

兴隆观测基地的大气色散实测研究

向 娥¹,王汇娟²,许克峰¹,姜晓军²

- (1. 中国科学院软件研究所 天基综合信息系统重点实验室,北京 100190;
2. 中国科学院国家天文台 光学天文重点实验室,北京 100012)

摘 要: 大气色散会影响高分辨率成像、测光和光谱观测的质量。利用国家天文台兴隆观测基地 80 cm 望远镜获得了四个波长范围和五个天顶距的大气色散实测值,波段范围为 360~440 nm、360~550 nm、360~640 nm 和 360~790 nm,天顶距分别为 59.8°、57.6°、48.1°、47.8°和 36.4°。讨论了实验过程中的四种主要误差来源,测量精度约为 0.6"。根据观测时的天顶距、温度、湿度和气压等数据,结合大气折射模型计算了观测当时的理论大气色散值,与实测值进行了对比分析,结果基本吻合。对大气色散的影响因素和大气色散对高精度天文观测的影响进行了探讨,为大口径高精度天文观测提供了减小大气色散影响的方法。大气色散实测和理论计算结果表明:该方法可获得较高精度的大气色散值;大气色散对大口径望远镜的高精度天文观测影响较大,需要根据观测目的采用辅助设备来减小大气色散的影响。
关键词: 大气色散; 大气折射; 天顶距; 误差分析

中图分类号: P113 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0411003

Experimental study of atmospheric dispersion at Xinglong observatory

Xiang E¹, Wang Huijuan², Xu Kefeng¹, Jiang Xiaojun²

- (1. Science and Technology on Integrated Information System Laboratory, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Atmospheric dispersion affects the observation quality of high-resolution imaging, photometry and spectrometry. It obtained atmospheric dispersion of four bands including 360–440 nm, 360–550 nm, 360–640 nm and 360–790 nm, according five zenith angles including 59.8°, 57.6°, 48.1°, 47.8° and 36.4°, with an 80 cm telescope at Xinglong Observatory. Four main sources of error were discussed in detail, and the accuracy of the measurement was about 0.6". Based on the zenith angle, the temperature, the humidity and the atmospheric pressure during observation, the theoretical value of atmospheric dispersion was calculated. The results of the calculation and measurement are consistent well with each other. In addition, it discussed the influence factors of atmospheric dispersion and their effect on high precision astronomical observation, and offered solutions for decreasing atmospheric dispersion for large

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(11303042)

作者简介: 向娥(1986-),女,博士,主要从事高分辨率成像技术和图像处理方面的研究。Email:xiange@iscas.ac.cn

telescope. The calculation and measured results show that: the observation method can achieve adequate precise result; and the effect of atmospheric dispersion is obvious for high-accuracy astronomical observation with large telescope, and corresponding auxiliary equipment is needed to decrease or correct atmospheric dispersion for different observation.

Key words: atmospheric dispersion; atmospheric refraction; zenith angle; error analysis

0 引言

地基天文观测中,大气折射会使非天顶观测目标的视位置发生偏折,这种偏折与波长有关,目标不同颜色的光偏折程度不一致,从而产生色散。大气色散是由于大气对不同波长光线的折射率不同造成的色散效应。在天顶距较大时,宽波段高分辨力成像观测中大气色散会导致望远镜分辨力下降;在光纤光谱观测中,大气色散使目标能量分布超过光纤孔径造成能量损失^[1-2]。自适应光学系统中,大气色散会带来信标光波长与成像光波长的非等晕性误差^[3],使相位补偿不完全^[4]。事后图像重建的高分辨率成像方法中,大气色散效应不仅会降低高分辨率成像图像的分辨率(对于扩展目标,会使其图像变得模糊不清),还会增加图像重建的难度^[5]。

目前国内大多数都是利用基本大气模型进行软件仿真和数值计算,来研究和修正大气折射和大气色散对观测的影响^[3-7],然而不同观测站的大气条件会随着气候和环境发生变化^[8],仿真和数值计算的结果和真实值有一定差别。文中在兴隆观测基地对当地不同天顶距的大气色散进行了实测,并根据测站海拔、观测时的天顶距、温度、湿度和气压等数据,结合大气折射模型计算望远镜视场中的大气色散理论值,与实测值进行对比分析,从而量化大气色散对高精度天文观测的影响。

