

高重复率卫星激光测距中后向散射干扰及规避

吴志波^{1,2}, 邓华荣¹, 张海峰¹, 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: 大气后向散射对高重复率卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)的回波接收产生干扰且随测量频率增加愈发严重,已成为制约 SLR 工作频率提升的关键因素之一。根据大气散射雷达探测方程,分析了探测系统接收到的大气后向散射光功率及对回波接收的影响,以上海天文台现有收发分离的 SLR 系统为平台,通过试验验证了分析的合理性;据此厘清后向散射干扰产生时序,给出基于激光发射时序控制的后向散射规避方法。通过在高重复率距离门控电路中添加激光点火信号产生模块,并实时判断后向散射干扰情况以控制点火信号是否延迟输出,基于 FPGA (Field Programmable Gate Array)完成了后向散射自动规避电路,成功应用在上海天文台高重复率 SLR 的常规观测中,实现了对散射的完全规避,且对 Lageos 等重点激光卫星的平均点火频率下降率低于 2%,具有很好的推广应用价值。

关键词: 大气后向散射; 卫星激光测距; 高重复率; 后向散射规避

中图分类号: P228.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0206002

Interference and avoidance of atmospheric backscattering on satellite laser ranging with high repetition rate

Wu Zhibo^{1,2}, Deng Huarong¹, Zhang Haifeng¹, 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: For satellite laser ranging (SLR) with high repetition rate, the interference of atmospheric backscattering on the echo receiving has been more serious by the increase of measuring rate, and has become one of the key factors which restrict the maximal working frequency of SLR technology. According to the atmospheric scattering radar detection equation, the received optical power of atmospheric backscattering from a certain distance was analyzed. Based on the platform of bi-static SLR system in SHAO, the rationality of theory was verified by interference experiment of atmospheric backscattering. According to the theory, making clear production mechanism of backscattering interference, backscattering avoiding methods on the basis of controlling laser emitting epoch were presented. With a module for outputting laser fire signal integrated into range-gate generating circuit with high repetition rate, and the control of the laser firing delayed by judging the existence of backscattering

收稿日期: 2016-06-20; 修订日期: 2016-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(11303074, 11503068); 上海市空间导航与定位技术重点实验室(06D22101)

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技术及应用方面的研究。Email: wzb@shao.ac.cn

in real time, the backscatter auto avoiding circuit was finally completed based on FPGA. Now it has been successfully applied in the routine SLR measurement of SHAO, the average fire frequency reduction rate has been lower than 2% for most important satellites such as Lageos, and will has a very good propagation and application value.

Key words: atmospheric backscattering; satellite laser ranging; high repetition rate; backscattering avoidance

0 引言

大气散射是大气光学和大气辐射学中的重要内容,是微波雷达、激光雷达等遥感探测手段的重要理论基础。现有的研究成果表明,光散射主要分为瑞利散射和米氏散射。瑞利散射在紫外光谱和高空中起主要作用;而米氏散射则在较低的高度上起主要作用,散射强度较大,在 SLR、激光雷达等技术中具有重要的应用^[1]。在 SLR 系统中,发射出去的激光经大气后向散射后进入导星望远镜,应用成像监视设备可获得代表光束指向的光尖图像信息,进而可调整光束指向与卫星星象重合使发射轴和接收轴近似平行,帮助快速捕获卫星回波信号,有效地提高测距成功率^[2]。

但另一方面,大气后向散射对回波接收是不利的。在收发相交的空间区域,由于激光后向散射产生的脉冲和探测目标回波信号脉冲都将被信号接收系统捕获而造成干扰,考虑到低空大气后向散射的激光能量较强,而 SLR 中卫星回波信号又往往较弱(单光子甚至亚光子),导致了激光发射之后的一段时间内返回的卫星回波信号难于探测,成为测距盲区,即后向散射影响期^[3-4]。卫星距离从几百公里到几万公里不等,卫星回波在激光发射后的几毫秒至数百毫秒内返回,而后向散射影响期一般为百微秒量级,因此低重复率 SLR 中的回波一般不会在后向散射影响期间返回,后向散射不影响测距。但在高重复率 SLR 中,激光发射与其返回信号不再是相邻事件,随着卫星距离的变化,回波可能在激光发射(非对应)之后的其他时刻返回,容易发生后向散射对回波接收的干扰。可以预计,随着测距频率的增加,激光回波处于大气散射影响期间返回的概率将越大,回波丢失的比例越高。SLR 高重复率化是未来的发展趋势,大气散射干扰是制约其频率提升的重要因素之

