronomical observation is discussed. The results show that the radiative fluctuation in the low frequency region is large, Allan variance increases exponentially with integration time, and the fitting parameters of Allan variance for Lijiang and Chengjiang observatories are 0.794 and 1.238, respectively. From zenith to 60° zenith angle, radiance of Lijiang and Chengjiang observatories increases by 68% and 72%, and the transmittance decreases to 0.46 and 0.52, respectively. Infrared astronomical observation needs chopping, and the best chopping frequencies at Lijiang observatory of the single pixel, 2×2 Binning and 4×4 Binning modes are 0.030, 0.070, 0.144 Hz, respectively. Allan variance, atmospheric extinction, and the best chopping frequency can be used to guide the site selection and design of large infrared telescopes.

Key words atmospheric optics; infrared detection; fluctuation of atmospheric radiance; Allan variance method; atmospheric extinction; zenith angle scanning; best chopping frequency

OCIS codes 010.1300; 010.1320; 120.5630; 110.3080

收稿日期: 2017-09-15; **收到修改稿日期:** 2017-11-07

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1231117, U1431122)、物质科学前沿与交叉研究 II(红外太阳物理)、江苏省自然科学基金(BK20170566)

作者简介: 赵志军(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事红外天文目标与背景辐射特性方面的研究。

E-mail: zjzhao@ynao.ac.cn

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

* **通信联系人.** E-mail: xu_fangyu@ynao.ac.cn

1 引 言

红外天文观测面临的一个主要问题是如何获得高信噪比的观测数据,天文学上通常采用建造更大口径的望远镜来收集更多信号,以实现更暗弱天体的探测;因增大口径较困难,决定信噪比的将是红外探测中的噪声水平。地面上的红外观测情况更加复杂,一方面红外信号强度受大气消光衰减的影响,另一方面,大气红外辐射的涨落成为噪声的一部分^[1]。因此地基红外探测的信噪比与大气消光、大气红外辐射均息息相关。本文通过对大气红外消光与大气红外辐射强度及其涨落进行测量,探索红外波段的选址方法,讨论大气红外辐射涨落对地基红外天文观测的影响。

国外学者在大口径红外望远镜选址方面十分关注对大气辐射涨落的测量。Westphal^[2]对美国、墨西哥、智利的红外天文台址的大气辐射涨落情况进行了长期监测,最早开展了 10 μm 波段大气红外辐射涨落特性的研究;Allen 等^[3]利用澳大利亚 3.9 m 望远镜,通过测量 0.6~10000 ms 内不同积分时间的大气红外辐射变化来研究 1.5~5 μm 的大气红外辐射涨落特性;Smith 等^[4]测量了南极点 8~17 μm 大气红外辐射及其涨落并与在澳大利亚所得的结果进行了对比;Miyata 等^[5]使用英国 3.8 m 红外望远镜测量了 N 波段(7.6~13.6 μm)内大气辐射涨落的光谱特性,并对不同波长处辐射涨落特性进行了比较。国内学者对大气红外辐射涨落特性的测量研究集中于大气红外辐射均值的测量。王东等^[6]利用热像仪对 3~5 μm 和 8~14 μm 的大气红外辐射亮度进行了测量研究,分析了其对空中目标探测距离的影响,但只考虑了大气红外辐射引入的光子噪声,未考虑辐射自身涨落的影响;戴聪明等^[7]利用傅里叶变换光谱仪对中国西部天文台址 8~14 μm 大气红外辐射进行测量,得到大气红外辐射亮度的光谱分布,但是未对辐射的涨落进行测量。大气消光与大气辐射涨落测量数据和相应的数据处理及分析方法的缺失,将不利于对台址的红外观测条件做出科学而全面的评价。

本文研制了一台整机制冷并控温的 3~5 μm 大气红外辐射测量装置,在中国科学院云南天文台的丽江观测站和云南澄江观测站对大气红外辐射及红外消光进行了测量。通过两地数据的对比分析,研究了测量数据的处理方法,得到了可评价台址红外观测条件的主要参数。测量采用如下 2 种模式:

