

基于辐射传输的 M' 波段大气透过率实测和误差分析

陈双远^{1,2}, 王飞翔^{1,3}, 许方宇^{1*}, 郭杰^{3*}, 肖建国⁴, 贾钰超⁴, 徐稚¹, 赵志军⁵, 王远方舟^{1,3}

- (1. 中国科学院云南天文台 天文光电实验室, 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. 云南师范大学 云南省光电信息技术重点实验室, 云南 昆明 650500;
4. 云南北方驰宏光电有限公司, 云南 昆明 650217;
5. 河南师范大学 物理学院, 河南 新乡 453007)

摘要: 采用自制的 M' 波段(4.605~4.755 μm) 红外辐射测量系统对阿里观测站、德令哈观测基地和怀柔观测基地的大气辐射进行实地测量, 并对结果进行拟合和误差分析。首先, 基于黑体定标结果和辐射传输方程, 得到输出有效读数与平均大气透过率和天顶角的关系公式; 在三个站点对不同天顶角下的大气红外辐射进行扫描测量, 利用上述公式, 拟合出 M' 波段平均大气透过率。结果表明, 三地透过率的加权平均值分别为 0.805、0.758、0.650, 透过率随时间的起伏分别为 0.081、0.250、0.073, 高海拔的阿里观测站透过率最高。用 MODTRAN 软件模拟的平均透过率分别为 0.851、0.805、0.615, 与实测结果接近; 误差分析表明: 有效读数越大, 传递误差越小, 此方法的理论误差优于 10%。文中提供了一种不依赖气象数据, 实时获得大气透过率的方法。

关键词: 大气透过率; 大气辐射测量; 红外系统; 误差分析

中图分类号: P414.5; TH751; P422 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1203006

Measurement and error analysis of the atmospheric transmissivity in M' band based on radiative transfer

Chen Shuangyuan^{1,2}, Wang Feixiang^{1,3}, Xu Fangyu^{1*}, Guo Jie^{3*}, Xiao Jianguo⁴, Jia Yuchao⁴, Xu Zhi¹, Zhao Zhijun⁵, Wang Yuanfangzhou^{1,3}

- (1. Astronomical Opto-electronic Laboratory, 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. Yunnan Key Laboratory of Optic-electronic Information Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;
4. Yunnan KIRO-CH Photonics Co. Ltd, Kunming 650217, China;
5. School of Physics, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: The atmospheric infrared radiance was measured at Ali, Delingha and Huairou observing station using a self-made measurement system in the infrared M' (4.605–4.755 μm) band. Based on the blackbody calibration and the radiative transfer equation, a simplified relation between the effective output value, the average zenith atmospheric transmissivity and the zenith angles can be obtained. Atmospheric

收稿日期: 2019-08-05; 修订日期: 2019-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(11873091, 11803089); 云南省应用基础研究计划青年项目(2017FD069)

作者简介: 陈双远(1991-), 男, 硕士, 主要从事红外天文技术方面的研究。Email: syuanchen@nao.cas.cn

infrared radiation of different zenith angles at three Astronomical Station were measured and scanned, and the above formula was used to fit the average atmospheric transmissivity of the M' band. The measurement results show that the weighted average values of the atmospheric transmissivity in the three places are 0.805, 0.758 and 0.650 respectively, with the fluctuations of 0.081, 0.250, and 0.073 respectively. The average transmissivity simulated by MODTRAN software was respectively 0.851, 0.805, 0.615, which was close to the results from the measurement. The error analysis shows that the propagation error decreases with the increasing effective output value. The theoretical error of indirect measurement method was analyzed to be less than 10%. This paper provided a on-site and real-time measuring method of the atmospheric infrared transmissivity independent of meteorological data.