一,因此有必要深入研究大气散射对高重复率 SLR 的影响并进行规避。

后向散射影响期从激光发射时刻算起,因此通过控制激光的发射时刻可避开后向散射对回波接收的影响。激光点火信号驱动着激光器的激光发射,因此,只要改变激光点火时刻,即可完成后向散射规避,目前有两种控制方法:多组激光点火间隔切换法和激光点火信号延迟法。第一种方法使用多组激光点火间隔,每组点火间隔下的后向散射影响区域互不完全重叠,每次选择一组点火间隔确保回波处于后向散射影响期外。此方法的算法较为复杂,具有平均点火频率保持稳定的优点,实现难度较大,目前仅美国的 SLR2000 系统使用此方法。方法二就是一旦判断到回波将在大气散射影响期间返回,则推迟此次及之后的点火信号,使得回波被探测器接收后再发射激光。该方法会小幅降低平均点火频率,但算法简单、控制较为方便,在高重复率 SLR 中使用普遍。国际上最早实现 2 kHz 卫星激光测距的奥地利 Graz 站就是采用此方法来规避大气散射干扰。

文中首先对大气散射雷达探测方程进行理论探讨,据此分析了后向散射对上海台高重复率 SLR 的影响,并进行实验验证。论述不同后向散射规避方法以及各自的特点,以上海天文台高重复率距离门控电路为基础,基于激光点火信号延迟法,实现了后向散射自动规避电路,已在上海台高重复率 SLR 的常规观测中得到很好应用,文中展示了测量效果。

1 大气后向散射及影响分析

1.1 大气后向散射雷达方程

激光光束在传输过程中被大气散射和衰减,造成了能量随传播距离的增加而不断减小。在 SLR 中,激光发射系统及接收系统处于同一平台的相同方向,因此在收发相交的空间区域大气后向散射会

对回波接收造成影响。典型的后向散射光功率公式^[5]如下:

$$p(\lambda, r) = p_0 \frac{c \Delta t A}{2r^2} \beta(\lambda, 180^\circ) \exp[-2 \int_0^R \delta(\lambda, r) dr] \quad (1)$$

式中: λ 为激光波长; p_0 为激光器的发射功率; Δt 为激光脉宽; A 为接收系统接收面积; c 为光速; $\beta(\lambda, \phi)$ 为体积散射系数 ($\phi=180^\circ$ 表示后向散射); $\delta(\lambda, r)$ 为大气消光系数; r 为激光的传播距离。

对于既定的 SLR 系统, 激光器参数与接收系统参数已知, 散射系数和消光系数其实就是距离函数, 而后向散射的光功率取决于消光系数和散射系数两个参数的组合, 因此是一个随传播距离 r^2 迅速衰减的函数^[6]。为了更直观地描述大气固有特性对后向散射光功率的影响, 令: $S(r) = 2r^2 p(r) / p_0 c \Delta t A$, $\beta(r) = \beta(\lambda, 180^\circ)$, $\tau(r) = \exp[-\int_0^R \delta(\lambda, r) dr]$

公式(1)则演变为:

$$S(r) = \beta(r) \tau^2(r) \quad (2)$$

图 1 为各种能见度下 $S(r)$ 随传播距离变化的曲线图, 曲线 1~6 对应的能见度分别为 100、50、10、5、2、1 km。可以看出, 大气能见度差的时候, 接收系统接收到的后向散射初始光功率高, 但衰减速度快; 而能见度好时后向散射初始光功率较低, 衰减地也慢。