1)时间序列采集模式。将设备指向正天顶进行连续数据采集,以获取大气红外辐射随时间的变化;采用 Allan 方差法^[8]研究其时间涨落特性,此方法由 Allan 提出,可用于辨识系统随机误差项的组成,具有良好的误差分离效果^[9]。2)天顶角扫描模式。对不同天顶角的大气红外辐射进行扫描观测,可以获取大气红外辐射随天顶角的变化,通过大气辐射传输方程对数据拟合可以得到大气消光参数。在所测的时间涨落数据基础上,采用 Allan 方差法分析大气红外辐射涨落对红外天文观测的影响,讨论了红外观测的最佳斩波频率问题。

2 测量设备及定标

2.1 测量设备

观测设备的光学系统口径为 7.5 cm,焦距为 2;设备搭载了制冷型 320×256 的红外焦平面探测器,像元尺寸为 30 μm ,探测器响应范围为 3.7~4.8 μm ;光学系统与探测器之间设计了可切换红外滤光片的装置,本次实验使用 M' 波段(4.605~4.755 μm)滤光片。

大气红外辐射及其涨落为弱信号,如果仪器工作在环境温度下,来自仪器的红外辐射通常远大于大气红外辐射及其涨落,使得探测器在很短的曝光时间内就达到饱和,限制通过增加曝光时间的方法来提高测量的信噪比。此外,仪器辐射将会随环境温度变化而出现涨落,此涨落将与大气辐射的涨落耦合在一起,导致无法准确测得大气红外辐射的涨落特性。克服仪器辐射及其涨落对测量工作影响的最有效手段是制冷及控温,因此设计了一套制冷及温控系统,将整台设备制冷到 -40 $^{\circ}\text{C}$,并控制仪器温度涨落在 ± 0.02 $^{\circ}\text{C}$ 以内。

观测前,需要开启制冷及温控系统,等待仪器降温并稳定后开始测量大气红外辐射及其涨落,这个过程大约需要 1.5 h,设备观测现场如图 1 所示。

2.2 辐射定标

要获取大气红外辐射亮度的绝对值,需要用标准辐射源(黑体)进行定标。由于所测波段大气辐射的等效黑体温度低于 0 $^{\circ}\text{C}$,理想的定标应采用对应温度的黑体。但是受实验条件所限,定标时不得已采用 0~20 $^{\circ}\text{C}$ 的黑体,通过测量多个温度的黑体辐射,并对测量数据进行最小二乘拟合,获取仪器的定标方程,这不仅降低了测量精度,还会面临测量系统动态范围不足而无法同时表征强的黑体辐射信号和弱的大气辐射信号的问题。为了克服这个问题,提



图1 丽江观测现场图

Fig. 1 Picture of observation scene in Lijiang

出二元定标模型,此模型有目标辐射亮度和曝光时间2个自变量。测试系统读数在1100~13000之间保持着良好的响应线性度,观测黑体和大气时只要保证二者的读数均在线性区间内即可。

二元定标模型的数学表达式为^[10-12]

$$I_{ij} = a_{ij}tL + b_{ij}t + c_{ij}, \quad (1)$$

式中 I_{ij} 是像元的仪器读数, L 是黑体某温度下的积分辐射亮度, t 是曝光时间, a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 是定标模型的待定系数。(1)式右边由三项组成,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;第二项既包括对制冷并恒温的仪器辐射的响应,又包括探测器暗电流的时间累积,单位时间内的响应系数是 b_{ij} ;第三项是截距项,系数 c_{ij} 在一定条件下是常数。

对20 cm×20 cm的面源常温黑体,分别在0~20℃等间隔的5个黑体温度点采用若干不同的曝光时间进行多点定标测量,通过(1)式对定标数据进行最小二乘拟合以确定 a_{ij} 、 b_{ij} 和 c_{ij} 。

3 测量结果及数据处理

2017年4月6—15日,在中国科学院云南天文台丽江天文观测站日冕楼顶进行了实测,从中选取了2017年4月12日夜间晴朗天气下的观测结果,将测量结果与云南澄江县某地夜间晴朗天气下的测量结果进行了对比分析。

3.1 大气辐射的时间涨落

在对天体目标的观测中,大气辐射的时间涨落将与天体信号的光度变化耦合在一起,严重影响观测精度。为了获取大气红外辐射的时间涨落特性,将望远镜指向正天顶方向进行凝视观测,采样周期 $t_0=0.04$ s,选取较稳定的一段时间序列,采用Allan方差法分析大气红外辐射的涨落特性。

