

## SLR 系统地靶数值仿真及数据处理

苗澍茁<sup>1,2</sup>, 安 宁<sup>1\*</sup>, 高 健<sup>1</sup>, 温冠宇<sup>1</sup>, 宋清丽<sup>1</sup>, 董 雪<sup>1</sup>, 马 磊<sup>1</sup>, 范存波<sup>1</sup>

(1. 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站, 吉林 长春 130117;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 地靶测量是获取 SLR 系统时延值、校准系统误差的重要手段, 对提高系统测距精度具有重要意义。基于 SLR 系统地靶测量原理, 采用蒙特卡洛方法, 建立了地靶测距模型, 实现了 SLR 地靶测距仿真。同时, 从噪声的角度出发, 提出了一种自适应噪声相关性匹配 (ANCM) 算法对地靶测距数据进行去噪, 利用短时静态实测背景噪声和随机噪声阈值构建了回波噪声模板, 结合 SLR 地靶数值仿真模型产生的模拟测距数据, 通过优化回波选取区间、算法迭代次数等参数, 完成了地靶有效信号的提取。与传统地靶数据处理算法相比, 利用 ANCM 算法得到的中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站 SLR 地靶数据有效点数增加了 30% 以上, 数据处理精度提高 2 倍左右, 数据处理的效率得到明显改善, 为准确地获取 SLR 系统时延值提供了新的思路。

**关键词:** SLR; 蒙特卡洛; 地靶; 数值仿真; 数据处理

**中图分类号:** P228.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200402

## Numerical simulation and data processing of ground target in SLR system

Miao Shuzhuo<sup>1,2</sup>, An Ning<sup>1\*</sup>, Gao Jian<sup>1</sup>, Wen Guanyu<sup>1</sup>, Song Qingli<sup>1</sup>, Dong Xue<sup>1</sup>, Ma Lei<sup>1</sup>, Fan Cunbo<sup>1</sup>

(1. Changchun Observatory/National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130117, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Ground target measurement is of great significance to improve the ranging accuracy of SLR system, which can obtain the system delay and calibrate the system error. Based on the principle of ground target measurement with SLR, the model of ground target ranging was established by using Monte Carlo method, and the SLR ground target ranging simulation was realized. From the view of noise, the method of adaptive noise correlation matching (ANCM) algorithm was proposed to eliminate the noise in ground target ranging data. The echo noise template was constructed based on the actual measured data of short-term static background noise and the threshold value of random noise, combined with the simulated ranging data generated by SLR ground target measurement model, by optimizing the selection interval of data, the iteration times and other parameters, the effective return signal of ground target was extracted. Compared with traditional ground target data processing algorithm, the effective return points from ground target in Changchun Observatory/National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences is increased by more than 30% with ANCM algorithm, the ranging

收稿日期: 2020-12-08; 修订日期: 2021-02-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (11703054); 吉林省科技发展计划 (20200801050GH)

作者简介: 苗澍茁, 男, 博士生, 主要研究方向为卫星激光测距及应用。

导师简介: 范存波, 男, 研究员, 主要研究方向为卫星激光测距及应用。

通讯作者: 安宁, 女, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光电子器件设计及应用。

accuracy of data processing is improved by around 2 times, the efficiency of ground target data is significantly improved, it also provides a new idea to obtain the delay value of SLR system accurately.

**Key words:** satellite laser ranging(SLR); Monte Carlo; ground target; numerical simulation; data processing

## 0 引言

卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR) 是一项利用激光脉冲来精密测量地面测站到空间目标距离的大地测量技术, 对监测大陆板块移动、地壳形变、地球自转和极移等研究具有重要意义<sup>[1-6]</sup>。在 SLR 原始数据中, 除了激光飞行时间, 还包含了随时间、环境、工作状态不断变化的系统时延值。地靶测量技术<sup>[7]</sup>是测量 SLR 系统时延值、校准 SLR 系统误差的重要手段。地靶测量过程中的误差来源主要包括电学系统误差、光学系统误差、数据处理误差等。其中, 降低数据处理误差对于提高地靶测量数据的精度具有重要的意义<sup>[8-9]</sup>。

