

白天激光测距空间滤波的实施和结果分析<sup>\* 1</sup>王培源<sup>1,2)</sup> 朱 威<sup>1,2)</sup>(1) 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室), 武汉 430071)  
(2) 中国地震局地壳应力研究所武汉科技创新基地, 武汉 430071

**摘 要** 介绍了空间滤波、频域滤波和时域滤波等方法对白天测距成功率的影响,阐述了空间滤波技术的设计方案及在卫星激光测距系统中的实施过程。实验结果表明,空间滤波技术能够有效地抑制白天天光背景噪声,使白天激光测距成为可能。

**关键词** 白天观测;卫星激光测距;空间滤波;频域滤波;时域滤波

**中图分类号**:P228.5

**文献标识码**:A

IMPLEMENTATION AND EXPERIMENTAL RESULTS OF DAYTIME  
LASER RANGING SPATIAL FILTERWang Peiyuan<sup>1,2)</sup> and Zhu Wei<sup>1,2)</sup>(1) Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071)  
(2) Wuhan Base of Institute of Crustal Dynamics, CEA, Wuhan 430071

**Abstract** The effects of different filtering techniques on the daytime observations were presented, including the spatial filtering, the frequency-domain filtering and the time-domain filtering techniques. The design scheme of spatial filtering and its implementation in the SLR system were described in great details. The experimental results indicate that this spatial filtering technique can suppress the daytime background noise effectively and enable the daytime observation of satellite laser ranging.

**Key words**: daytime observation; satellite laser ranging; spatial filter; frequency-domain filtering; time-domain filtering

## 1 引言

卫星激光测距(SLR)主要由激光发射和接收光学机械系统、控制系统、光电探测仪器、激光脉冲飞行时间记录和处理等部分组成。该技术主要用于地球动力学、卫星精密定轨、深空相对论应证实验,配合星载高度计研究海洋、极地冰区、大气系统特性等。卫星激光测距通过测量激光在地面与卫星之间的往返传播时间来进行测距,仅单次测量就可以计

算绝对距离,其测量精度与所测距离无关,这是它与其他空间观测技术(如 VLBI、GPS、SAR 等)的主要差别,以上因素决定了其在空间大地测量领域内不可替代的地位。

受天空背景噪声以及跟踪技术的影响,传统的 SLR 只能在夜间观测,因此具备白天测距能力对 SLR 数据资料的丰富,以及相关领域研究工作的开展具有重要意义。奥地利的 Graz 站是世界上第一个实现常规白天测距的观测站,国内长春、上海、昆

\* 收稿日期:2012-10-23

作者简介:王培源,男,1979 年生,硕士,助理研究员,现主要从事卫星激光测距硬件系统研制工作. E-mail:wpysr@163.com

明、北京也初步掌握了相关的技术。TROS1000 是目前口径最大的流动 SLR 观测系统,但车载的空间限制,接收望远镜焦距仅 6.8 m(一般 1 m 口径望远镜焦距约为 8 m),造成系统视场角较大,更容易受到天空背景噪声的干扰。本文介绍了针对 TROS1000 观测系统的空间滤波技术的设计方案及实施方法,实现了对白天背景噪声的有效抑制。

## 2 白天天空背景噪声的影响

白天天空背景噪声是夜晚的  $10^6$  倍,而天空背景噪声在接收器光敏面上产生的平均光子速率  $N_n = 2.7 \times 10^6$  光电子/S,因此对于 SLR 这种单光子接收系统而言,从大量的噪声中识别出微弱的激光回波十分困难。

根据激光测距方程,卫星回波在接收器光敏面上产生的平均光电子数  $N_s$  可以表示为:

$$N_s = \frac{16ESA_s A_r K_t K_r T^2 \eta \alpha}{\pi^2 R^4 \theta_s^2} \quad (1)$$