文中首先在兴隆观测基地 80 cm 望远镜进行了大气色散观测实验,并根据观测条件理论计算了观测当时的大气色散值,与实验结果进行了对比分析;随后仿真分析了大气色散对高精度天文观测的影响。

1 大气色散观测实验

笔者申请了中国科学院国家天文台兴隆观测基地(海拔 900 m)80 cm 望远镜的观测时间,开展了大气色散的实验观测,选择 U、B、V、R 和 I 五个

波段进行观测。80 cm 望远镜是一台反射望远镜,卡焦系统,焦比为 $F/10$,探测器为 PI 1300 LN,液氮制冷($-110\text{ }^{\circ}\text{C}$),像元 $20\text{ }\mu\text{m}/\text{pixel}$,靶面大小为 $1\ 300\times 1\ 340\text{ pixel}$,像元匹配为 $0.52\text{ (")}/\text{pixel}$,视场 $11.2'\times 11.5'$,使用 Johnson 滤光片系统。读出速度选择最快读出(1 MHz),读出时间 2 s,读出噪声 5.92 e^- ,增益 $2.13\text{ e}^-/\text{ADU}$ 。考虑到大气色散值在天顶距较大时数值较大更有利于测量,因此在观测时大多选择天顶距大的目标源。2014 年 12 月 12 日和 2016 年 1 月 1 日夜,对天顶距为 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的六个目标天区进行了观测,其观测流程如下:

(1) 指向目标天区:保证视场中有亮星以便进行高精度位置测量,以其中天顶附近的天区为例,观测图像如图 1 所示。

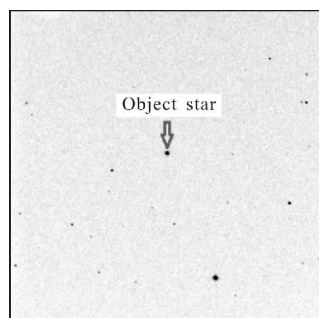


图 1 观测原始图像 (07:42:06, +40 26 43)

Fig.1 Original observational image (07:42:06, +40 26 43)

(2) 获取预处理图像:拍摄本底十幅图像,U、B、V、R、I 波段的平场各五幅,用于图像预处理;

(3) 获取大气色散数据:每个天区在 U、B、V、R、I 五个波段轮换观测,各拍三轮,然后 U 和 I 波段轮换观测五轮,曝光时间 5~40 s,读出速度选择最快读出;

(4) 跟踪精度及稳定性测试:在望远镜跟踪的情况下,选择两个天区,同一天区相隔 10 min 各拍一幅图像,用于望远镜的跟踪精度测试;选择三个天区,曝光 5 s,连续拍摄 5 min,用于望远镜稳定性测试。

2 大气色散数据处理

2.1 数据处理方法

大气折射和大气色散的原理在之前的参考文献中都有较为详细的介绍^[3],这里就不再累述。由于大气色散引起不同波长的光位置发生变化,利用 Johnson 滤光片获得恒星不同波段图像,在 IRAF 软件中利用 PSF 拟合的方法获得恒星星像中心位置,从而用较差的方法获得特定波长范围的大气色散实测值。图像处理流程如下:

(1) 分别对不同波段的图像进行预处理(减本底、除平场),修正光学系统和像元之间的不均匀性;

(2) 对预处理后的图像进行 PSF 拟合,记录星像中心的坐标值;

(3) 分别计算同一颗恒星的 U 波段和其他波段位置差,取平均值即为大气色散实测值;

(4) 利用证认图确认目标星,根据观测时间、恒星赤经赤纬、测站的地方恒星时计算观测当时的恒星天顶距。

2.2 实测数据处理结果

通过上述方法进行数据处理,获得了不同高度角四个波长范围的大气色散值,如表 1 所示,第一~二列为目标观测天区,第三列为观测目标的天顶距(ZA),后四列分别为实测的四个波长范围大气色散值,单位为角秒,括号内的为标准偏差。实测结果表明:大气色散随天顶距和波长范围增大而增大。同时,笔者等也注意到,观测结果中测量的标准偏差较大,尽管测量误差较大,足以说明大气色散的影响及其变化趋势。