Key words: atmospheric transmissivity; atmospheric radiance measurement; infrared systems; error analysis

0 引言

红外波段大气透过率是红外辐射传输研究的一个重要参数,对空间红外目标探测、红外遥感、红外天文学等领域均有重要意义。获得大气透过率的方法有三种:理论计算、软件模拟和实地测量。其中,理论计算利用经验公式得到大气透过率的近似结果,不能满足高精度的需求^[1]。大气辐射传输软件如 LOWTRAN、MODTRAN 和 LBLRTM 等可模拟透过率,但软件模拟结果的可靠性依赖于分子吸收数据库的准确性,并受大气复杂多变的影响^[2]。近年来,通过直接测量大气辐射获得大气透过率的研究受到关注。其中红外标准星法是通过测量不同天顶角下红外标准星辐射穿过大气层消光后的亮度,由 Beer 定律得到大气透过率。如 Bhattacharyya、刘俊池、詹杰等研究小组^[3-5]都是基于该方法得到红外波段大气整层透过率。除红外标准星方法外,吴庆川等^[6]利用激光外差技术,把太阳作为定标源,获得了 4.4~4.5 μm 范围高光谱分辨率的大气透过率。魏合理等^[7]采用傅里叶转换红外光谱技术对长波红外大气辐射进行实测,发现大气辐射随大气透过率增大而减小,大气窗口区大气辐射与天顶角密切相关,当观测天顶角增大时大气辐射也增大,但在一些强吸收波段对天顶角的变化却不敏感。郝允祥等^[8]测量天顶方向辐射亮度与大气透过率时发现在可见光或近红外波段两者之间存在线性相关关系。赵志军等^[9]基于大气辐射与大气透过率间的负相关关系得到一种获取天顶平均大气透过率的简便方法。

文中采用的实测方法不需要标准星,基于辐射传输方程计算得到大气透过率。使用自制的一套红外 M' 波段(4.605~4.755 μm)望远镜和探测系统,分别在国家天文台阿里观测站、紫金山天文台德令哈观测基地和国家天文台怀柔观测基地对大气辐射进行实测。利用输出的有效读数与天顶角的关系,拟合得到天顶平均透过率,最后通过误差传递理论进一步分析了间接测量透过率的理论误差。

1 测量原理和测试系统定标

1.1 测试原理

大气辐射(包括向上辐射和向下辐射)可以视为大气在传输路径上辐射的叠加和吸收的共同结果。高空大气稀薄且温度较低,对大气向下辐射的贡献较小可以忽略,而在 50 km 以下的地球大气中,空气分子密度大,碰撞频繁,大气向下辐射对地基天文目标观测的影响颇大。近地空间大气可以作为局部热平衡的无散射介质来考虑。辐射束通过它时会同时发生吸收和发射两种过程,且局部辐射的吸收与发射可认为基本相等;因此,可将大气视作平面平行大气,在垂直方向上是“分层”的。在假定局域大气是平面平行的条件下,通过解普遍的辐射传输方程得到地面接收的辐射如下^[10]:

$$L(\tau_0, \Omega) = L(0, \Omega) \exp\left(-\frac{\tau_0}{u}\right) + \frac{1}{u} \int_0^{\tau_0} J(\tau, \Omega) \times \exp\left(-\frac{\tau_0 - \tau}{u}\right) d\tau \quad (1)$$

式中: $u = \cos\theta$, θ 为天顶角; $L(\tau_0, \Omega)$ 为在地面接收的辐射亮度; $L(0, \Omega)$ 为入射大气前的辐射亮度; τ 为

某层大气光学厚度,取顶层边界 $\tau=0$,地面边界 $\tau=\tau_0$; Ω 为空间角; J 为源函数,考虑处于局域热平衡的无散射平面平行大气,它可用 plank 函数 $B[T(\tau)]$ 来表示。所测目标为大气,不考虑入射辐射源,即 $L(0, \Omega)=0$,且不考虑 Ω 的影响, $B[T(\tau)]$ 在所观测波段内随光学厚度和波长连续变化,由积分中值定理可知,一定存在某一函数值 B'_{λ} ,使得在通带内的积分辐射亮度为:

$$L_{\lambda_1-\lambda_2}(\tau)=\frac{B'_{\lambda}}{\pi}\Delta\lambda\left(1-\frac{1}{\Delta\lambda}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}e^{-\tau_{\lambda}\sec\theta}d\lambda\right) \quad (2)$$

式中: λ_1, λ_2 分别表示观测的起始波长;在测量系统通带 $\lambda_2-\lambda_1=\Delta\lambda$ 内令 $\bar{\tau}$ 表示天顶平均光学厚度,则公式(2)的积分项可表示为:

$$\bar{\beta}_\theta=e^{-\bar{\tau}\sec\theta}=(\bar{\beta})^{\sec\theta} \quad (3)$$

