

1064 nm 波段白天背景噪声分析及应用研究

王楠^{1,2}, 邓华荣¹, 张海峰^{1,3}, 吴志波^{1,3}, 张忠萍^{1,3}

(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: 卫星激光测距(SLR)是目前卫星单点距离测量精度最高的技术,已成为高精度测量领域不可或缺的手段。国际上大多数SLR台站采用532 nm的工作波长,在白天测距中存在天空背景噪声大、有效回波识别困难等问题,影响了台站的白天测距数据产出。鉴于白天1064 nm波段天空背景亮度低,理论上对比分析计算了1064 nm波段与532 nm波段的系统噪声强度。并在晴好白天开展了1064 nm波段的噪声测量,并与532 nm波段的测距系统噪声进行了比较,数据结果与理论分析基本一致。在此基础上,开展了晨昏时段的1064 nm卫星激光测距实验,并获得了多圈次卫星的有效回波数据,为1064 nm的白天卫星激光测距打下了技术基础。

关键词: 卫星激光测距; 噪声; 白天背景亮度; 1064 nm; 红外探测器

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2019.10.007

Daytime background noise analysis and application research in 1064 nm band

WANG Nan^{1,2}, DENG Hua-rong¹, ZHANG Hai-feng^{1,3}, WU Zhi-bo^{1,3}, ZHANG Zhong-ping^{1,3}

(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: Satellite laser ranging (SLR) is the most accurate technique for single-point distance measurement of satellites, and has become an indispensable means in the field of high-precision measurement. Most SLR stations in the world use the working wavelength of 532 nm. In the daytime ranging, there are problems such as large background noise and difficult echo recognition, which affects the daytime ranging data output of the station. Considering the low background brightness of the 1064 nm band during the day, the paper theoretically calculated the background noise intensity of the 1064 nm band and the 532 nm band respectively. The actual measurement of the background noise of the two bands was performed during the sunny day, which is basically consistent with the theoretical analysis. On this basis, the 1064 nm satellite laser ranging experiment in the morning faint period was carried out, and the effective echo data of multi-passes satellites were obtained, which laid a good technical foundation for daytime satellite laser ranging based on 1064 nm in the future.

Keywords: satellite laser ranging; 1064 nm; daytime background brightness; noise; infrared detector

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 11503068, No. U1631240); 博士后创新人才计划项目(No. BX201700270); 博士后第62批面上基金项目(No. 2017M621562)资助。

作者简介: 王楠(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为卫星激光测距应用研究。E-mail: nanwang@shao.ac.cn
收稿日期: 2019-02-18

1 引言

卫星激光测距(SLR)是目前卫星单点距离测量精度最高的技术^[1],其原理是通过精确测定激光脉冲从地面观测点到装有反射器卫星的往返时间间隔,从而算出地面观测点至卫星的距离。1964年10月,美国NASA发射了第一颗带有激光反射器的卫星“Beacon-B”,并很快实现了激光测距。经过几代的发展,目前卫星激光测距技术已经达到了亚厘米级甚至是毫米级,以及高自动化程度。但目前国际上的卫星激光测距站大多采用的是532 nm的激光波长,因为532 nm的波长为可见光,在光路校准,光束监视以及相应的器件如CCD和探测器等发展较为成熟,目前只有部分台站实现了1064 nm的激光测距实验。

1064 nm激光测距相比较于532 nm的激光测距具有较多优势,主要表现在以下几个方面。在光子数方面,单脉冲能量相同的1064 nm激光是532 nm激光光子数的两倍,能够提高回波光子数,从而提高测距成功率;在大气透过率方面,根据大气散射和吸收理论,短红外处的大气透过率比可见光的大气透过率高,特别是在低仰角的情况下,1064 nm激光测距的优势更为明显;在激光功率方面,目前多数台站采用的532 nm波长激光是经Nd:YAG固体激光器倍频获得,由于存在倍频效率,1064 nm激光的功率会比532 nm高近一倍;在白天测距方面,1064 nm波段比532 nm波段的天空背景噪声强度要低一个数量级以上,会更有利于回波信号的识别。