Allan方差法的具体实现需要三个步骤^[13]:

1) 对于采样周期为 t_0 的 N 个数据点的时间序列数据 x_i ,取相邻的 $k \in (1, [N/2])$ 个数据点的平均值,对应的积分时间 $t=t_0k$,因此有

$$y_k(n+1) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{nk+i}, n=0,1,\dots,([N/k]-1), \quad (2)$$

式中 k 为平均帧数, $[N/k]$ 表示 k 帧平均后得到新序列数据的点数, $[\cdot]$ 代表取整运算。

2) 对 $[N/k]$ 个数据点相邻项作差:

$$\Delta y_k(n) = y_k(n+1) - y_k(n). \quad (3)$$

3) 由(3)式的差分信号序列可得Allan方差:

$$\sigma_{\text{Allan}}^2(k) = \frac{1}{2} \frac{1}{[N/k]-1} \sum_{i=1}^{[N/k]} [\Delta y_k(i)]^2. \quad (4)$$

根据(4)式可画出Allan方差随积分时间变化的曲线。

研究表明,视场角 $2'$ 以内的大气红外辐射的涨落表现出较强的相关性^[1],为了适当降低高频白噪声的影响,对测量结果中心视场附近的 3×3 个像元(视场角 $2.05'$)取平均值,定标后的大气辐射亮度涨落结果如图2(a)所示;用Allan方差法对丽江、澄江及实验室18℃黑体辐射亮度涨落结果进行对比分析,并将Allan方差曲线归一化,双对数结果如图2(b)所示。

图2(a)所示为丽江和澄江大气红外辐射亮度随时间涨落的情况,选取了相对稳定的1 h内的测量结果,辐射亮度由(1)式所示定标方程获得,其中丽江大气辐射亮度均值为 $2.372 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$,澄江大气辐射亮度均值为 $4.689 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$ 。从图2(a)可以看出,大气辐射亮度在平均值附近存在涨落且两地有差异,分别计算丽江和澄江大气辐射涨落的标准差并除以平均辐射亮度,可以得到两地大气辐射涨落的相对标准差分别为0.38%和0.53%,澄江观测站的大气辐射涨落比丽江观测站强。

由图2(b)可以看出,恒温黑体红外辐射的Allan方差曲线随积分时间呈下降趋势(在中低频区域涨落略有增大,这是黑体温控动作造成的);相对大气红外辐射,恒温黑体的Allan方差在低频区更小,说明黑体信号低频涨落小。大气红外辐射涨落的Allan方差曲线随积分时间先降后升,存在极小值,在高频区按 t^{-1} 规律下降,这是白噪声主导区,主要包括探测器读出噪声、暗电流噪声、目标和背景辐射的光子噪声;在低频区,澄江大气辐射涨落的Allan方差远高于丽江,但二者均按 t^p 的指数规

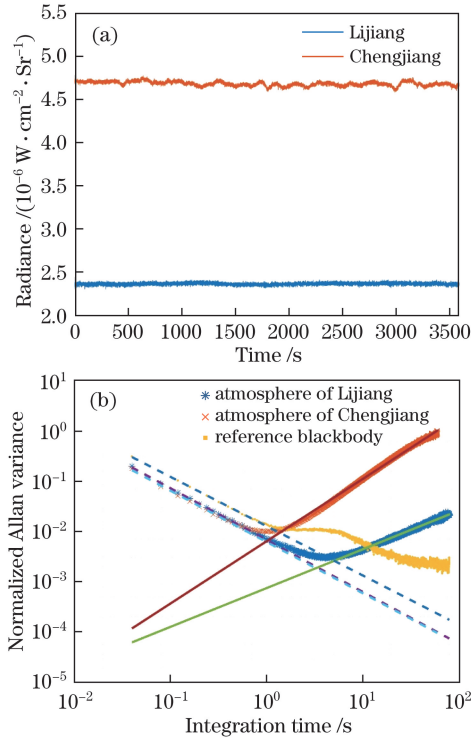


图 2 (a)大气红外辐射时间涨落;
(b)归一化 Allan 方差曲线的双对数图

Fig. 2 (a) Fluctuation of atmospheric infrared radiance;
(b) log-log graph of normalized Allan variance