式中: $\bar{\beta}$ 为天顶平均大气透过率,所以通带内的积分辐射亮度与天顶角的关系为:

$$L_{\lambda_1-\lambda_2}(\tau)=\frac{B'_{\lambda}}{\pi}\Delta\lambda[1-e^{-\bar{\tau}\sec\theta}]=\frac{B'_{\lambda}}{\pi}\Delta\lambda[1-(\bar{\beta})^{\sec\theta}] \quad (4)$$

该简化式建立了大气辐射亮度与天顶平均光学厚度或天顶平均大气透过率间的关系。需要说明的是该方法仅适用于大气窗口区的弱吸收和弱辐射波段,该测量系统的信号响应波段设计为 M' 波段 (4.605~4.755 μm),在这个波段内,并无强吸收和强辐射,且透过率起伏不大,测量过程中均是在晴朗无云的条件下进行,满足上述条件。

1.2 测试系统定标

为了精确测量目标辐射亮度,通常需要在实验室利用黑体获得辐射量与测试系统中红外探测器输出读数的关系,称为定标。文中采用目标辐射、积分时间以及仪器自身辐射的三元定标模型,解决传统一元定标模型中动态范围不足,受环境温度(仪器辐射)变化导致测量精度下降的问题。参考文献[11-12]给出了具体的定标方法。拟合出的定标关系式如下:

$$R=487\ 546.142\ 5\times L_{\text{signal}}\times t+8\ 489.284\ 8\times L_{\text{amb}}\times t+2.549\ 2\times t+707.004\ 7 \quad (5)$$

式中: R 为系统输出读数; t 为积分时间; L_{signal} 为系统工作波段内大气辐射亮度; L_{amb} 为环境温度(或仪器辐射)信号。在实际测量中,积分时间固定不变,扫描时间短环境温度亦可看做不变,由公式(4)、(5)可得到输出读数与天顶平均透过率的简单关系为:

$$R_{\text{effect}}=a(1-e^{-\tau\sec\theta})+b=a[1-(\bar{\beta})^{\sec\theta}]+b \quad (6)$$

式中: R_{effect} 为系统输出的有效读数; a, b 为拟合常数。由于定标中黑体的最低温度为 $0\text{ }^\circ\text{C}$,大气在 M' 波段辐射的等效黑体温度约为 $-19\text{ }^\circ\text{C}$,因此,探测器对大气辐射的输出读数是外推量,外推值与真实值之间存在偏差,故添加截距项 b 参与实际拟合,参数 b 考虑到系统对大气辐射的测量是外推测量,外推测量值与真实值之间存在偏差,故添加截距项 b 参与实际拟合。

通过测量不同天顶角下的大气红外辐射亮度(简称扫天),再根据公式(6)进行最小二乘拟合即可得到天顶平均透过率 $\bar{\beta}$ 。

2 扫天实测及数据处理

测量系统是一个口径为 75 mm 的红外望远镜,参考文献[12]详细概述了望远镜结构及红外探测器性能。于 2017 年 10~11 月,分别对阿里观测站、德令哈观测基地和怀柔观测基地的大气红外辐射进行扫天测量。图 1 是三地扫天实测有效读数随天顶角的变化关系。

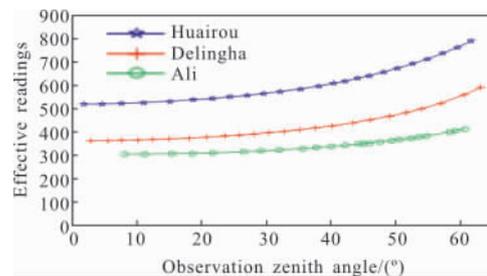


图 1 仪器有效读数随天顶角的变化

Fig.1 Variance of instrument effective readings with zenith angle

为了减少测量过程中大气的变化导致的测量不准确性,尽可能在短时间内完成扫天。实验时间为 10 s,扫描步长 $0^\circ\sim 4^\circ$ 。天顶角(θ)扫描范围最大不超过 80° ,因为当 $\theta\geq 80^\circ$ 时,由于地球表面的弯曲和光折射效应的影响,以 $\sec\theta$ 计算大气质量将存在较大差异。此外,对三个台站的扫天测量皆是在晴朗无云时进行,分别在白天和晚上间隔若干小时测得一组数据。德令哈和怀柔基地的测量较为充分,测得 30 组,阿里站由于条件恶劣,测得有效数据仅 10 组。为降低红外探测器坏点和扫描过程中随机误差的影响,先将采集的原始图像进行中值滤波后取平均值作为