目前国际上部分卫星激光测距站已实现了1064 nm的激光测距。例如,德国的WETZELL站在1991年进行了1064 nm和532 nm的双波长测距实验,并成功实现对Lageos卫星的测距^[1];澳大利亚的Mt Stromlo激光测距站利用1.8 m口径的望远镜和1064 nm激光成功对空间碎片进行了测距实验,取得了较好的实验数据^[2];云南天文台利用超导纳米线单光子探测器和1064 nm激光成功测到了合作目标,包括1600 km的近地卫星和19500 km的远地卫星^[3];法国Grasse天文台于2016年成功对激光器进行改造升级,利用1064 nm激光成功实现了激光测月,结果发现1064 nm激光能够实现完整的一个周期的测距,解决了常规532 nm测距不能在新月和满月时测距的缺陷,证明了1064 nm具有背景噪

声小的优势^[4]。但是在白天测距中,关于1064 nm波段与532 nm波段的天空背景噪声大小方面的对比情况在国内外还未见相关报道。

本文根据目前532 nm波段激光测距系统白天天空背景噪声较大的具体情况,分析了白天天空背景亮度更小的1064 nm波段激光测距的理论优势,并结合白天天空光谱相对亮度曲线理论分析了532 nm波段和1064 nm波段的系统噪声大小。通过上海天文台现有的卫星激光测距(SLR)平台于某个晴朗的白天测试了各自条件下532 nm波段和1064 nm波段的系统噪声,噪声相对大小与理论计算基本符合。基于理论分析和实验测量的一致性,开展了晨昏时段的1064 nm卫星激光测距实验,并成功测到多圈卫星数据,这为后续白天1064 nm波段卫星激光测距提供了较好的技术基础。

2 白天噪声的理论计算和实测分析

对于白天卫星激光测距,天空背景噪声是影响测距成功率的关键因素。白天天空背景噪声比夜晚要大 10^6 倍^[5],对于常规532 nm波段白天卫星激光测距来说,即使采用一定的降噪措施,如常用的时间滤波、空间滤波和光谱滤波方法,要在大量的白天背景噪声中提取有效信号也是较为困难的。鉴于1064 nm波段白天背景噪声相对于532 nm波段来说则要小很多,如图1所示,太阳角距为 58.46° 的白天天空光谱相对亮度曲线图,采用1064 nm波段进行白天卫星激光测距有望进一步降低系统噪声,更容易提取有效回波信号。为此,有必要开展1064 nm白天卫星激光测距系统噪声研究,并与532 nm波段系统噪声进行比较以便为后续基于1064 nm波段的白天卫星激光测距提供技术基础。

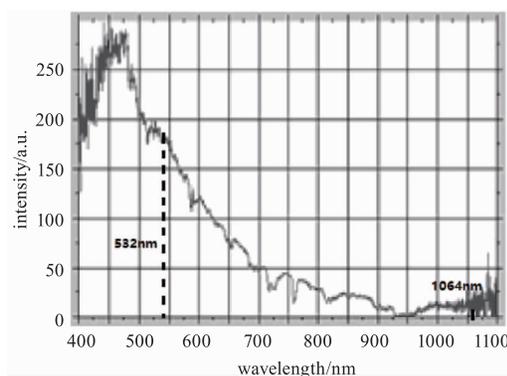


图1 白天天空光谱相对亮度曲线图

Fig. 1 Daytime sky spectrum relative brightness curve

2.1 1064 nm 波段与 532 nm 波段的白天系统噪声对比分析

白天系统噪声由天空背景噪声及探测器本身的暗噪声所组成,相对于白天天空背景噪声,探测器本身的暗噪声比前者低两个数量级,可忽略不计。图 1 的白天天空光谱相对亮度曲线图为白天天空背景噪声分析的理论依据,从图 1 中可以看出 532 nm 波段处的天空背景亮度为 1064 nm 波段处的 15 倍左右。

