

白天卫星激光测距望远镜指向误差修正方法研究

翟术然^{1,2}, 张忠萍^{1,3}, 张海峰¹, 吴志波¹, 邓华荣¹, 王亮亮¹, 孟文东¹

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210008)

摘要: 白天卫星激光测距时, 由于望远镜机架受太阳辐照和温度变化等因素影响, 指向误差时变性较大, 影响了对白天卫星的精确跟踪指向。针对卫星过境天区, 提出了一种通过白天恒星监视, 实现望远镜局部指向误差快速修正的方法, 消除环境温度变化效应, 实现高精度望远镜指向。以中国科学院上海天文台 60 cm 口径卫星激光测距系统为平台, 应用短波截止滤光技术, 实现了对亮于 3 等恒星的白天监视; 并在卫星过境天区选择到 6 到 7 颗恒星进行观测, 建立望远镜局部指向误差修正模型, 以满足白天激光观测需求。该方法对白天卫星测距特别是高轨卫星等具有一定应用价值, 也可推广到其他需白天目标观测的望远镜系统。

关键词: 卫星激光测距; 白天指向模型; 光谱滤波; 白天恒星监视; 局部指向修正

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2016.07.001

Research on telescope pointing error correction of SLR in the daytime

ZHAI Shu-ran^{1,2}, ZHANG Zhong-ping^{1,3}, ZHANG Hai-feng¹,

WU Zhi-bo¹, DENG Hua-rong¹, WANG Liang-liang¹, MENG Wen-dong¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: For SLR in the daytime, the time-varying characteristics of pointing error are large because of the influence of the solar irradiation and the temperature change, which will affect the pointing accuracy of tracking satellites. For the sky region where the satellites pass through in the daytime, the local pointing error correction method based on star monitor in the daylight is proposed to reduce the effect of atmosphere temperature variation and realize high accurate telescope pointing. Based on the SLR system with 60 cm aperture at Shanghai Astronomical Observatory, the ability of monitoring stars with the brightness brighter than the magnitudes of three has been achieved by using the short-wave cut-off filter in front of the camera. The 6 or 7 stars in the above mentioned sky region are selected to observe, and the local pointing error correction model is set up. The measuring results show that the pointing errors along the trajectory of satellite pass can meet the requirement of daylight tracking and telescope pointing. This method has certain practical value for daylight SLR, especially for high-orbit satellites and it can also be applied to the other telescope systems for daylight observation.

Key words: SLR; daylight pointing model; spectral filtering; daylight star monitor; regional pointing correction

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 11503068, No. 11303074, No. u1231107) 资助。

作者简介: 翟术然 (1989 -), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为卫星激光测距应用研究。E-mail: zhaishuran@shao.ac.cn

通讯作者: 张忠萍 (1960 -), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为卫星激光测距应用研究。E-mail: zzp@shao.ac.cn

收稿日期: 2015-10-29

1 引言

卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)应用研究中,白天卫星观测可增加卫星观测弧长和观测数据量,在提升卫星测定轨精度、测定地球自转参数变化等方面具有重要的应用价值。由于白天激光测距强烈的天空背景噪声影响难以对目标星象进行监视,致使无法通过采用监视目标星象方法进行位置调整,弥补卫星预报误差和机架指向误差。因此相对夜间测距而言,白天激光测距对望远镜指向精度要求更高^[1]。

一般情况下,通过建立指向误差模型实现望远镜指向误差修正,即在夜间通过观测天空中均匀分布的恒星,建立望远镜指向模型,以纠正望远镜机架轴系的系统误差^[2]。而在白天卫星激光测距过程中,对于开放式圆顶望远镜,太阳位置变化使得望远镜机架受热不均,环境温度不断变化,从而导致望远镜机架指向误差发生变化。为提高白天望远镜指向稳定性,激光测距台站可采用随动式圆顶来减小阳光对望远镜的照射,其中澳大利亚 Mt. Stromlo 站采用了全封闭恒温圆顶,以减少温度及太阳照射对望远镜指向的影响,望远镜指向精度达 $1.5''$ 。另外国内外还有许多观测站,包括上海天文台卫星激光测距站,望远镜圆顶为开放式,白天测距时望远镜完全暴露在空中,受阳光照射不均匀、环境温度变化等因素影响较大,白天指向误差达到数十角秒,不能满足白天望远镜指向修正要求,不利于对卫星位置搜索和捕获。