式中, $E$  为脉冲能量,取 1 mJ (@ 532nm, KHz); $S$  为每焦耳能量的光子数,取  $2.8 \times 10^{18}$  (@ 532nm); $A_s$  为卫星角反射器的有效反射面积,对于 LAGEOS 卫星,取  $257 \text{ cm}^2$ ;  $A_r$  为接收口径面积,1 m 口径望远镜扣除副镜面积为  $0.65 \text{ m}^2$ ;  $K_t$  为发射系统的效率,取 0.6;  $T$  为双程大气透过率,取 0.6;  $\eta$  为接收器光电转换的量子效率,对于 C-SPAD,取 0.2;  $\alpha$  为衰减因子(包括卫星发射率、大气影响等),取 13 dB;  $R$  为卫星距离,对于 LAGEOS,取 7 000 km;  $\theta_t$  为激光光速发散角,取 15 角秒;  $\theta_s$  为卫星反射器的发散角,对于 LAGEOS 卫星,取 17 角秒。则计算得到  $N_s = 0.86$  光电子<sup>[1]</sup>。

在探测器 200 ps 的响应时间内,得到的光电子总数为:

$$N = N_s + N_n \cong N_s \quad (2)$$

根据 Poisson 分布,得到 1 个以上光电子的概率为:

$$P(1) = 1 - e^{-N} = 0.58 \quad (3)$$

由于探测器 C-SPAD 的探测阈值为单光子,则探测的成功率为:

$$P = (1 - P_{FA})P(1) = 0.46 \quad (4)$$

式中, $P_{FA}$  取 0.2,为背景噪声中 1 个光子触发探测器的虚警概率,与系统滤波能力有关。

综上所述,在不考虑系统指向、跟踪误差的情况下,为保证系统在白天噪声背景下获得卫星回波信号,还必须采用空间域滤波(视场光阑)、光谱域滤波(窄带滤光片,带宽 < 1.5 埃)、时间滤波(距离门 < 20 ns)。

## 3 空间滤波的方案设计及安装

当视场大型卡塞格林望远镜视场光阑安装在焦点处时,视场光阑直径  $D$  可以表示为:

$$D = 2f_0 \tan(\omega/2) \quad (5)$$

式中, $\omega$  为视场角, $f_0$  为望远镜焦距。

对于流动卫星激光测距系统 TROS1000<sup>[2]</sup>,为抑制大量的背景噪声选择  $\omega = 15''$ ,望远镜焦距  $f_0 = 6\,800 \text{ mm}$ ,则可得出视场光阑直径  $D \leq 0.5 \text{ mm}$ 。同时视场光阑的安装沿光轴和垂直光轴方向,有着严格的要求。

### 3.1 光阑沿光轴方向的安装

TROS1000 的接收系统原理如图 1 所示,被望远镜接收到的光经过分光棱镜,一部分到达 ICCD 用于辅助跟踪,另一部分经过视场光阑、准直透镜、窄带滤光片,到达单光子探测器 C-SPAD,最终获得激光脉冲回波信号。视场光阑采用 9 片式可变光阑结构,最大通光孔径 8 mm,最小通光孔径 0.5 mm。

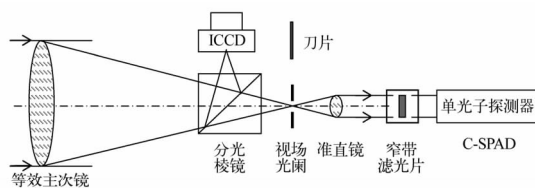


图 1 TROS1000 接收系统原理

Fig. 1 Principle of TROS1000 receiving system

为实现光阑准确定位于系统焦点处,一个刀片被安装在与视场光阑所在的同一个调节导轨上,且二者同位于与光轴垂直的平面内。一旦刀片沿光轴方向的位置与焦点重合,那么可认为视场光阑亦满足要求<sup>[3]</sup>。

图 2 演示了利用阴影法调整刀口与系统焦点重合的方法。首先望远镜跟踪一颗恒星,则恒星作为平行光进入了望远镜视场,则在焦点后方看到一个圆形的亮斑。根据光的直线传播定理,当沿光轴方

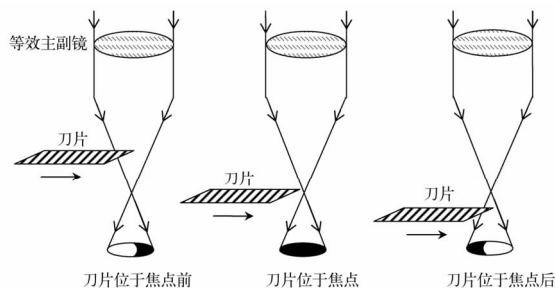


图 2 刀口阴影法用于视场光阑沿光轴方向的位置

Fig. 2 Edge shadow method for iris diaphragms setup in the axis direction