

卫星激光测距中光束亮度的偏振影响及应用

吴志波^{1,2}, 邓华荣¹, 张海峰^{1,2}, 汤凯¹, 张忠萍^{1,2}

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

2. 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: 卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)常利用激光大气后向散射所形成的图像来引导光束指向,而光束图像亮度随天区变化的现象在 SLR 站普遍存在,影响了激光对卫星的瞄准。以中国科学院上海天文台现有 SLR 系统为研究平台,阐明了该现象的成因,即光束图像成像光路中分光镜的效率会随偏振方向改变而变化。据此提出偏振方法,通过建立出射激光偏振方向随望远镜位置变化模型,改变发射光路中新引入半波片的角度,实现了光束图像于不同亮度的实时控制。相比使用消偏振分光镜的方案,该方法具有应用灵活、系统简单且成本低的优势,研究成果在提高激光对卫星的瞄准精度及星象图像信噪比等方面具有重要意义。

关键词: 卫星激光测距; 偏振方向; 光束指向; 光束图像; 半波片

中图分类号: P228.5 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0306005

Polarization effects of laser beam brightness and its application in Satellite Laser Ranging

Wu Zhibo^{1,2}, Deng Huarong¹, Zhang Haifeng^{1,2}, Tang Kai¹, Zhang Zhongping^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Laser beam image generated by atmosphere backscattering has been widely used to monitor the laser pointing in Satellite Laser Ranging (SLR). The phenomenon that the brightness of beam image differs from sky sections influences the satellite aiming. Based on the SLR system of Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, the mechanism of this phenomenon was figured out that the efficiency of splitter mirror was generally related to the polarization state of incident light. Accordingly, a new method was proposed that a half-wave plate was deployed in transmitting path, and rotating it realized the real-time control of different brightness for beam imaging. The model of outgoing laser polarization direction with the pointing of telescope was established. Compared with the use of splitter mirror whose efficiency is independent of polarization direction, the method is more flexible, simpler and less cost. The method can be applied in improving laser beam pointing accuracy in SLR and Signal-to-Noise Ratio(SNR) of star image etc.

Key words: satellite laser ranging; polarization; laser beam pointing; laser beam image; half wave plate

收稿日期: 2015-07-14; 修订日期: 2015-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(11303074, u1231107); 上海市空间导航与定位技术重点实验室基金(06D22101); 测绘地理信息公益性行业科研专项经费(201412001)

作者简介: 吴志波(1981-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事卫星激光测距及应用方面的研究。Email: wzb@shao.ac.cn

0 引言

激光自诞生以来一直以波长短、方向性好、能量集中、抗干扰性强及在大气中传播测量误差小等优点而为世人所关注,非常适合远距离空间目标的高精度测量。卫星激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR)是激光测距的典型应用。SLR 通过测量激光脉冲往返于地面站与空间目标的飞行时间,进而获取目标高精度距离信息。SLR 单次测量精度已达毫米级,被公认为空间目标测量手段中精度最高的技术,在卫星精密定轨、确定地球自转参数、全球范围高精度时间传递以及建立和维护全球地球参考框架等方面具有重要现实意义^[1-3]。

由于 SLR 技术测量精度高,其应用领域得到快速扩展,测量范围从数百至数万公里的卫星延伸到月球甚至行星际,测量目标类型也从合作目标卫星发展到表面漫反射的非合作目标(主要是空间碎片)。对于远距离激光测距或非合作目标激光测距,回波非常微弱,除使用大口径望远镜和大功率激光器等主要手段外,往往需要压缩发散角来进一步提高回波强度,这要求光束瞄准误差必须足够小。目前 SLR 技术普遍采用激光后向散射所形成的光束图像来引导光束瞄准目标^[4],该方法误差大小与光束图像的亮暗有关,光束图像越亮误差越小。而光束图像亮度随望远镜的指向变化而变化是当前多数 SLR 站普遍存在的现象,这便造成某些天区的光束瞄准误差较大,特别是白天测距时,背景噪声大、光束图像信噪比和接收视场均十分有限,光束图像亮度的变弱影响了光束瞄准方向的准确判断,如果光束瞄准误差超出视场范围,则会造成测距失败。

针对白天测距部分天区光束图像看不到的现象,英国 Hertmonceux 激光测距站通过测量不同地靶目标率先开展了此现象的实验研究。研究发现接收光路中第一块分光镜的透射效率随望远镜的转动而大幅变化,随后对相应的光学镜片进行优选和替换^[5],使透射效率稳定,没有对其进行更深入研究。为彻底解决光束图像亮度变化引起光束瞄准误差变大的问题,中国科学院上海天文台开展了此项工作。不仅深入调研上述现象的产生机理,还成功应用偏振方法实现了光束图像亮暗的实时控制,该成果具有广泛