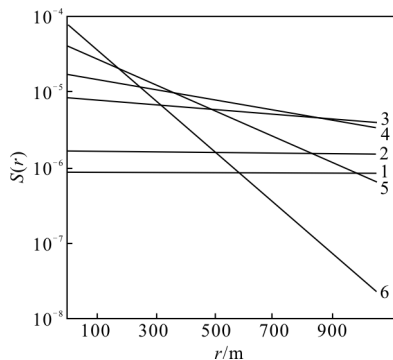


图 1 不同能见度下 $S(r)$ 随距离的变化

Fig.1 Variation of $S(r)$ with distance under different visibility

1.2 后向散射影响分析

卫星激光测距的探测成功概率^[7]可以表达为:

$$P = (1 - P_{FA}) P_D \quad (3)$$

式中: P_{FA} 为虚警概率; P_D 为信号探测概率。SLR 普遍采用的 C-SPAD 作为光电探测器, 其探测阈值为

单光子, 而光电转换中光电子数服从泊松分布, 因此, 虚警概率即为噪声达到一个光子以上的概率, 信号探测概率为回波强度达到一个光子以上的概率。由此可知, 当大气后向散射强度达到 1 个光子以上, 虚警概率 P_{FA} 几乎为 1, 探测成功概率为 0; 当后向散射的光子数与回波光光子数可比拟时, 则会显著降低测距成功率。

2 后向散射对高重复率 SLR 的影响及试验验证

在高重复率 SLR 中, 激光发射和对应的回波并不是相邻事件, 这样, 随着测距过程中卫星距离的不断变化, 回波可能出现在激光发射之后的其它时刻, 即有可能与大气散射影响时刻相交叉, 造成此次回波信号的探测失败。可以预计, 随着测距频率的提高, 回波信号进入后向散射影响期间的概率越大, 损失比例也相应增大。假定大气散射影响时间为 200 μs , 对于 1 kHz 重复频率 SLR, 回波损失比例可达 20%, 对于 2 kHz 激光测距, 损失比例为 40%^[8]。

上海天文台目前已经实现了常规化的重复频率为 1 kHz 的卫星激光测距, 所使用的激光器及接收系统相关参数为: $P_0=1$ mJ, $\Delta t=50$ ps, $A=0.251$ m², 每焦耳能量的光子数取 2.67×10^{18} (532 nm), 结合图 1 和公式(1)可以获得各种能见度下不同距离处的后向散射强度(光子数), 如图 2 所示。可以看出, 后向散射强度达 1 个光子时距离最远的为大气能见度 10 km 情况下, 距离范围可达 3.0 km; 大气能见度为 50 km 情况下次之, 距离范围大约为 2.6 km。

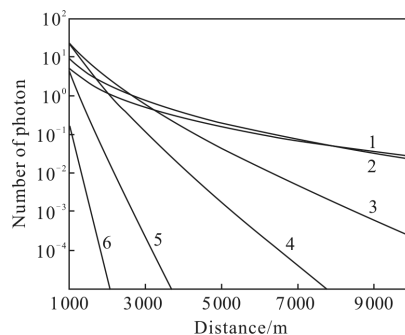


图 2 上海台 SLR 系统不同能见度下后向散射强度

Fig.2 Backscattering intensity of different visibility on SHAO SLR system

图 3 为在晴好的夜晚利用大视场对 Ajisai 卫星的测量结果图,左图为单次后向散射的距离残差(距离的观测值 O 和预报值 C 之差, $O-C$)点图,图中既有卫星回波信号,也有噪声及后向散射干扰信号。根据气象记录,当时大气能见度为 15 km,则由图 2 可估算,在激光发射后的一小段时间(18~20 μs ,后向散射距离范围为 2.7~3.0 km)散射强度将超过一个光子水平,回波信号全部淹没;而后,随着散射强度的下降,回波又逐渐被接收,但回波探测成功概率因受到后向散射干扰而显著降低。图 3 的右图为左图的距离点图,距离的单位为 μs ,可以看出,大气后向散射干扰发生在目标距离 12 000~12 015 μs 之间,即后向散射影响期为 15 μs ,与理论分析相符。

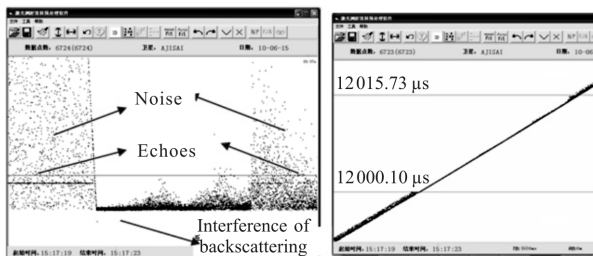


图 3 上海台高重复率 SLR 大气后向散射实验验证
Fig.3 Experimental verification of atmospheric backscattering in SHAO SLR with high repetition rate