为解决上述问题,考虑到望远镜指向修正的快速性、实时性要求,满足特定过境天区卫星精确指向要求,提出通过在白天对卫星过境天区内观测恒星方式,建立白天望远镜局部指向模型,实现对望远镜指向误差快速修正。基本思想是利用恒星与背景辐照的光谱差异,采用光谱滤波方法实现白天恒星观测;然后选取沿卫星轨道附近的恒星来建立局部指向模型,实现望远镜白天指向偏差的实时修正。这种方法实现起来相对简单,实时性较好。本文基于上海天文台 60 cm 口径激光测距系统,开展白天激光测距中望远镜快速指向修正方法试验研究。

2 白天恒星监视技术分析

对于白天恒星监视,其难点在于白天恒星淹没在强烈背景噪声中,目标不可见,需要采取滤波措施,提高恒星与背景噪声的信噪比。本文通过对大

气背景与恒星光谱进行分析,对测量系统所采取的两种截止波段滤波方式的恒星观测能力进行了计算分析。

2.1 恒星与大气光谱对比

白天天空背景光主要来源于太阳,但受瑞利散射影响,主要位于短波波段,峰值在 $0.45 \sim 0.55 \mu\text{m}$ 之间;同时,从峰值到长波段光谱曲线迅速下降。对于恒星来说,以 M、K、G 这三种恒星为例,其光谱曲线的共同特点是峰值在 $0.8 \mu\text{m}$ 左右,基本呈对称分布,且很多恒星具有与 M、K、G 恒星相类似的光谱特性。图 1 是白天天空背景光与恒星光谱曲线对比图^[3]。因此,实现白天恒星观测需尽可能的滤除波长较短的天空背景光,保留恒星长波部分。根据图 1 所示,可选择 $600 \sim 700 \text{ nm}$ 的截止滤光片进行白天恒星监视。

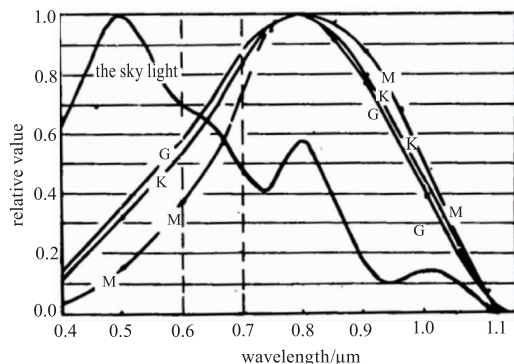


图1 恒星与大气背景光谱对比

Fig. 1 Comparison of spectral curve for stars and atmosphere light

2.2 白天恒星观测能力分析

恒星光源经过大气和接收光学系统后,在望远镜焦面上扩散成一个面,并在 CCD 上占据一定像素数($n \times n$)。假设 CCD 一次曝光时间为 t ,单位时间内每个像素从星象收集到的光子数为 S ,天光背景在每个像素上积累的光子数为 B ,目标信号光子通量和背景信号辐射光子通量分别为 ϕ_s 和 ϕ_b ,接收系统通光口径面积为 a , τ_s 和 τ_b 分别为滤光片对目标光谱和背景光谱的透过率, q 为 CCD 量子效率, τ 为光学系统的透过率, t 为探测器积分时间,则 CCD 每个像素接收到的目标信号光电子数为^[4-5]:

$$S = \phi_s \cdot q \cdot \tau_s \cdot a \cdot \tau \cdot t / n^2 \quad (1)$$

则每个像素接收到的背景信号光电子数为:

$$B = \phi_b \cdot q \cdot \tau_b \cdot a \cdot \tau \cdot \alpha^2 \cdot t \quad (2)$$

式中, α 为 CCD 一个像元对天空的张角;为 $h/f \times 206265''$, h 为 CCD 像元尺寸; f 为 CCD 位置的望远

镜焦距。

背景信号产生的噪声为:

$$B_N = \sqrt{B} = \sqrt{\phi_b \cdot q \cdot \tau_b \cdot a \cdot \tau \cdot \alpha^2 \cdot t} \quad (3)$$

系统的信噪比可以表示为:

$$\text{SNR} = S/B_N \quad (4)$$

即:

$$\text{SNR} = \phi_s \cdot \tau_s \cdot \sqrt{q \cdot a \cdot \tau \cdot t} / (\alpha \cdot n^2 \cdot \sqrt{\phi_b \cdot \tau_b}) \quad (5)$$

满足一定信噪比的最小目标辐射光通量 ϕ_s , 则反映测量系统的极限探测能力。其表达式为:

$$\phi_s = \text{SNR} \cdot \alpha \cdot n^2 \cdot \sqrt{\phi_b \cdot \tau_b} / (\tau_s \cdot \sqrt{q \cdot a \cdot \tau \cdot t}) \quad (6)$$