一个系统输出读数;为减少系统随机误差,在每个天顶角位置进行 1000 帧采集再平均。表 1 为阿里、德令哈、怀柔三个站点实测数据的拟合情况,输出读数处于 300~800 间,拟合的相关系数均超过 99.98%,标准差均小于 0.475。

表 1 三个站点一次测量数据的拟合结果

Tab.1 Fitting results of measurement data of three astronomical observation stations

Stations	Fitting parameters	Numerical values	99.73% confidence interval	R_square	RMSE
Ali	Average optical depth	0.227	0.166-0.287	0.999 8	0.475
	Average transmissivity	0.797	0.788-0.884		
De-lingha	Average optical depth	0.215	0.196-0.234	0.999 97	0.381
	Average transmissivity	0.806	0.785-0.827		
Huairou	Average optical depth	0.407	0.390-0.424	0.999 97	0.431
	Average transmissivity	0.666	0.650-0.681		

对全部实验数据的统计表明:阿里 10 组实测数据拟合相关系数均大于 99.9%,德令哈 30 组实测数据拟合相关系数均大于 99.7%,怀柔 30 组实测数据拟合相关系数均大于 99.9%,三地数据拟合精度都比较高。最终得到在 99.73%置信度($\pm 3\sigma$)下,三地天顶平均透过率估计值及其误差棒图如图 2 所示。

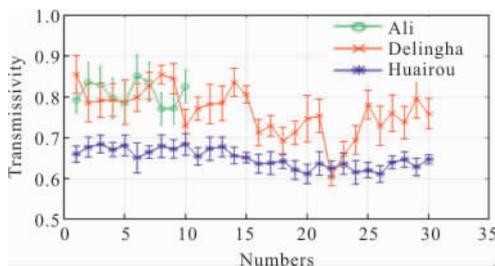


图 2 三个天文台站平均透过率误差棒图

Fig.2 Error bar charts of average transmissivity of three astronomical observation stations

由图 2 可知,各地透过率是一个时变量,随时间不断起伏。为比较三地透过率起伏情况,计算所有组

透过率数据的极差和标准差,如表 2 所示。以极差来衡量透过率起伏时,怀柔的起伏量最小,仅 0.073,其透过率的变化在三地当中最稳定;阿里的透过率起伏不大,为 0.081;德令哈透过率的起伏相对要大很多,起伏达到 0.250,透过率的起伏可以与透过率本身相比拟,说明德令哈的透过率很不稳定。

表 2 三个站点所有组透过率比较结果

Tab.2 Comparative result of measurement transmissivity data of three astronomical observation stations

	Ali	Delingha	Huairou
Maximum	0.852	0.855	0.685
Minimum	0.771	0.605	0.612
Polar difference	0.081	0.25	0.073
Standard deviations	0.029 5	0.057 6	0.023

进一步对所有透过率测量数据进行加权平均处理,利用 99.73%(3σ)置信度的半区间建立权重向量 $\omega_j=1/(3\sigma)^2$,计算透过率的加权平均值为 $\bar{t}=\sum t_j\omega_j/\sum \omega_j$, ω_j 为每组测量值的权重, t_j 为每组拟合透过率。计算得到阿里、德令哈、怀柔透过率加权平均值分别为 0.805、0.758、0.650;同理计算得到三地光学厚度的加权平均值分别为 0.215、0.273、0.430。总体表明,阿里观测站加权平均透过率最高,德令哈次之,怀柔最低。说明海拔对透过率的影响很大。

3 各站点透过率的软件模拟

利用 MODTRAN 软件模拟了阿里、德令哈、怀柔的大气透过率,模拟条件均利用了当地(或附近)探空数据,其中包括了垂直温度、相对湿度、大气压强等信息,海拔高度分别设置为 5,3 和 0 km,光谱分辨率皆为 1 cm^{-1} ;得到阿里、德令哈、怀柔三地在 M' 波段内整层光谱透过率值以及平均透过率值如图 3 所示,三地模拟平均透过率分别为 0.851、0.805、0.615。从软件模拟结果来看,各地模拟平均透过率基本能与实测结果对应,说明通过扫天测量大气红外辐射间接得到平均透过率的方法可行。