律增加(p 为拟合参数)。对于丽江, $p = 0.794$, 对于澄江, $p = 1.238$, 这是大气红外辐射低频涨落主导区, 澄江大气辐射低频涨落明显高于丽江, 而且随积分时间变化更快。

不同台址大气辐射涨落的 Allan 方差在低频区的大小及其随积分时间变化的快慢均不同, p 表征 Allan 方差随积分时间变化的快慢, 可通过对比 Allan 方差及 p 的大小来比较和评价不同台址的红外观测条件。

3.2 大气辐射与消光随天顶角的变化

在对红外天文目标跟踪观测过程中, 目标可能划过较大的天顶角范围。大天顶角意味着大的光学深度(光深), 所以天顶角的变化会带来两方面的影响: 1) 大气对天体信号的吸收随天顶角的增大而增加; 2) 根据基尔霍夫定律, 在大气温度稳定的平衡态下, 由于吸收增加, 大气在红外波段的热发射也必然随天顶角的增大而增加。吸收率和发射率随天顶角变化所表现出的一致性, 使得不需要大气外定标源, 仅通过测量不同天顶角处大气辐射亮度即可得到大气消光参数。

地球大气在从地面至 60 km 范围内需要考虑局部热平衡, 将地球大气简化为单层均匀大气, 地

面接收到的 M' 波段内大气辐射可由均匀大气的辐射传输方程表示^[14]:

$$I_{\bar{\lambda}} = [1 - \exp(-\tau_0 \sec z)] \cdot B_{\bar{\lambda}}(T), \quad (5)$$

式中 z 为观测天顶角, $\bar{\lambda}$ 为 M' 波段的平均波长, T 为大气平均温度, $B_{\bar{\lambda}}(T)$ 为温度为 T 时的黑体辐射亮度, τ_0 为 M' 波段在正天顶处的大气平均光深。对给定测光带, 大气温度稳定时, 红外辐射亮度由某天顶角处的平均光深决定。

为了便于拟合, 令 $m_a = \sec z$ 为 z 处的大气质量, z 由电子测角仪测得。当仪器辐射稳定时, 对不同大气质量的实测数据进行最小二乘拟合:

$$I = a [1 - \exp(-\tau_0 \sec z)] + b = a [1 - \exp(-\tau_0 m_a)] + b, \quad (6)$$

式中系数 a 由正天顶方向大气辐射亮度决定, 系数 b 由来自仪器的辐射决定, τ_0 、 a 、 b 这 3 个参数均由观测数据拟合得到。

对丽江和澄江不同天顶角的大气红外辐射亮度进行了测量, 在尽可能短的时间内(10 s 左右), 将望远镜从正天顶扫描至 60° 天顶角, 获取大气红外辐射随天顶角变化的数据; 测量时, 丽江近地面温度为 8.5 °C, 澄江的温度为 15.6 °C。利用(6)式对观测到的数据进行直接拟合, 将拟合后的常数项 b 移除; 然后, 对正天顶处大气辐射的读数进行归一化并乘以定标得到的正天顶处的大气辐射亮度, 可得大气红外辐射亮度随大气质量变化的规律, 曲线如图 3 所示。

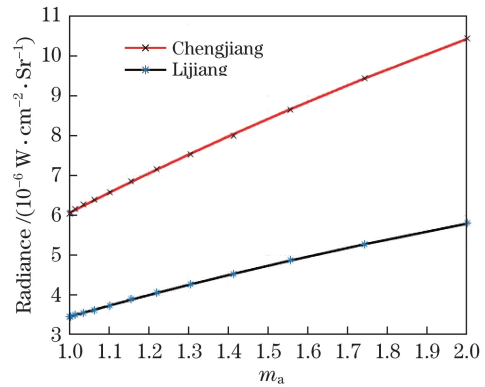


图 3 大气红外辐射亮度随大气质量变化关系

Fig. 3 Atmospheric infrared radiance changed with air mass

图 3 所示为丽江和澄江地区大气红外辐射随大气质量变化的测量及拟合结果, 通过(6)式拟合得到两个地点正天顶方向的 τ_0 。对于丽江, $\tau_0 = 0.3831$, 拟合相关系数 $R^2 = 0.9999$; 对于澄江, $\tau_0 = 0.3266$, 拟合相关系数 $R^2 = 0.9998$ 。根据天顶角和大气质量的函数关系可以得到大气辐射亮度随天顶角的变