可以通过以上公式计算在满足信噪比要求下的最小目标辐射光通量。实际探测中,一般认为只有信噪比大于等于6时,才能保证图像处理系统的可靠提取。因此 SNR 取 6。

本次实验选用了 Andor 公司研制的 LucaS 型 EMCCD,其主要性能参数如表 1 所示。

表 1 LucaS 型 EMCCD 主要参数

Tab. 1 Main parameters of LucaS EMCCD

Active Pixels (VGA)	658 × 496
Pixel Size (W × H; μm)	10 × 10
Image Area (mm)	6.58 × 4.96
Active Area pixel well depth (e ⁻ , typical)	26000
Gain Register pixel well depth (e ⁻ , typical)	100000
Quantum Efficiency	20% @ 800 nm
Max Readout Rate (MHz)	13.5
Frame Rate (f/s)	37.2
Read noise (e ⁻)	<1 to 15 @ 13.5 MHz

以 M 星为例,表 2 给出了不同滤波片对背景光、M 星的透过率^[3]。

表 2 不同滤波片对背景光、M 星的透过率

Tab. 2 Transmittance of different filters for atmosphere light and M stars

项目	透过率 0.6 μm	截止波长 0.7 μm
背景光	0.51	0.33
M 星	0.9	0.76

利用公式(6)计算系统的极限探测星等,公式中各个参数取值见表 3,取自上海天文台 60 cm 口径激光测距系统和文献[4]。

表 3 公式(6)中各个参数取值

Tab. 3 The value of each parameter in formula(6)

SNR	6
a	0.251 m ² (望远镜主镜口径 60 cm,副镜口径 20 cm)
q	0.2
τ	0.6
t	0.002 s
α	0.6"
n	15
τ _s , τ _b	见表 2
φ _b	与太阳角距离 45°的天空,每平方角秒的亮度为 4.3 等,对应 φ _b 为 1.26 × 10 ⁹ photons/(m ² · s · (") ²)

由上述可得到目标的最小辐射光通量,对应的星等可以表示为 $M = 2.512 \log(\phi_0/\phi_s)$ 。其中 ϕ_0 为大气层外零等星对应的目标辐射光子通量,取 5.0×10^{10} photons/(m² · s),根据上述公式和参数,分别计算使用 600 nm,700 nm 波长截止滤光片时在与太阳角距离 45°位置时测量系统的极限探测星等。

计算结果表明,距太阳 45°角距离位置,上海天文台 60 cm 口径 SLR 望远镜系统的极限探测能力分别为 3.09 等,3.14 等。因此,采用 700 nm 波长截止滤光片对观测恒星效果略好。

2.3 白天恒星观测试验

基于上述对白天恒星监视技术的分析,在上海天文台激光测距望远镜系统开展了白天恒星监视试验。图 2 给出了望远镜系统和激光接收终端光学组成结构,其中望远镜机架为地平式。激光接收终端将入射光经过两块 45°光学镜入射到 CCD1,即本次实验中的 EMCCD,用于目标星象采集。根据前节计算结果,选择波长为 700 nm 的短波截止滤光片放在 CCD1 前,滤除小于 700 nm 波长的背景光信号。滤波片的光谱图如图 3 所示。

白天恒星观测实验流程如下:①根据星表进行恒星位置预报,望远镜跟踪恒星;②设置 CCD 曝光时间,EMCCD 采集恒星图像;③记录恒星星象对应的方位、高度值,以用于后续的指向偏差修正。

图 4 给出了从 -1 星等到 3 星等的恒星分布及白天情况下所拍摄到的恒星图像,图中恒星亮度为 3.03 等,观测时间为下午四点,与太阳角距离 50°。与计算值相比,实际测得的星等稍有偏差,这是由于天空背景亮度计算值与实际值差异、未考虑大气消光等因素造成的。

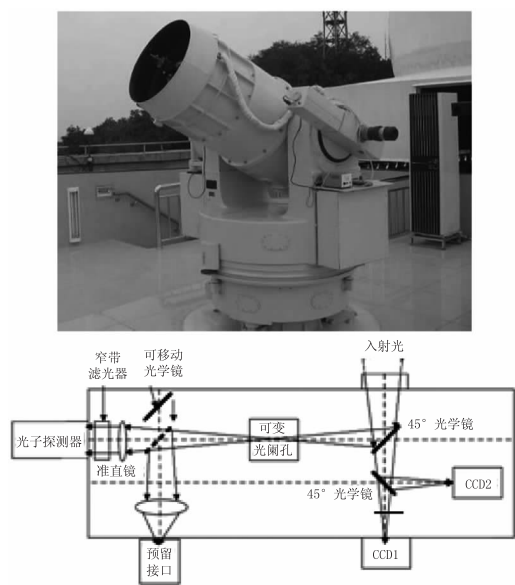


图2 60 cm 激光测距望远镜系统和接收终端光学结构

Fig. 2 60 cm SLR telescope system and the optical structure of receiving terminal