表 1 不同波段大气色散实测值

Tab.1 Atmospheric dispersion measured results of different wavelengths

| Region | | ZA | 360-440 nm/(") | 360-550 nm/(") | 360-640 nm/(") | 360-790 nm/(") |
|-----------|------------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| RA(h:m:s) | DEC(°:':") | | | | | |
| 01:00:36 | +09:56:49 | 59.8 °W | 1.55(0.34) | 2.26(0.56) | 2.76(0.32) | 3.35(0.41) |
| 07:30:16 | +06:01:11 | 57.6 °E | 1.29(0.12) | 1.83(0.35) | 2.41(0.30) | 2.87(0.20) |
| 02:00:00 | +17:04:00 | 48.1 °W | 1.06(0.11) | 1.52(0.05) | 2.01(0.04) | 2.02(0.30) |
| 04:00:20 | +04:57:52 | 47.8 °W | 0.92(0.19) | 1.35(0.20) | 1.59(0.16) | 2.17(0.23) |
| 08:00:45 | +14:53:35 | 36.4 °E | 0.60(0.20) | 0.94(0.11) | 1.23(0.28) | 1.51(0.41) |
| 07:42:06 | +40:26:43 | 2.4 °W | - | - | - | 0.12(0.28) |

注:表格中第四~七列为不同波段的大气色散实测值,括号内为标准偏差。

2.3 观测误差分析

从前面的观测和数据处理过程来看,大气色散实测结果的误差来源主要包括以下四个方面:(1) 观测时使用 Johnson 滤光片系统,UBVRI 五个滤光片的波段较宽,观测使用的恒星颜色不同对其在 CCD 上的位置会有一些影响,利用大气透过率、望远镜前端光学系统效率、CCD 量子效率曲线和滤光片透过率曲线粗略估计其引起的误差不超过 0.18";(2) 不是同时获得各波段的图像,大气色散在不同时间随着恒星高度和大气折射密度的变化而变化,观测同一颗恒星的天顶距变化小于 1.5°,理论值计算由此引起的大气色散值误差不超过 0.22";(3) 数据处理中的定位精度也会引入一定误差,但是对于长曝

光、高信噪比的图像来说,图像定位精度能达到 0.1 pixel(0.05"),相对于前两种误差来说很小,基本可以忽略;(4) 望远镜的稳定度和跟踪系统误差也存在一定程度上影响了大气色散的测量精度,为此对 80 cm 望远镜进行了测试。

选择两个观测天区和天顶附近进行了稳定度测试,使用单一滤光片跟踪恒星进行连续拍摄 5 min,曝光时间 5~10 s。通过提取恒星位置,80 cm 望远镜在天顶附近的稳定度为 0.20 (")/5min,与该望远镜历史数据相符;天顶以东 36.8°和天顶以西 59.5°两个观测天区附近的稳定度测试结果分别为 0.17 (")/5 min 和 0.41 (")/5 min。由此可以看出,在观测天顶距较大时望远镜的稳定度较差。另外,通过对望远镜的历史

观测数据处理发现望远镜的跟踪存在 0.28 (")/10 min 的系统误差。另外，还测试了天顶附近 360~790 nm 的大气色散值，约为 0.12"，比理论值相差 0.03"，在其误差范围内是可信的。

通过上面的分析可知，大气色散实测实验使用了宽带滤光片、非同时位置测量和望远镜的稳定性等条件限制，大气色散实测精度约为 0.6"。此次观测实验一方面为兴隆观测基地积累了实测大气色散数据，另一方面为优化观测方案和进一步高精度测量提供有效参考。

3 数据处理结果分析及讨论

3.1 大气色散计算公式

影响大气色散的因素主要包括大气温度、湿度、气压、海拔高度、观测目标的天顶距和观测波长范围等^[9-10]，一般情况下，大气湿度对大气色散的影响较小，可忽略不计^[3]。常用的大气折射模型包括 Elden 模型，Rank 模型，Owens 模型和简化模型，在天顶距小于 60°时，Elden 模型和 Owens 模型计算结果保留到千分位是相同的，Rank 模型略大，简化模型略小且与其他模型差别较大^[11]。当天顶距大于 75°时，基于模型的数值计算结果误差较大。文中利用 Elden 大气折射率公式和观测时环境参数计算大气色散理论值^[12]：

$$n=1+0.379 \times \frac{7.5 \times 10^{-3} p [1+7.5 p (0.817-0.0133 t) \times 10^{-9}]}{t+273.15}$$

$$\left(83.4213 + \frac{24060.3}{130-\lambda^{-2}} + \frac{159.97}{38.9-\lambda^{-2}} \right) \times 10^{-6}$$