化规律,从正天顶(大气质量为 1)到 60° 天顶角(大气质量为 2),丽江的辐射亮度增加了 68%,澄江的辐射亮度增加了 72%。正天顶方向的大气透过率 $e^{-\tau_0}$ 也不同,丽江正天顶大气透过率为 0.68, 60° 天顶角处降为 0.46;澄江正天顶大气透过率为 0.72, 60° 天顶角处降为 0.52。

综上所述,通过测量不同天顶角(大气质量)的大气辐射亮度,一方面获得了大气辐射随天顶角的变化规律;另一方面,不需要大气外定标源,只需通过大气辐射传输方程对不同天顶角的辐射亮度数据进行拟合即可得到大气消光参数,用于评价天文台址的红外观测条件。

4 辐射时空涨落的影响分析与讨论

实测结果显示大气红外辐射存在很强的低频涨落,并且随着天顶角的变化,大气红外辐射和消光参数的变化非常剧烈,这严重影响了红外天文观测。在红外天文实测中,除通过多帧叠加延长积分时间来降低白噪声的影响外,还可采用调制技术,通过斩波来消除大气红外辐射低频涨落及空间变化的影响,即交替观测有目标的天空和无目标的天空,二者相减所得的差分信号即包含天体信息。一个斩波周期将被有目标和无目标的一对积分时间所占据^[15]。斩波频率将由所要采用的观测积分时间来决定,积分时间的选择由信噪比决定,因此,差分信号涨落[方差 $\sigma^2(k)$]越小,积分时间就越短。

Allan 方差法的步骤 1)、2)分别对应多帧叠加和斩波,步骤 3)所得 Allan 方差为斩波后差分信号方差的 0.5 倍,即 $\sigma^2(k) = 2\sigma_{\text{Allan}}^2(k)$,这表明斩波后差分信号的方差同 Allan 方差有同样的变化规律,可以利用 Allan 方差法来讨论大气辐射的时间涨落对斩波的影响。

红外天文观测中,还会采用 Binning 技术提高信噪比,将相邻的多个像元进行平均。基于丽江观测站测量得到大气红外辐射随时间涨落的数据,利用 Allan 方差法,分别考察常用的单像元、 2×2 Binning 及 4×4 Binning 观测模式,差分信号涨落的方差随积分时间变化规律的归一化结果如图 4 所示。

由图 4 可知,在大气红外辐射涨落限制下观测方差随观测积分时间的变化,方差曲线存在极小值,极值点对应最佳积分时间。在短积分时间区域, $\sigma^2(t) \propto t^{-1}$,即方差与积分时间(参与平均的帧数)成反比;在长积分时间区域, $\sigma^2(t) \propto t^{0.794}$,即方

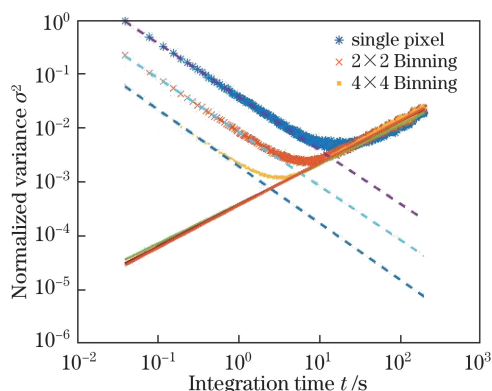


图 4 不同 Binning 模式的方差随积分时间变化的双对数图
Fig. 4 Log-log graph of variance changed with integration time under different Binning modes

差随积分时间的增加而增大。不同 Binning 模式对应不同的极小值和最佳积分时间,参与 Binning 的像素数量越多,其方差极小值也越小;在短积分时间区域,通过 Binning 技术可以有效降低方差;在长积分时间区域,多像元 Binning 不会再降低方差,这部分的影响可以通过斩波来消除。单像元、 2×2 Binning 及 4×4 Binning 对应的最佳积分时间分别为 16.720, 7.120, 3.480 s, 对应的斩波频率分别为 0.030, 0.070, 0.144 Hz。根据实测数据,考虑到大气辐射的缓变特性以及测量的随机噪声情况,较低的斩波频率便可消除大气红外辐射涨落的影响,降低系统的设计要求。