高重复率 SLR 具有测距精度高、测距数量多、捕获卫星快的优势,目前已成为 SLR 的发展趋势,多国正在大力发展该项技术。而大气后向散射干扰是制约 SLR 高重复率化发展的重要因素之一,因此有必要深入研究大气散射对高重复率 SLR 的影响并进行规避。

3 后向散射规避方法

后向散射影响期为激光发射之后的一段时间,通过改变激光的发射时刻可以规避大气散射对高重复率 SLR 的影响,目前主要有两种方法:多组激光点火间隔切换法和激光点火信号延迟法。

(1) 多激光点火间隔切换法:该方法使用多组激光点火间隔,每组点火间隔下的后向散射影响区域互不完全重叠,确保了任何时刻总有一组点火间隔能够使回波处于后向散射期外。图 4 为采用两组点火间隔实现后向散射规避的示意图^[7]。

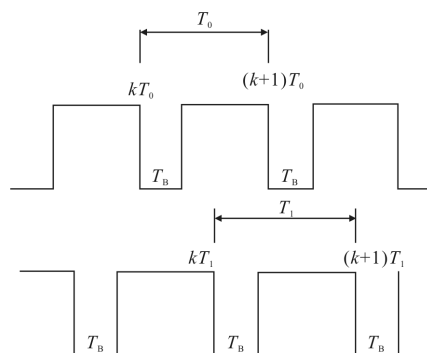


图 4 两组点火间隔实现后向散射规避示意图
Fig.4 Schematic diagram of backscattering avoidance by using two groups of firing interval

图中 T_B 表示后向散射影响时间,也即此期间回波探测失效,难于接收卫星回波信号。 T_0 和 $T_1(T_0 + \delta T)$ 为两组激光点火间隔。为了能够使探测器有效时间实现全覆盖进而避免后向散射影响,必须满足下列方程: $(kT_0 + T_B) \leq kT_1$ 且 $(kT_1 + T_B) \leq (k+1)T_0$ 。需要使用的点火间隔组数 n 、偏移量 δT 与所跟踪的卫星及测距频率有关,如果采用更多组点火间隔,一般可以通过如下公式进行选择^[9]。

$$n \geq \left(\frac{T_B}{T_0 - T_B} \right) \frac{k_{\max}}{k_{\min}} + 1 \quad (4)$$

$$\frac{T_B}{(n-1)k_{\min}} \leq \delta T \leq \frac{T_0 - T_B}{k_{\max}} \quad (5)$$

式中: k_{\min} 和 k_{\max} 分别为空中最少、最多的飞行激光脉冲数,与测距频率和卫星距离有关。首先根据卫星的距离和测距频率计算出 k 值,然后利用公式(4)选择合适的 n 值,之后利用公式(4)计算 δT 。该方法具有平均点火频率稳定的优点,但由于算法及控制较为复杂,目前只有美国的新一代无人值守 SLR2000 采用该方法来避免后向散射干扰。

(2) 激光点火信号延迟法:即通过移动激光点火推迟激光发射来避免回波处于后向散射影响期间出现。如图 5 所示,一旦回波进入后向散射影响区间

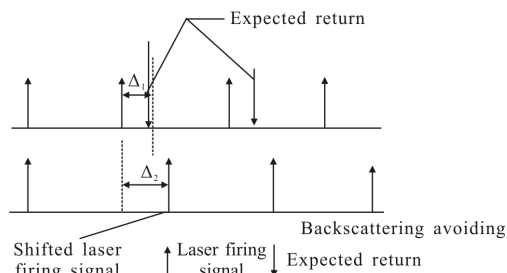


图 5 激光点火信号延迟法的示意图
Fig.5 Schematic diagram of laser firing delay method

Δ_1 , 则将此次及以后所有的点火信号推迟 Δ_2 , 即在回波达到探测器之后再发射激光, 这就避免了后向散射光对回波信号的影响^[10]。

此方法算法较为简单, 控制起来也相对方便。然而由于点火信号的推迟, 造成了平均点火频率的小幅下降, 对于距离变化较慢的高轨卫星, 该方法引起点火频率的下降并不明显, 而对于低轨卫星, 由于距离变化很快, 推迟点火操作较为频繁, 因此平均点火频率下降比高轨卫星要明显^[9], 图 6 为各种卫星不同高度下的平均点火频率图。此方法在高重复率 SLR 中还是使用最为广泛, 最早在奥地利 Graz 站的 2 kHz 卫星激光测距获得使用, 也是文中后向散射规避电路所采用方法。