为了进一步提高 SLR 系统时延值的准确度, 减小由数据处理技术引起的随机误差, 文中对 SLR 地靶测距及相关数据处理技术进行了系统研究。首先建立了基于蒙特卡洛方法的 SLR 地靶数值仿真模型, 得到了与实际相符的地靶回波信号点云分布图。其次, 分析了 SLR 地靶测量过程中的噪声分布特点, 提出了一种基于自适应噪声相关性匹配 (adaptive noise correlation matching, ANCM) 的地靶数据处理方法, 完成了地靶数据中噪声与有效数据的分离。最后, 利用 ANCM 法和传统地靶数据处理算法对中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站 (下面简称长春站) SLR 地靶实测结果进行数据处理, 分析比较 ANCM 算法的准确性及有效性。

## 1 SLR 地靶数值仿真模型

SLR 地靶测量是利用测距系统对地面已知距离的地靶目标进行观测, 间接获取系统时延值的过程, 其数值的大小随时间及环境等因素的改变呈一定的波动性和随机性。在现有的理论分析中, 通常采用激光雷达方程对理想状态下的 SLR 地靶回波光子数进行简单估算, 忽略了噪声实际分布的影响, 无法充分描述 SLR 地靶回波信号的分布特点, 不利于 SLR 地靶数据精度的进一步提高。蒙特卡洛数值模拟是一

种利用计算机真实实验的统计方法, 可以实现对整个测距过程的模拟并得到有效的回波统计结果<sup>[10-11]</sup>。为此, 文中基于 SLR 地靶测距原理, 采用 Matlab 语言, 结合蒙特卡洛方法, 完成了 SLR 地靶测距的仿真, 具体的数值仿真流程如图 1 所示。

对于 SLR 地靶测量, 通常采用激光脉冲的标准模型作为仿真输入模型, 模型公式如下所示<sup>[12]</sup>:

$$Q(t) = \frac{t}{\tau} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^n\right] \quad (1)$$

式中:  $n$  为激光模型的类别, 由于 SLR 系统激光器为普通调 Q 激光, 设  $n=1$ ;  $\tau$  与激光半波宽  $P$  的关系为  $P=3.5\tau$ , 可根据实际激光器的半波宽参数求得  $\tau$  值得到激光输入模型。

在 SLR 系统中, 探测器接收到的回波信号除了有效的反射回波外, 还伴随有各种噪声, SLR 测量噪声值  $N$  为<sup>[13-14]</sup>:

$$N = N_{br} + N_{bs} + N_{sl} \quad (2)$$

式中:  $N_{br}$  为目标黑体辐射噪声;  $N_{bs}$  为后向散射噪声;  $N_{sl}$  为日光背景噪声。对于 SLR 地靶, 背景噪声主要来源于日光背景噪声, 此噪声可用公式 (3) 表示<sup>[15]</sup>:

$$N \approx N_{sl} = \rho \cdot \eta_r \cdot \theta_r^2 \cdot A_r \cdot N_\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot \theta_s \cdot T^2 \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为目标表面的反射率;  $\eta_r$  为 SLR 接收望远镜系统的接收效率;  $\theta_r$  为目标探测视场角;  $A_r$  为接收望远镜的有效面积;  $N_\lambda$  为在大气层外在激光波长处的太阳光谱辐照度;  $\Delta\lambda$  为接收望远镜系统中的窄带滤光片的带宽;  $\theta_s$  为日光照射方向与待测目标的表面法向量的夹角;  $T$  为双层大气透过率。