式中：大气压强 p 的单位为 Pa，温度 t 的单位为 °C，光波波长 λ 的单位为 μm ，适用的波长范围约为 0.2~2.06 μm 。

在天顶距小于 60°的情况下，大气折射近似计算公式如下^[13]：

$$\rho=z'-z \approx 206265(n_{\lambda}-1)\tan z$$

式中： ρ 、 z' 、 z 和 n_{λ} 分别表示大气折射、真天顶距、视天顶距和在某一波长下的大气折射率。上式的推导过程详见参考文献 [13]，其结果完全取决于观测点的大气参数^[13]。上式的误差随着天顶距的增大而增大，当天顶距为 60°时，利用上式计算的蒙气差与天文年历中的结果相差仅为 0.6"，计算结果精度较高。

大气色散与波长相关，波长为 λ_1 和 λ_2 光经过大气的折射产生的蒙气差分别为：

$$\rho_1=z'-z \approx 206265(n_{\lambda_1}-1)\tan z$$

$$\rho_2=z'-z \approx 206265(n_{\lambda_2}-1)\tan z$$

则不同波长星光经过大气产生的大气色散为：

$$\Delta\rho=\rho_1-\rho_2 \approx 206265(n_{\lambda_1}-n_{\lambda_2})\tan z$$

当天顶距为 60°时，利用上式计算的大气色散值与参考文献 [3] 中利用迭代方法计算的结果相差 0.005"，计算结果精度满足要求。

3.2 大气色散实测数据与理论计算值的比较

在实际观测中，由于大气压和气温是经常变化的，不可控，因而在面对具体需求时，需要根据观测站的实际情况进行理论计算。2014 年 12 月 12-13 日和 2016 年 1 月 1 日，天气晴，观测期间平均相对湿度分别为 25%和 40%，平均温度分别为 -9°和 -3°，平均气压为 918.3 hPa 和 919.6 hPa。

为了与实测大气色散值进行对比，根据测站当时的实测环境条件，利用大气折射模型计算不同高度和不同波长范围的大气色散理论值，结合表 1 分析比较了理论计算和实测大气色散值，结果如表 2 所示。表 2 中第一列为观测目标的天顶距，后四列为

表 2 不同波段大气色散计算值与实测值的比较

Tab.2 Comparison of the calculation and experiment results of atmospheric dispersion at different wavelengths

| ZA | 360-440 nm/(") | | | 360-550 nm/(") | | | 360-640 nm/(") | | | 360-790 nm/(") | | |
|-------|----------------|------|----------|----------------|------|----------|----------------|------|----------|----------------|------|----------|
| | T | O | Δ | T | O | Δ | T | O | Δ | T | O | Δ |
| 59.8° | 1.54 | 1.55 | -0.01 | 2.62 | 2.26 | 0.36 | 3.11 | 2.76 | 0.35 | 3.58 | 3.35 | 0.23 |
| 57.6° | 1.42 | 1.29 | 0.13 | 2.41 | 1.83 | 0.58 | 2.85 | 2.41 | 0.44 | 3.28 | 2.87 | 0.41 |
| 48.1° | 1.00 | 1.06 | -0.06 | 1.70 | 1.52 | 0.18 | 2.02 | 2.01 | 0.01 | 2.32 | 2.02 | 0.30 |
| 47.8° | 0.99 | 0.92 | 0.08 | 1.68 | 1.35 | 0.33 | 2.00 | 1.59 | 0.41 | 2.30 | 2.17 | 0.13 |
| 36.4° | 0.66 | 0.60 | 0.06 | 1.13 | 0.94 | 0.19 | 1.34 | 1.23 | 0.11 | 1.54 | 1.51 | 0.03 |
| 2.4° | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.09 | 0.12 | -0.03 |

注：表格中第二~十三列为不同波段大气色散值，包括理论计算值、实测值及其差值。

四个波长范围大气色散理论值(T)、实测值(O)和两者差值(Δ),单位为(")。分析结果表明理论值与实测值的差值基本都在一倍标准误差以内,实测结果与理论计算的结果一致,且其趋势与数值计算值基本相符。