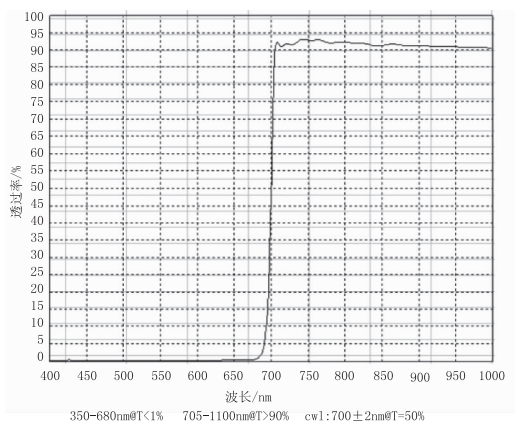


图3 700nm 短波截止滤光片光谱图

Fig. 3 Spectrum chart of 700nm short-wave cut-off filter

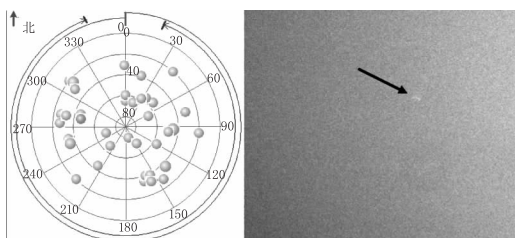


图4 -1 等到3 等恒星分布及 CCD 白天观测恒星结果

Fig. 4 distribution of -1 to 3 rd magnitude star and the image taken by CCD in the daytime

3 望远镜局部指向误差修正

对于望远镜指向误差修正,通常采用跟踪全天数十颗恒星方式,获取不同天区位置恒星的指向偏差量,建立全天区望远镜指向误差模型实现对望远镜在不同位置的指向偏差修正^[1,6]。在白天可监视

恒星情况下,亦可采用相同的方法,建立适合于白天情况下的望远镜指向偏差模型。根据前节分析与试验,基于上海天文台 60 cm 口径跟踪望远镜,在白天情况下仅可对亮于 3 等的恒星进行监视,这直接导致可跟踪的恒星数较少,难以采用夜间全天区望远镜指向修正模型方法,且全天区观测过程时间较长,不便于在温度变化较大的白天测距中应用。

为此,本文提出了基于卫星过境区域的望远镜局部指向误差快速修正方法,即仅对所观测的卫星过境区域范围内进行望远镜指向修正。由于观测区域的范围缩小,望远镜指向误差模型所需要的恒星数也相应减少,提高了指向模型计算效率,实现对特定目标白天激光观测的快速指向修正。图 5 给出了某颗卫星过境情况,基于上述思想,在卫星过境区域范围内选取 6 至 7 颗恒星,作为望远镜局部指向误差模型计算的观测量。

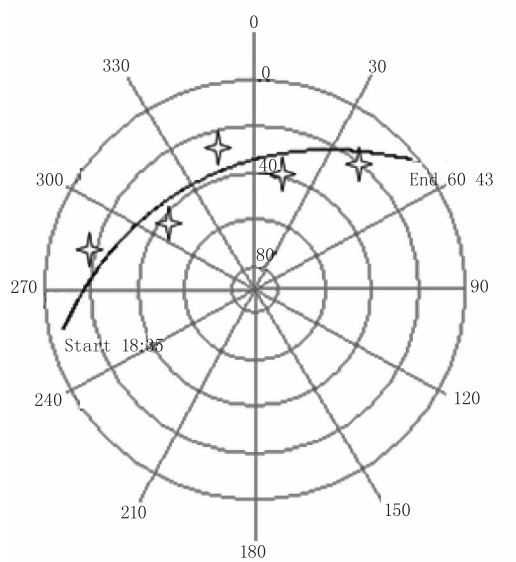


图5 基于卫星过境区域的望远镜指向误差修正

Fig. 5 telescope pointing error correction based on satellite passing region

采用经典的具有物理含义的七参数指向模型作为白天望远镜局部指向误差模型,如下式所示:

$$\Delta A = C_0 + C_3 \tan E + C_4 \sec E + C_5 \cos A \tan E + C_6 \tan E \sin A$$

$$\Delta E = C_1 + C_2 \cos E + C_5 \sin A + C_6 \cos A \quad (7)$$

式中, ΔA 、 ΔE 为恒星方位和高度指向偏差值; A 、 E 为恒星方位和高度值。通过跟踪所选择的恒星获取指向偏差和位置量,利用最小二乘法计算得到上述七参数指向模型系数。