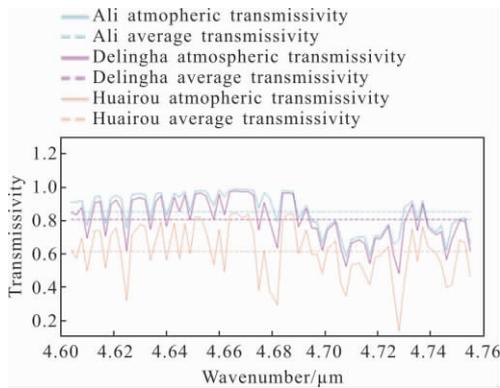


图 3 MODTRAN 模拟的光谱透过率和平均透过率

Fig.3 MODTRAN simulated spectral transmissivity and average transmissivity

4 误差分析

实验中对天顶平均透过率的测量是一种间接测量,天顶角 θ 测量和系统输出有效读数 R_{effect} 的系统误差和随机误差都将随拟合公式传递到最终透过率的误差中。其中, θ 测角系统误差较小,可忽略,因此仅 R_{effect} 的系统误差向天顶平均透过率系统误差的传递。测量中对系统都是进行稳恒的低温控制,总体而言系统稳定。怀柔的透过率变化最为稳定,拟合精度也非常高,在 99.73%置信度情况下,拟合透过率的随机误差优于 3.65%,所以,间接测量天顶平均大气透过率随机误差(α_1)为 3.65 %。

由于仅考虑 R_{effect} 的系统误差向天顶平均透过率 $\bar{\beta}$ 系统误差的传递,由误差传递理论知天顶平均透过率系统误差 $\Delta\bar{\beta}$ 可表示为:

$$\Delta\bar{\beta} = \frac{\partial\bar{\beta}}{\partial R_{\text{effect}}} \times \Delta R_{\text{effect}} \quad (7)$$

通过公式(6)变形得到天顶平均透过率,表示为公式(8),再对系统输出有效读数值 R_{effect} 求偏导,得到公式(9):

$$\bar{\beta} = e^{\frac{1}{\sec\theta}} \ln\left(1 - \frac{R_{\text{effect}} - b}{a}\right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial\bar{\beta}}{\partial R_{\text{effect}}} = -\frac{\bar{\beta}\cos\theta}{a+b-R_{\text{effect}}} \quad (9)$$

偏导数随系统输出有效读数 R_{effect} 的变化如图 4 所示,由图可知,系统输出有效读数值越小,偏导项公式(9)的值将越大;不仅如此,大气辐射测量是外推测量,信号越弱,外推误差越严重,系统输出有效

读数的偏差 ΔR_{effect} 也越大,即公式(7)右边相乘的两个项同时取得最大值。系统输出有效读数值 R_{effect} 的系统误差相对值,已在参考文献[12]中进行详细分析,其极限百分比 u 为 12.64%;故 ΔR_{effect} 为:

$$\Delta R_{\text{effect}} = u \times R_{\text{effect}} \quad (10)$$

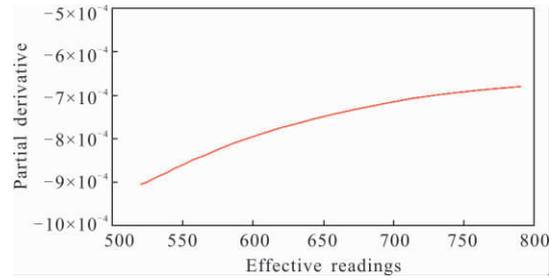


图 4 偏导项随有效读数的变化

Fig.4 Variation of partial derivative with effective readings

将有效读数 R_{effect} 的最小值以及对应天顶角 θ ,拟合的天顶平均透过率和系数 a 、 b 等值代入公式(9)可计算得偏导项值,再由公式(7)计算得:

$$\bar{\beta} = \frac{\partial\bar{\beta}}{\partial R_{\text{effect}}} \times \Delta R_{\text{effect}} = \frac{\bar{\beta}\cos\theta}{a+b-R_{\text{effect}}} \times \Delta R_{\text{effect}} = 0.060 \quad (11)$$

此时天顶平均透过率的系统误差相对值(α_2)为:

$$\alpha_2 = \frac{\Delta\bar{\beta}}{\bar{\beta}} = \frac{0.060}{0.649} = 9.24\% \quad (12)$$