4 大气色散对高精度天文观测的影响分析

天文观测通常包括高分辨率成像、光度观测、位置测量和光谱观测三种方式。从前面的实测结果来看,大气色散对高精度天文观测有较大的影响,为了充分研究大气色散的影响,数值计算了兴隆观测基地(XL)和丽江观测站(LJ,海拔 3 200 m)的三个波段对应的不同天顶距的大气色散值,参见表 3。

表 3 兴隆与丽江台站的大气色散计算值
Tab.3 Calculation values of atmospheric dispersion at Xinglong observatory and Lijiang observatory

| ZA | Observational band | | | | | |
|-----|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
| | 0.4-0.7 μm | | 0.7-0.9 μm | | 0.9-1.7 μm | |
| | XL | LJ | XL | LJ | XL | LJ |
| 10° | 0.26" | 0.20" | 0.05" | 0.04" | 0.05" | 0.04" |
| 20° | 0.55" | 0.41" | 0.10" | 0.07" | 0.11" | 0.08" |
| 30° | 0.87" | 0.64" | 0.16" | 0.12" | 0.17" | 0.13" |
| 40° | 1.26" | 0.94" | 0.23" | 0.17" | 0.25" | 0.19" |
| 50° | 1.79" | 1.33" | 0.33" | 0.24" | 0.35" | 0.26" |
| 60° | 2.60" | 1.93" | 0.47" | 0.35" | 0.52" | 0.38" |
| 70° | 4.12" | 3.07" | 0.75" | 0.56" | 0.82" | 0.61" |
| 80° | 8.51" | 6.33" | 1.55" | 1.16" | 1.69" | 1.26" |

注:冬季,兴隆压强 93 100 Pa,丽江压强 69 300 Pa,温度-20 °C

4.1 大气色散对高分辨率成像的影响

由理论计算结果可以看出,当观测目标的天顶距大于 33°和 48°时,其大气色散值分别大于 1.8 m 望远镜在 0.9 μm 和 1.7 μm 波段的衍射极限,在进行低高度角观测时,大气色散的影响非常严重。对于更大口径的高分辨力成像望远镜时,大气色散对其影响更为显著。以丽江站建设 4 m 望远镜为例,当观测目标的天顶距大于 16°和 27°时,其大气色散值分别大于该望远镜在 0.9 μm 和 1.7 μm 的衍射极限。

因此在 2 m 级及更大口径望远镜进行高分辨力成像观测时,若要实现衍射极限的观测,仅有自适应光学系统是不够的,为了获得接近衍射极限的观测,应当配备大气色散改正系统。目前国际上大型望远镜一般都采取了消除大气色散影响的措施,以实现高分辨率成像。根据理论计算结果,丽江观测站由于海拔较高、大气压强较小,其相同波段范围的大气色散值均小于兴隆观测基地,为了减小大气色散影响,未来建设大口径望远镜时应尽量选择高海拔(大气压较小)的台址。

表 4 不同口径望远镜的衍射极限

Tab.4 Diffraction limit of different aperture telescope

| Aperture | Diffraction limit/(") | |
|----------|-----------------------|-----------------------|
| | 0.7-0.9 μm | 0.9-1.7 μm |
| 1 m | 0.23 | 0.43 |
| 1.8 m | 0.13 | 0.24 |
| 4 m | 0.06 | 0.11 |

注:望远镜的衍射极限以观测波长范围的红端计算。

4.2 大气色散对其他高精度天文观测的影响

大气色散会引起非天顶距目标的星像拉长,天顶距越大时恒星星像拉长越明显,在一定程度上影响目标的信噪比和定位精度。在未使用大气色散改正仪器时,高精度测光、定位和光谱观测时,分别使用不同的方法进行应对。

在利用孔径测光进行测光处理时,孔径过小会引起测光误差,因此需要根据不同天顶距的图像采用自适应孔径或者较大的孔径。在进行更高精度测光处理时,一般使用点扩散函数(Point Spread Function, PSF)进行测光。在进行观测目标定位时,大气消光 and 不同颜色大气色散引起的位置会导致定位精度下降,需要通过大气标校的方法来提高目标定位精度。光谱观测中通常使用狭缝和光纤来获取目标,由于大气色散的影响,观测时狭缝方向需要一直指向天顶,保证大气色散的光也能进入狭缝;使用光纤时,需要对适当扩大光纤口径,保证观测目标的光都能通过光纤进入到光谱仪中。