的应用前景。如:在高轨卫星白天激光测距和空间碎片激光测距中,由于发散角小,对激光束的瞄准精度要求较高,应用偏振方法可在所有天区获得较亮的光束图像,以准确判断激光束的瞄准方向;与此同时,在某些应用场合,如星象闭环,光束图像太亮会引起星象图像的信噪比下降甚至完全淹没星象,应用此偏振方法可以使光束图像始终保持在较暗的水平,进而利于星象目标的提取。

文中基于中国科学院上海天文台现有 SLR 系统,给出了常规激光器光束图像亮度的变化情况,并利用不同偏振方向的激光器进行对比检测,验证光束图像强弱变化与激光偏振方向有关。首先实验并分析了分光镜效率随入射偏振方向的变化规律,给出 SLR 中光束图像亮度变化的产生机理;其次,推导和验证了出射激光偏振方向随望远镜转动的变化模型,应用此模型,旋转半波片来改变后向散射光的偏振方向以获得分光镜的特定效率,实现了光束图像亮度的实时控制。

1 中国科学院上海天文台激光测距系统

图 1 为中国科学院上海天文台卫星激光测距系统的光路图。激光自激光器出射后,经折轴光路多块反光镜反射,最终从发射望远镜出射。在接收光路

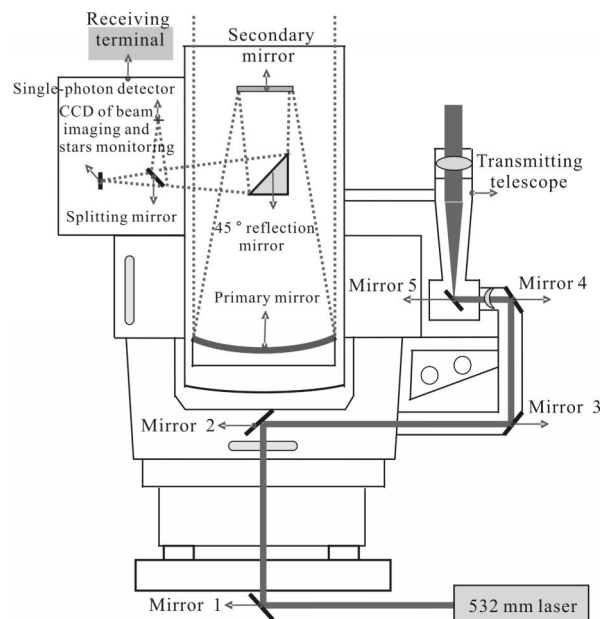


图 1 卫星激光测距系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of satellite laser ranging system

中,大部分 532 nm 激光通过分光镜反射进入探测器以探测来自卫星的回波信号,只有很少一部分透过分光镜进入光束成像 CCD 以实现光束指向监测。分光镜对 532 nm 的反射率为 95%,透过率为 5%;激光器波长为 532 nm,功率为 1 W,重复频率为 1 kHz,偏振方向为 s 方向。

2 光束图像亮度变化现象及分析

在晴好天气下,利用 CCD 记录 s 偏振方向激光器在不同天区的后向散射光束图像,方位每隔 30° 记录一次,正上方为方位零点,如图 2 所示。可以看出,对于一定仰角,光束图像亮度变化呈现方位对称。例如:当望远镜仰角为 60° 时,方位为 330° 和 150° 时光束图像最模糊。为了比较上述现象,文中引入同样功率的激光器(偏振方向为 p 方向)重复上述实验。结果,同样的仰角,光束图像最模糊的方位变为 60° 和 240° ,如图 3 所示, p 、 s 偏振方向激光器的光束图像亮度变化规律刚好差 90° 。两次实验条件唯一不同的是激光偏振方向,证明光束图像亮度与出射激光的偏振方向有关。