为验证上述望远镜局部指向误差模型的外符合情况,将望远镜指向误差模型应用于所跟踪区域的

其他恒星,获取恒星的位置偏差量,以评估局部指向模型外符精度。图6给出了在应用望远镜局部指向模型后,对其他恒星所测量的方位和高度偏差量分布情况,方位和高度偏差量的均方差分别为 $6''$ 和 $8''$ 。即通过采用7颗恒星所建立的望远镜局部指向模型的指向误差为 10 arcsec 以内,可满足白天激光测距中对望远镜指向偏差修正的要求。

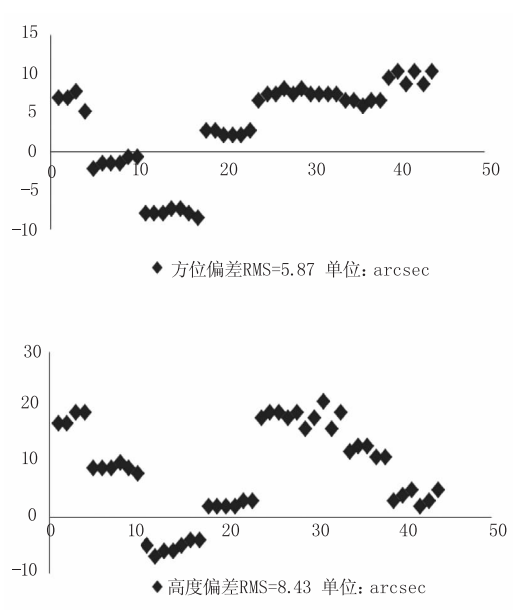


图6 基于7颗恒星的望远镜局部指向模型误差分布(外符)

Fig.6 Error distribution of telescope regional pointing model based on 7 stars(external evaluation)

4 结束语

本文针对白天激光测距中卫星不可见,望远镜需精确指向的问题,研究了白天望远镜指向修正技术。以上海台60 cm卫星激光测距系统为平台,应用短波截止滤光技术,实现了白天亮于3等的恒星监视;通过在卫星运行轨道附近选取少数恒星,建立了望远镜局部指向模型,使望远镜指向误差由模型修正前的数十角秒降低到 $10''$ 以内。该方法对白天卫星测距特别是高轨卫星、特定过境目标等观测具有重要意义,也可推广到其他需白天目标观测的望远镜系统。由于背景噪声受CCD接收视场的影响,

可以通过在CCD前加视场光阑等方式进一步降低噪声,提高望远镜系统对恒星的观测能力,从而可选取更多的恒星,进一步提高白天局部指向模型的精度,用于白天卫星跟踪和测量。

参考文献:

- [1] 杨福民,肖焱坤,张忠萍,等. 白天卫星激光测距系统的设计和实测结果[J]. 中国科学,1998,28(11): 1048-1056.
- [2] WANG Bin. Research on the pointing error of telescope mount in SLR system[D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
王斌. 卫星激光测距系统的机架指向误差的研究[D]. 上海:中国科学院上海天文台,2004.
- [3] XU Weian. Application of spectral filter device in measuring stellar in daytime[J]. Optics and Precision Engineering, 1996, 4(4): 84-88. (in Chinese)
徐维安. 光谱滤波装置在白天测星中的应用[J]. 光学精密工程, 1996, 4(4): 84-88.
- [4] WANG Weiguo. Research of space object detecting under bright background [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
王伟国. 空间目标白天光电探测技术研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- [5] WEI Heli, CHEN Xiuhong, YU Kai, et al. Analysis of the detectable stellar magnitude limit using CCD camera in daytime sky background[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(2): 187-192. (in Chinese)
魏合理, 陈秀红, 余凯, 等. 白天CCD观星可探测极限星等值分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(2): 187-192.
- [6] ZHANG Xiaoxiang, WU Lianda. The basic parameters of telescope static point model[J]. Acta Astronomical Sinica, 2001, 42(2): 198-205. (in Chinese)
张晓祥, 吴连大. 望远镜静态指向模型的基本参数[J]. 天文学报, 2001, 42(2): 198-205.