根据白天卫星测距时的系统噪声计算公式^[6]:

$$A = \frac{\eta_q P_B}{h\nu} = \frac{\eta_q}{h\nu} N_\lambda(\delta\lambda) \Omega_r A_r \eta_r$$

为避免白天强天空背景噪声下对探测器造成损坏,需在各探测器前加装窄带滤光片,式中 $\delta\lambda$ 即为窄带滤光片的半高带宽。目前,在 532 nm 常规系统中, $\delta\lambda$ 为 0.19 nm,而 1064 nm 实验系统仅具备 $\delta\lambda$ 为 2.2 nm 的条件。针对目前上海天文台卫星激光测距系统,公式中的其他参数说明如下:

A 为卫星激光测距(SLR)系统上产生的光电子速率; P_B 为系统噪声功率; h 为普朗克常数; ν 为光学频率; Ω_r 为接收视场角,球面度; A_r 为望远镜接收面积; η_r 为望远镜光学系统的接收效率; η_q 为探测器的量子效率; N_λ 为白天天空光谱亮度。

基于上海天文台卫星激光测距系统,系统接收视场角、望远镜接收面积、探测器的在各自波段量子效率、望远镜光学系统的接收效率、窄带滤光片半高带宽、光学频率、白天天空光谱亮度这七个参数如表 1 所示。

表 1 上海天文台卫星激光测距系统
532 nm & 1064 nm 参数

Tab. 1 532 nm & 1064 nm parameters Shanghai
Observatory satellite laser ranging system

	532 nm	1064 nm	比值
Ω_r/Sr	7.85×10^{-9}	7.85×10^{-9}	1.00
A_r/m^2	0.25	0.25	1.00
η_q	0.20	0.20	1.00
η_r	0.26	0.37	1.42
$\delta\lambda/\text{nm}$	0.19	2.20	11.58
ν/Hz	5.6×10^{14}	2.8×10^{14}	2
N_λ	-	-	1/15

注:比值是指在该参数对 1064 nm 波段与 532 nm 波段系统噪声的贡献倍数。

由表 1 各项参数的比值关系可以得到白天测距时,1064 nm 波段测距时的系统噪声为 532 nm 波段的 2.2 倍左右。若 1064 nm 波段测距时采用和 532 nm 波段半高带宽一致的窄带滤光片,则其噪声将降低为 532 nm 波段的 1/5 左右。

2.2 1064 nm 波段与 532 nm 波段的白天系统噪声测量

在上述白天系统噪声的对比分析论证的基础上,在某个晴好白天,基于上海天文台卫星激光测距系统^[7]开展了噪声对比测试实验。激光接收终端光路如图 2 所示,其由以下光学元件组成:A 为 45° 反射镜(532 nm & 1064 nm 高反),B 为 45° 电动平移反射镜(532 nm & 1064 nm 高反),C、E 为正透镜(准直作用),F 为正透镜(会聚作用),G 为 1064 nm 波段半高带宽为 2.2 nm 的红外窄带滤光片,H 为 532 nm 波段半高带宽为 0.19 nm 的窄带滤光片,SPAD 为 532 nm 波段探测器,1064 nm 波段探测器为 InGaAs 探测器。

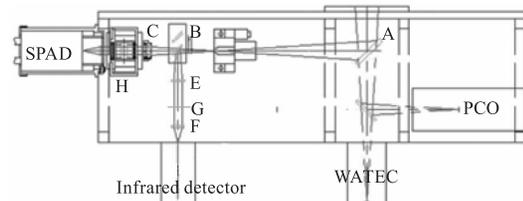


图 2 接收光路图

Fig. 2 Receiving light path diagram

532 nm 波段的系统噪声测量过程如下:将望远镜指向某个天区,保证此时接收终端内状态与表 1 相同;将反射镜 B 移出光路中,通过信号延时产生器输出一个 gate 信号于 SPAD,此时 SPAD 开始工作;采用卫星激光测距软件对 SPAD 回波信号进行采集;对采集到的数据进行分析处理获得此状态下 532 nm 波段的系统噪声。1064 nm 波段的系统噪声测量过程与上述过程相似,不再重复表述。