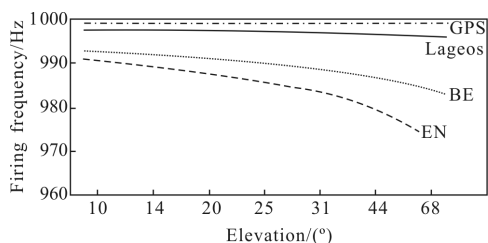


图 6 不同卫星各种高度下的平均点火频率下降图

Fig.6 Average firing frequency decrease of different satellites with various elevation

4 后向散射自动规避电路实现

根据 2、3 节的分析, 后向散射影响的规避策略主要在于控制激光发射时刻与回波返回时间的时序关系。在 SLR 中, 为有效捕获卫星的回波信号, 常使用距离门控技术来降低噪声干扰, 即根据卫星距离预报, 精确控制光电接收器的开启, 且开启时刻先于预期回波时刻一个微小提前量^[9]。门控输出时刻与回波返回时间一致, 因此, 通过控制点火信号和门控信号的输出时刻即可规避后向散射, 将后向散射规避模块与距离门控模块实现在同一电路上是一种很好的选择。

上海台已基于单片 FPGA (XC3S200) 实现了具有 ~kHz 重复频率的距离门控电路, 其资源使用率仅 30% 左右, 因此激光点火功能也可集成在此 FPGA 中, 并采用激光点火信号延迟法, 可实现后向散射自动规避。图 7 为该电路的框图^[11]。

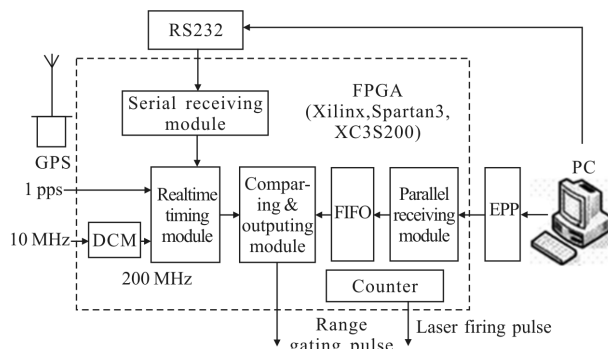


图 7 集成后向散射规避功能的距离门控产生器框图

Fig.7 Block diagram of range gate generator with backscattering avoiding function

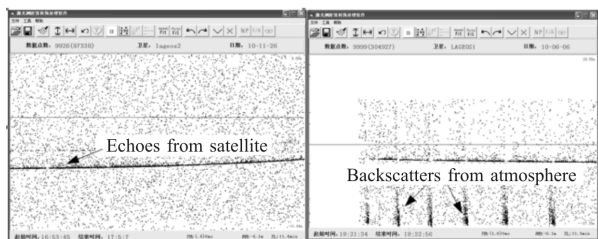
SLR 系统采用 GPS 时间频率接收机提供秒信号和 10 MHz 时钟, 其中, 秒信号用于实时时钟同步 UTC, 利用 10 MHz 和数字时钟管理单元倍频到 200 MHz 作为整个电路的时钟基准, 因此实时时钟、点火信号和门控信号的分辨率为 5 ns。

电路旨在获得高重复率 (~kHz) 的门控信号及点火信号输出, 门控 (门控信号输出时刻及后向散射 (后向散射发生时刻) 数据通过 PC 机以 ~kHz 的速度传输给距离门控电路。串口和并口都是 PC 机的基本配置, 串口逻辑简单但速度有限, 所以该设计使用串口初始化该电路; 并口速度较快, 其中 EPP 模式速率可达 500 k-2 Mb/s, 传输一个门控数据/后向散射数据 (48 位, 足够代表一天的时间) 仅需几十微秒, 满足 ~kHz 的设计要求。为了区分门控数据与后向散射数据, 在数据的最高位做了标记。比较器负责比较实时时钟和门控数据/后向散射数据, 门控数据与实时时钟匹配则输出门控信号, 后向散射数据与实时时钟匹配则延时重新启动点火计数器输出点火信号。