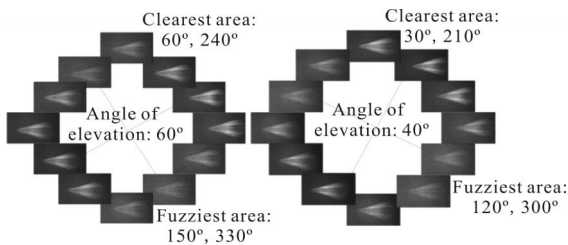


图 2 s 偏振方向激光器不同天区光束亮度分布

Fig.2 Beam brightness of laser with s -polarization in different positions

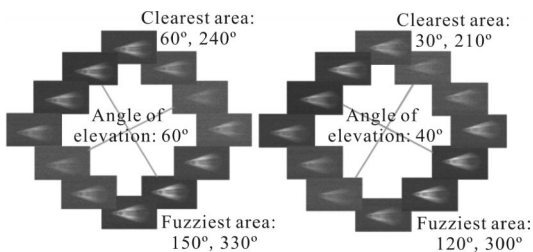


图 3 p 偏振方向激光器不同天区光束亮度分布

Fig.2 Beam brightness of laser with p -polarization in different positions

与此同时,对望远镜的发射效率以及主副镜接收效率进行测量,发现偏振方向并不影响它们的效

率。但经过光束成像 CCD 前面的分光镜后,接收效率会随着偏振方向的改变而变化,发现分光镜是引起光束图像亮度变化的原因。

为明确分光镜效率与偏振方向的关系,利用已知偏振方向的激光器,通过旋转半波片实现不同偏振方向入射,对上述分光镜的透射率进行测量,实验示意图如图 4 所示。待测激光器的功率为 0.765 W,表 1 列出半波片旋转角度不同时分光镜的透射功率变化情况。

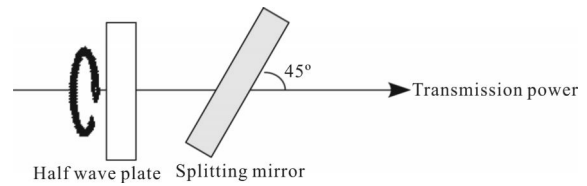


图 4 分光镜透射率测量示意图

Fig.4 Schematic diagram for measuring transmission efficiency of splitter mirror

表 1 分光镜效率测试结果

Tab.1 Test results of transmission efficiency of splitter mirror

Angle of half wave plate/(°)	Transmission power/mW	Angle of half wave plate/(°)	Transmission power/mW
243	8.5	64	9.25
203	58.3	25	68
158	9.12	332	8.41
118	67.1	286	74.8

由表 1 可知:随着激光偏振方向的改变,单块分光镜透射率变化范围为 0.9%~9.34%。因此,对于光束成像 CCD,其光束图像亮度的变化范围为 10 倍,与实际观测情况基本一致。

根据参考文献[6],分光镜对于不同偏振方向的透射率公式为: $T=1-R_p\cos^2x-R_s\sin^2x$,其中 x 为偏振方位角,即偏振方向与 p 分量的夹角, R_p 、 R_s 分别为分光镜对 p 方向、 s 方向的反射率。由公式可知,随着偏振方位角 x 改变,分光镜的透射率随之变化;如果 R_p 、 R_s 相差较大,则分光镜的透射率随偏振方向变化而大幅波动。结合表 1 数据可知,SLR 系统中分光镜在 p 、 s 方向的透射率分别为 9.34% 和 0.9%,此分光镜对自然光的透过率为上述平均值 95.12%,与分光镜标称的 95%@532nm 透过率相符。

由此可见,返回激光偏振方向保持在 p 方向则分光镜对其透射率最大,对应光束图像最亮;相反,偏振方向保持在 s 方向则光束图像最暗。 p 方向光束最清晰的情形可用于卫星常规测距中,以此来提高光束瞄准精度; s 方向光束最模糊的情形可用于碎片测距中,以此来提高碎片目标提取能力。为实现上述应用,必须建立出射激光偏振方向随望远镜位置变化的模型,进而根据模型通过旋转半波片来改变出射激光的偏振方向。

3 出射激光偏振方向模型及验证

在 SLR 系统中,从折轴光路镜片 1 出射光的偏振方向为南北方向,在不同方位 φ 的情况下,入射折轴光路镜片 2 的 p 分量、 s 分量大小分别为:

$$P_{\varphi 0} = -\sin \varphi, S_{\varphi 0} = \cos \varphi \quad (1)$$

考虑到半波损失,出射折轴光路镜片 2 的 p 分量、 s 分量大小分别为:

$$P_{\varphi 1} = -\sin \varphi, S_{\varphi 1} = -\cos \varphi \quad (2)$$

入射到折轴光路镜片 5 前,当仰角 θ 为零时, p 分量、 s 分量大小分别为:

$$P_{\varphi 2} = -\cos \varphi, S_{\varphi 2} = \sin \varphi \quad (3)$$

入射到折轴光路镜片 5 前,当仰角 θ 不为零时, p 分量、 s 分量大小分别为:

$$P_{\varphi 0} = P_{\varphi 2} \cos \theta - S_{\varphi 2} \sin \theta, S_{\varphi 0} = P_{\varphi 2} \sin \theta + S_{\varphi 2} \cos \theta \quad (4)$$