5 结 论

从大口径红外望远镜的选址、设计和建造的需求出发,研制了一台大气红外辐射测量设备,对中国科学院云南天文台丽江天文观测站及云南澄江 M' 波段的大气红外辐射及消光特性进行了测量及对比分析,探索红外望远镜选址的方法。用 Allan 方差法和大气辐射方程分别对设备时间序列采集模式和天顶角扫描模式所得数据进行处理及分析,利用 Allan 方差在低频区随积分时间变化的拟合参数 p 和由大气光深 τ_0 得到的透过率参数可对台址的红外观测条件进行综合评价。实测结果表明,在低频区,丽江的 Allan 方差比澄江小,丽江的拟合参数 p 为 0.794,澄江的 p 为 1.238,澄江的 Allan 方差随积分时间变化更快;丽江正天顶红外辐射亮度均值为 $2.385 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$,大气透过率为 0.68, 60° 天顶角的辐射增加了 68%,透过率降为 0.46;澄江正天顶辐射亮度均值为 $4.689 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$,大气透过率为 0.72, 60° 天顶角的辐射增加了 72%,

透过率降为 0.52。

为避免大气红外辐射强烈低频涨落和大幅度空间梯度的影响,红外天文观测需要望远镜斩波。利用 Allan 方差法,在实测大气红外辐射时间涨落数据的基础上,讨论了不同 Binning 模式的大气红外辐射涨落对红外观测及斩波的影响。结果表明,Binning 可以有效降低高频(短积分时间)涨落,但不会改变低频(长积分时间)涨落的方差;每个 Binning 模式的方差都存在极小值,极值点对应最佳积分时间,单像元、 2×2 Binning 及 4×4 Binning 对应的最佳积分时间分别为 16.720, 7.120, 3.480 s, 据此可得最佳斩波频率分别为 0.030, 0.070, 0.144 Hz。对大气红外辐射和消光特性的测量及分析方法满足了大口径红外望远镜选址的需要,且为将来望远镜设计、建造及观测模式的选择积累了经验。

参 考 文 献

- [1] Papoular R. The processing of infrared sky noise by chopping, nodding and filtering[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1983, 117: 46-52.
- [2] Westphal J A. Infrared sky noise survey[R]. Pasadena: California Institute of Technology (CALTECH), 1974.
- [3] Allen D A, Barton J R. A study of sky noise, 1.5-5 microns[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1981, 93(953): 381-384.
- [4] 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.
- [5] Miyata T, Katata H, Okamoto Y, *et al.* Mid-infrared camera and spectrometer (MICS) and sky noise measurement in the N-band[C]. *SPIE*, 2000, 4008: 842-853.
- [6] Wang D, Zhao W, Chen Y, *et al.* Measurement of sky background infrared radiant intensity and analysis of it's effect on target detection[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(9): 774-779.
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.
- [7] Dai C M, Zhang Z Y, Ma L, *et al.* Measuring and analysis of atmospheric transfer and environment background character on infrared telescope site[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1204005.
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): 1204005.
- [8] Allan D W. Statistics of atomic frequency standards[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1966, 54(2): 221-230.
- [9] Zhao S H, Lu M Q, Feng Z M. IMU error analysis based on a simplified Allan variance method[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(12): 12-14.
赵思浩, 陆明泉, 冯振明. 基于一种简化 Allan 方差法的 IMU 误差分析[J]. *传感器与微系统*, 2010, 29(12): 12-14.
- [10] Luo M J, Zhou J M, Fu J N, *et al.* Integration time as variable for radiometric calibration of infrared system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 36-40.
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.
- [11] Sun Z Y, Chang S T, Zhu W. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0712006.
孙志远, 常松涛, 朱玮. 大口径、宽动态范围红外测量系统辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0712006.
- [12] Zhang Y N, Zheng X B, Li J J, *et al.* Research on system level calibration method of multi-band filter radiometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0812004.
张艳娜, 郑小兵, 李健军, 等. 多波段滤光片辐亮度计的系统级定标方法研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0812004.
- [13] Barnes J A, Chi A R, Cutler L S, *et al.* Characterization of frequency stability[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 1971, 20(2): 105-120.
- [14] Léna P, Lebrun F, Mignard F. *Observational astrophysics*[M]. New York: Springer, 2012.
- [15] 郝允祥, 陈培生, 周克平. *红外天文学导论*[M]. 北京: 北京大学出版社, 1993.