综合考虑系统误差和随机误差,则间接测量天顶平均大气透过率的理论误差,为:

$$\alpha = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} = \sqrt{(3.65\%)^2 + (9.24\%)^2} = 9.93\% \quad (13)$$

5 结论

基于辐射传输方程的简化解,通过测量多个天顶角下的大气红外辐射,能够拟合得到天顶平均大气透过率。基于误差传递理论,间接测量大气红外透过率的理论误差小于 10%。相较于采用标准星测量红外大气透过率的方法,基于辐射传输方程的扫天测量方法可以把测量用望远镜口径从米级缩减到厘米级,因此,有机会在天文选址阶段对各址点大气的红外透过率进行一般评估。该方法相较于 LOWTRAN、MODTRAN 等软件对透过率的估算,不需要获取复杂的大气气象参数,故相对简洁。在阿里观测站、德令哈观测基地和怀柔观测基地的测量工作表明:阿里、德令哈、怀柔三地大气红外透过率依次递减,透

过率的加权平均值依次为 0.805、0.758、0.650。各地大气红外透过率均有起伏,怀柔与阿里的起伏相对较小,起伏仅 0.073 和 0.081;透过率起伏与透过率高低无关,透过率低的地方,透过率起伏也可能比较稳定。

参考文献:

- [1] Wu Hanping. Research into theoretical calculation method on engineering of transmittance of infrared radiation through atmosphere [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(4): 35-43. (in Chinese)
吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究[J]. 光学精密工程, 1998, 6(4): 35-43.
- [2] Liu Dandan, Huang Yinbo, Dai Congming, et al. Calculation of upper atmospheric transmittance and radiation in mid-infrared region [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2324-2329. (in Chinese)
刘丹丹, 黄印博, 戴聪明, 等. 中红外波段高空大气传输透过率及热辐射计算 [J], 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2324-2329.
- [3] Bhattacharyya J C, Scaria K K, Singh Jagdev, et al. Atmospheric extinction measurements at Leh in near infrared bands [J]. *Bulletin of the Astronomical Society of India*, 1990, 18(18): 1-6.
- [4] Liu Junchi, Li Hongwen, Wang Jianli, et al. Measurement of mid-infrared total atmospheric transmittance and its error analysis[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1547-1557. (in Chinese)
刘俊池, 李洪文, 王建立, 等. 中波红外整层大气透过率测量及误差分析[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1547-1557.
- [5] Feng Quanquan, Zhan Jie, Liu Qing, et al. Study on measurement technology of total atmospheric transmittance at night [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0617005. (in Chinese)
冯全全, 詹杰, 刘庆, 等. 夜间整层大气透过率测量技术研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 0617005.
- [6] Wu Qingchuan, Huang Yinbo, Tan Tu, et al. High-resolution atmospheric transmission measurement with a laser heterodyne radiometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(6): 1678-1682. (in Chinese)
吴庆川, 黄印博, 谈图, 等. 基于激光外差技术的高分辨率整层大气透过率测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(6): 1678-1682.
- [7] Wei Heli, Chen Xiuhong, 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.
- [8] Hao Yunxiang, Zhang Baozhou, Zheng Xiaodong, et al. The observation of the relationship between the zenith luminance and atmospheric transmissivity [J]. *Acta Energetica Sinica*, 1991, 12(2): 209-213. (in Chinese)
郝允祥, 张保洲, 郑晓东, 等. 天顶光亮度与大气透过率关系的观测[J]. 太阳能学报, 1991, 12(2): 209-213.
- [9] Zhao Zhijun, Xu Fangyu, Wei Chaoqun, et al. Study on measurement method of infrared total atmospheric transmittance [J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(7): 718-722. (in Chinese)
赵志军, 许方宇, 魏超群, 等. 红外整层大气透过率测量方法研究[J]. 红外技术, 2018, 40(7): 718-722.
- [10] Liao Guonan. An Introduction to Atmospheric Radiation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 27-34. (in Chinese)
廖国男. 大气辐射导论[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 27-34.
- [11] Zhao Zhijun, Xu Fangyu, Gao Ling, et al. Multivariate calibration model for measurement of 3-5 μm infrared sky brightness [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1004004. (in Chinese)
赵志军, 许方宇, 高玲, 等. 3~5 μm 红外天空亮度测量的多元定标模型[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 1004004.
- [12] 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.