考虑到半波损失,最终出射光束的 p 分量、 s 分量大小分别为:

$$E_p = P_{\varphi 2} \cos \theta - S_{\varphi 2} \sin \theta, E_s = -(P_{\varphi 2} \sin \theta + S_{\varphi 2} \cos \theta) \quad (5)$$

由此可以得到出射激光的偏振方向为:

$$\tan \alpha = E_s / E_p \quad (6)$$

根据上述分析,图 5 给出上海台目前不同天区

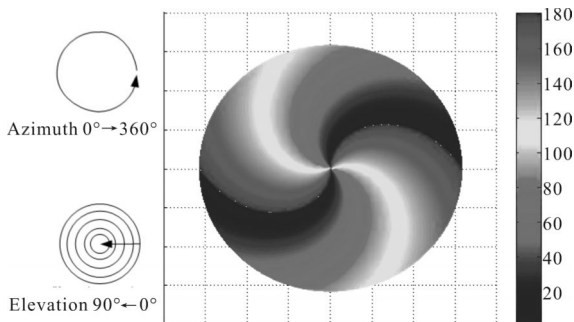


图 5 不同天区出射激光的偏振方向

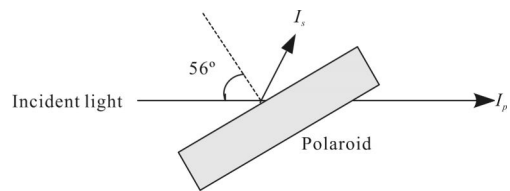
Fig.5 Polarization direction of emitting laser in different sky areas

对应的出射激光偏振方向,其中坐标系中极径从小到大分别表示仰角从高到低,幅角代表方位,不同颜色代表不同的偏振方向。

为了验证上述模型,并考虑望远镜仰角过高光路搭建不方便,开展了四个天区(300°,1°)、(200°,1°)、(122°,1°)、(70°,1°)的偏振方向检验,方法分为两步。

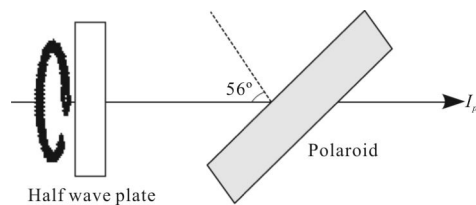
(1) 对上述各个天区光的 p 、 s 方向的功率分别进行测量,如图 6(a)所示。由公式 $\tan \alpha = E_s / E_p = \pm \sqrt{I_s / I_p}$ 可知,偏振方向为 $\alpha = \arctan \sqrt{I_s / I_p}$ 或 $\alpha = \pi - \arctan \sqrt{I_s / I_p}$ 。

(2) 将半波片的光轴与第一步得出的两个方向分别平行放置,检测经过偏振片后的输出功率,如果与未加半波片的一致或者相差很小,则该方向即为偏振方向;若不一致或者相差很大,则非该偏振方向。示意图如图 6(b)所示,表 2 为实验结果。



(a) p 、 s 方向的功率测量

(a) Power measurement of emitting laser in p or s polarization direction



(b) 出射光束偏振方向测量

(b) Verification of the polarization direction of emitting laser

图 6 不同天区出射激光的偏振方向验证

Fig.6 Validating the polarization direction of emitting laser in different sky areas

表 2 发射望远镜输出口偏振方向结果

Tab.2 Test results of polarization direction in transmitting telescope outlet

Telescope region	I_s	I_p	$I_p(\alpha)$	$I_p(180^\circ - \alpha)$	Experimental value	Theoretical value
(300°,1°)	112	25	130(65°)	20(115°)	115°	119°
(200°,1°)	20	120	118(22°)	16(158°)	22°	19°
(122°,1°)	120	26	120(65°)	30(115°)	115°	121°
(70°,1°)	126	19	12(69°)	117(111°)	69°	69°