不失一般性,实验挑选了与太阳夹角为 40°, 60°, 80° 左右的天区进行了 532 nm 波段和 1064 nm 波段处的系统噪声大小测量,实验数据如表 2 所示。从表 2 可以看出,太阳夹角为 40°, 60°, 80° 左右的天区,1064 nm 波段系统噪声分别是 532 nm 波段系统噪声的 2.31 倍、2.05 倍和 2.19 倍,与 2.1 节所述的 2.20 倍基本吻合。

表2 白天背景噪声实测结果

Tab. 2 Daytime background noise test results

太阳夹角 / (°)	532 nm 噪声 / MHz	太阳夹角 / (°)	1064 nm 噪声 / MHz
39.4	8.63	39.4	22.66
43	8.38	42.1	17.83
40.5	9.5	38.5	20.38
均值	8.84	均值	20.44
59.7	5.8	59	10.7
58.5	5.19	62.5	11.8
59.2	5.48	58.8	11.2
均值	5.49	均值	11.23
80.9	4.03	79	8.06
78.7	4	78.9	9.11
81.3	3.64	81.4	7.97
均值	3.89	均值	8.38

3 1064 nm 晨昏时段卫星激光测距试验

为开展基于 1064 nm 的白天卫星激光测距提供技术基础,也考虑到目前半高带宽为 2.2 nm 窄带滤光片噪声较大的具体问题,且晨昏时刻 1064 nm 波段的系统背景噪声和白天 532 nm 波段的系统背景噪声值相当,因此开展了 1064 nm 晨昏时段的卫星激光测距试验系统。

3.1 试验系统

基于以上两个波段的噪声理论分析比较及实验测试验证,在目前上海天文台卫星激光测距系统开展了晨昏时段 1064 nm 波段卫星激光测距工作,测距系统框图如图 3 所示^[8]。与常规测距系统不同的三个部分图 3 中虚线框内所示,其中,发射系统中的激光扩束发射镜调整为 1064 nm 波段准直状态,光子探测器为近红外波段常用的铟镓砷材料的探测器。因目前已有相机无法在晨昏完成对 1064 nm 激光指向进行监视,激光指向依靠前一天晚上基于红外相机的调节保证,即夜间调节完成后激光指向随不同天区变化小于 10"。

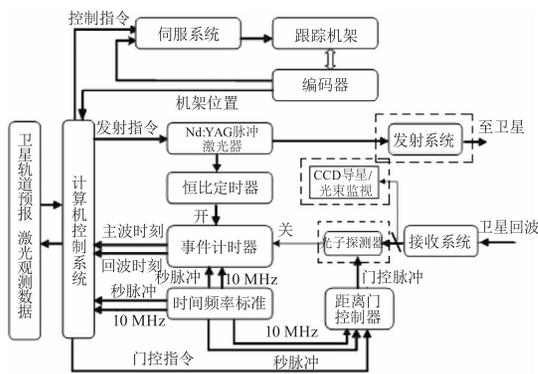


图3 上海天文台卫星激光测距系统框图

Fig. 3 Shanghai Observatory SLR system block diagram

3.2 1064 nm 晨昏时段卫星激光测距结果

试验主要针对红外探测器探测视场小、晨昏激光指向无法监视的两个问题采取相应的措施以便能在晨昏时段实现有效回波探测。在晨昏时段观测的前一天晚上完成望远镜指向模型的修正、激光指向的精细调节,望远镜指向模型精度优于 5",激光指向不同天区变化小于 10",有效保证了晨昏时段基于 1064 nm 卫星激光测距的顺利进行。表 3 列出了基于 1064 nm 波段的晨昏卫星激光测距结果,验证了望远镜指向模型修正及激光指向调节精度,为后续白天卫星激光测距打下了技术基础。