5 实验结果

将完成的后向散射自动规避电路应用在上海台的高重复率 SLR 系统中, 以检验规避效果。图 8 为 Lageos 卫星测量结果处理界面, 中间密集的一条线为有效测距结果 (卫星回波), 上下稀疏分布的为噪声点, 左右图分别为使用和未使用散射规避电路的测量结果。可以看到, 右图下面周期性出现噪声干扰, 这是后向散射造成的, 当回波在后向散射影响期间返回, 回波信号部分损失; 应用后向散射自动避免电路后, 整个测距过程都没有测距盲区, 观测效率和

观测数据量获得了较大提高。



(a) 具有后向散射规避功能 (b) 没有后向散射规避功能

(a) With backscattering avoiding (b) Without backscattering avoiding

图 8 上海天文台 kHz 重复率卫星激光测距实验图

Fig.8 Experimental results of SLR with kHz repetition rate in SHAO

6 结 论

大气后向散射已成为制约重复率 SLR 技术发展的主要因素之一。文中从大气散射雷达探测方程出发,分析并验证了大气后向散射强度以及对高重复率 SLR 回波接收的影响。以上海天文台高重复率测距门控电路为基础,通过实时判断后向散射时刻并推迟点火输出时刻,完成了后向散射干扰规避电路,在上海天文台高重复率 SLR 常规测量中得到应用,取得良好效果。目前,该技术也已应用在超高重复频率(10 kHz)激光测距以及信噪比极低的空间碎片激光测距中^[12-13],发挥了较为重要作用。

参考文献:

[1] Shi Zhiyong, Pan Xiaosheng, Zhang Qian. High-precision pulsed laser measuring distance by time delay method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 252-258 (in Chinese)

[2] Xue Xiangyao, Gao Yunguo. Improvement method of laser pointing accuracy for the tracking and lasing system by backward scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2003-2007. (in Chinese)

[3] Yang Yuchuan, Long Chao, Tan Bitao, et al. Study on the influence of atmosphere back-scattering on laser pulse [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(5):482-485. (in Chinese)

[4] Meng Qingji, Zhang Xuyan, Zhou Ling, et al. Key technologies of airborne laser 3D detection imaging system [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(4): 213-232. (in Chinese)

[5] Werner C. Slant range visibility determination from lidar signatures by the two-point method [J]. *Optics & Laser Technology*, 1981, 13 (1): 27-36.

[6] Feng Longling. Effects of atmospheric scatter on laser weapons system and countermeasures [J]. *Acta Armamentarii*, 2003, 24 (4): 520-524.(in Chinese)

[7] Ye Shuhua, Huang Chen. Astrodynamics [M]. Yantai: Shandong Science and Technology Press, 2000: 91-121. (in Chinese)

[8] Georg Kirchner, Franz Koidl. Kilohertz laser ranging at graz: our plans [C]//Proc of 13th International Laser Ranging Workshop Instrumentation, 2007: 13301.

[9] Paul Titterton, Harold Sweeney, Donald Leonard. System/usage impact of operating the SLR2000 at 2 kHz [C]//Proc of 11th International Workshop on Laser Ranging, 1998, 21-25: 426-437.

[10] Zhang Zhongping, Wu Zhibo, Zhang Haifeng, et al. Experiment of high-repetition-rate SLR [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39 (12):1267-1270. (in Chinese)

[11] Wu Zhibo, Zhang Zhongping, Chen Juping. The implementation of rang-gate control circuit with high-repetition-rate based on FPGA [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(4): 919-922. (in Chinese)

[12] Li Yuqiang, Li Rongwang, Li Zhulian, et al. Application research on space debris laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3324-3329. (in Chinese)

[13] Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Deng Huarong, et al. Experiment of laser ranging to space debris by using two receiving telescopes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 102002. (in Chinese)