表 2 中还列出根据图 5 得到的理论值,对比实

验值与理论值可以看出,不同天区出射光束的偏振方向与模型基本一致。在晴好天气下,主要来自于球形分子(如水蒸气)的后向散射基本不会影响激光偏振态^[7-8],即入射到分光镜的偏振方向模型与上述出射激光偏振方向模型基本相同。另外,根据图 5 计算模型并结合图 1 可知,当在(60°,60°)时,偏振方向为 p 方向,光束图像最亮;当在(150°,60°)时,偏振方向为 s 方向,光束图像最暗,理论和实际完全符合,进一步说明了模型的正确性。

4 光束图像亮度的控制

根据上述建立的模型,采用旋转半波片的方法可使出射光的偏振方向为 p 方向、 s 方向或任意方向,实现对光束图像亮度的最佳化控制。

若考虑到入射偏振方向的变化(旋转半波片),则用 $\varphi-\xi$ 代替 φ ,其中 ξ 表示偏振方向与 s 偏振方向的夹角。则最终出射光束的 p 、 s 分量大小分别为:

$$E_p = -\cos(\varphi-\xi)\cos\theta - \sin(\varphi-\xi)\sin\theta \quad (7)$$

$$E_s = \cos(\varphi-\xi)\sin\theta - \sin(\varphi-\xi)\cos\theta \quad (8)$$

对指定天区(φ, θ),若要使得出射偏振方向为 p 方向,即

$$\tan(E_s/E_p)=0 \quad (9)$$

便可得出入射需要的偏振方向 ξ 。

根据前述理论,望远镜在(150°,60°)天区白天时光束图像亮度最暗,如图 7(a)所示,光束信号基本淹没白天背景噪声当中,很难识别出光束指向位置。根据公式(7)、(8)计算,旋转半波片 45°可使光束图像亮度最佳,如图 7(b)所示,光束图像中的光尖非常清晰,很大程度上提高了光束指向的准确度。同理,当光束图像亮而星象微弱难于识别时,可以旋转半波片 45°使光束图像亮度下降,进而提高星象图像的信噪比。

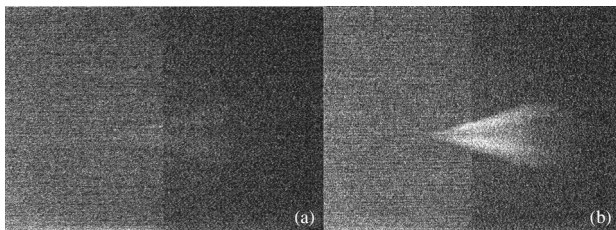


图 7 光束图像亮度变化效果图

Fig. 7 Laser beam brightness changed by applying polarization method

5 结论

基于中国科学院上海天文台 SLR 系统,针对不同天区光束图像亮度存在明显差异的现象进行机理研究,其原因是大气后向散射光的偏振方向随望远镜转动而不同,进而造成光束图像成像光路上分光镜的效率发生改变,引起光束图像亮度的变化。随后,建立并验证了出射光的偏振方向随望远镜位置的变化模型,据此通过旋转半波片 45°使光束图像亮度由最暗变成最亮。该研究成果可用于提高光束瞄准精度以及星象信噪比等,并为利用偏振特性提高卫星激光测距性能提供了一种全新思路。后续将利用人造目标(卫星)与自然目标(大气)偏振度的区别展开相关成像信噪比提高的研究。

参考文献:

- [1] Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Wu Zhibo, et al. Experiment of laser ranging to space debris based on high power solid-state laser system at 200 Hz repetition rate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41 (s1): s108005. (in Chinese)
- [2] Zhang Haifeng, Zhang Zhongping, Qin Si, et al. Experimental study on laser active illumination to space targets within the shadow of earth[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(s1): s108003. (in Chinese)
- [3] Arnold D A. Cross section of ILRS satellites [C]//ILRS Technical Workshop, 2003: 1-7.
- [4] Bai Yudong. Target detection technology based on infrared polarization imaging[J]. *Infrared*, 2013, 34(3). (in Chinese)
- [5] Matthew Wilkinson. Polarization at the SGF Herstmonceux [C]//17th International Workshop on Laser Ranging, 2011: 1-5.
- [6] Cao Hong, Song Lianke, Peng Handong, et al. The study of the relationship between polarized light's incident azimuth and intermediary reflectance [J]. *Laser Technology*, 2005, 25 (1): 104-105. (in Chinese)
- [7] Sassen K. Advanced in polarization diversity lidar for cloud remote sensing[J]. *IEEE*, 1994, 82: 1907-1914.
- [8] Wang Xia, Zhang Mingyang, Chen Zhenyue, et al. Overview on system structure of active polarization imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2244-2251. (in Chinese)