表3 1064 nm 波段晨昏卫星激光测距结果

Tab. 3 Satellite laser ranging result in 1064 nm band

日期	时间/UTC	卫星	点数	精度
2018. 11. 23	21: 34: 18	geok2	11185	1. 57
2018. 11. 23	21: 38: 9	TRX	13600	1. 69
2018. 11. 23	21: 46: 53	swarna	23043	1. 93
2018. 11. 23	21: 40: 45	galileo202	280	1. 27
2018. 11. 23	22: 4: 50	lares	23928	1. 64
2018. 11. 23	22: 22: 6	hy2a	28556	1. 87
2018. 12. 18	10: 1: 12	geok2	55031	2. 61
2018. 12. 18	10: 3: 51	glonass116	1878	2. 34
2018. 12. 18	10: 10: 26	galileo217	2320	1. 53
2018. 12. 18	10: 29: 9	ajisai	13201	2. 80
2018. 12. 18	10: 31: 30	hy2a	29658	2. 10
2018. 12. 18	10: 33: 42	beaconc	24255	2. 60
2018. 12. 18	10: 35: 57	glonass131	4920	1. 87

4 结论

本文针对常规 532 nm 波段白天卫星激光测距背景噪声大,有效回波信号识别困难的问题,引出了白天天空背景亮度更小的 1064 nm 波段卫星测距。从理论分析与实验测量可知,虽然 1064 nm 波段探测器使用窄带滤光片半高带宽为常规 532 nm 波段的 11.58 倍,但系统噪声仅仅增加了 2.20 倍,从侧面反映了 1064 nm 波段的白天天空背景亮度低的优势。基于理论对比分析研究和实验测试验证开展了卫星激光测距实验,成功在晨昏时段利用 1064 nm 波段获得多圈次卫星数据。后续将调研半高带宽更窄的红外窄带滤光片开展白天 1064 nm 波段卫星激光测距。

参考文献:

- [1] Veillet C, Schreiber U, Degnan J. Proceedings of the 8th international workshop on laser ranging instrumentation[M]. Maryland: NASA Conference Publication, 1992: 261.
- [2] Smith C. H. The EOS space debris tracking system[C]// Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2006, Maui, Hawaii.
- [3] Li Xue, Li Zhulian, Zhang Labao, et al. Satellite laser ranging using superconducting nanowire single-photon detectors at 1064 nm wavelength[J]. Optics Letters, 2016, 41(16): 3848 - 3851.
- [4] C. Courde1, J. M. Torre1, E. Samain1, et al. Lunar laser ranging in infrared at the Grasse laser station[J]. Astronomy & Astrophysics, 2016, 602(90): 1 - 12.
- [5] Yang Fumin, Xiao Chikun, Zhang Zhongping, et al. Design and measurement results of satellite laser ranging system in the daytime[J]. Science China, 1998, 28(11): 1048 - 1056. (in Chinese)
- [6] Zhang Ziang, Research on kHz satellite laser ranging echo detection system in the daytime[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- 张子昂. 白天 kHz 卫星激光测距回波探测系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [7] Lu Daju, Yang Rui, Zhang Bo, et al. Sky background optical radiation characteristics measurement[J]. High Power Laser and Partical Beams, 2013, 25(S0): 51 - 54. (in Chinese)
- 路大举, 杨锐, 张波, 等. 天空背景光学辐射特性测量[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(S0): 51 - 54.
- [8] Zhang Zhongping, Yang Fumin, Zhang Haifeng, et al. The use of laser ranging to measure space debris[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2012, 12(2): 212 - 218.