5 结论

文中利用兴隆观测基地 80 cm 望远镜,对天顶

距范围 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的大气色散进行了实地测量, 实测结果与理论计算结果基本一致, 证实了大气色散测量的可行性, 为大气色散的进一步精确测量提供了重要参考。利用数值计算的方法, 以兴隆观测基地和丽江观测站为例, 分析了大气色散对高精度天文观测的影响。从大气色散理论计算和实测结果中发现, 大气色散对高分辨成像的影响是不可忽视的, 特别是在天顶距大于 60° 时, 在很大程度上影响了展源目标高分辨成像的清晰度和点源的空间分辨率, 限制了自适应光学系统的成像效果。为了获得清晰的高分辨图像, 减小大气色散影响的最有效方法是为望远镜设计安装大气色散改正系统以对大气色散进行补偿, 比如配置大气色散改正系统等。在不具备此条件的情况下, 可选择趋于可见光偏红波段或者近红外的的工作波段, 还可以利用窄波段进行观测。

由于目前望远镜稳定性和跟踪系统还不够好, 非同时获得不同波段的图像和使用的宽带滤光片这几个因素在一定程度上限制了实测结果的精度。下一步将通过改进观测方法(如: 多波段同时观测等)、提高设备稳定性等途径提高观测精度, 深入开展大气色散高精度测量的研究, 该研究将有望应用于大气折射模型修正。

致谢: 感谢张天萌研究员和翟萌共享的观测时间, 感谢兴隆观测基地 80 cm 望远镜的观测助手辅助观测。

参考文献:

- [1] Sun Aiqun, Hu Jingyao. Atmospheric refraction effects on large-field multiobject spectroscopy [J]. *Acta Astrophysica Sinica*, 1997, 17(2): 213–218. (in Chinese)
- [2] Liu Genrong, Yuan Xiangyan. The correction of atmospheric dispersion in LAMOST [J]. *Acta Astrophysica Sinica*, 2005, 46(3): 331–342. (in Chinese)
- [3] Zhang Xuejun, Jiang Wenhan. Numerical calculation and results analysis for atmospheric refraction and atmospheric dispersion [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(2): 1–5, 34. (in Chinese)
- [4] Feng Yuezhong, Song Zhengfang, Gong Zhiben. Atmospheric dispersion in adaptive optics [J]. *J Infrared Millim Waves*, 1991, 10(3): 217–221. (in Chinese)
- [5] Yao Huiling, Jin Zhenyu, Xiang Yongyuan. A study of influences of atmospheric dispersion on the multi-waveband synchronous high-resolution reconstruction applied to solar images [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2015, 12(2): 189–195. (in Chinese)
- [6] Ming Ming, Lv Tianyu, Wu Xiaoxia, et al. Influence of atmospheric dispersion on image resolution of 4 m telescope and correction method[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 814–822. (in Chinese)
- [7] Wang Donghe, Wang Xijun, He Xin, et. al. High-precision correction of atmospheric refraction in optical measurement applications [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(4): 45–51. (in Chinese)
- [8] Lu Weiyi, Yuan Ke'e, Hu Shunxing, et al. Effect of atmospheric refraction on opto-electronic engineering in arid area[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 291–297. (in Chinese)
- [9] Han Yan, Qiang Xiwen, Feng Jianwei, et al. Height distribution profiles and its application of atmosphere refractive index [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 267–271. (in Chinese)
- [10] Li Shuanggang, Nie Jinsong. Effect of atmospheric refraction to electro-optical reconnaissance and orientation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S3): 170–173. (in Chinese)
- [11] Xiang E. Application of lucky imaging technology in astronomical observation [D]. Beijing: National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2015: 22. (in Chinese)
- [12] Lucchini C, Gaignebet J, Hatat J. Validation of two color laser ranging-comparison between: index integrated on the trajectory and index at the station [C]//Ninth International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 1996, 2: 628–634.
- [13] Yan Haojian, Fu Yang, Hong Zhenjie. An Introduction of Modern Atmospheric Refraction [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 2006. (in Chinese)