到达 SPAD 的平均噪声光子数为  $N_a$ <sup>[15]</sup>:

$$N_a = \frac{N \cdot \Delta t}{E_{hv}} \quad (4)$$

式中:  $E_{hv}$  为单光子能量。将背景噪声强度转化为光子形式, 可用公式 (5) 表示:

$$N_b = N_a \cdot \eta_q = \frac{\rho \cdot \eta_r \cdot \theta_r^2 \cdot A_r \cdot N_\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot \theta_s \cdot T^2 \cdot \Delta t}{E_{hv}} \cdot \eta_q \quad (5)$$

式中:  $\eta_q$  为量子效率;  $N_b$  为相应时间段内探测到的噪

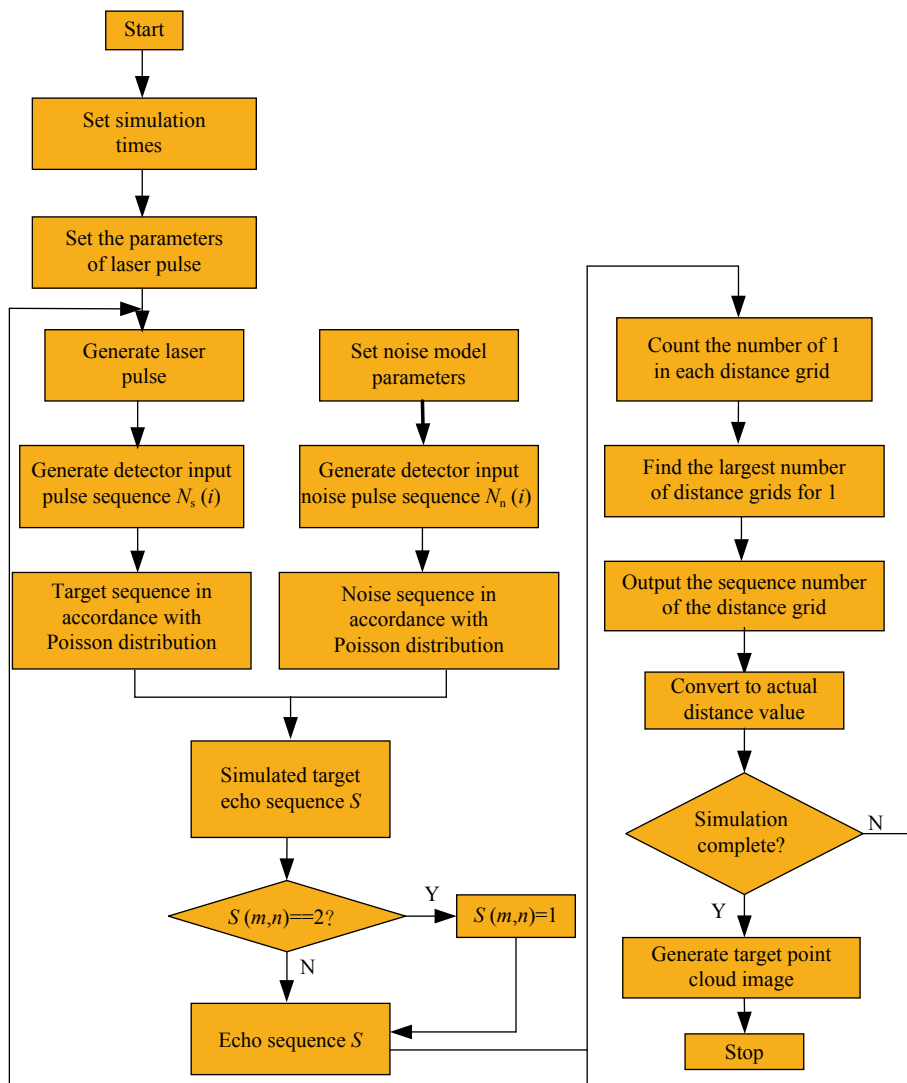


图 1 SLR 地靶数值仿真流程图

Fig.1 Flow chart of ground target numerical simulation of SLR

声平均光电子数。

由单光子 SPAD 探测器探测模型可知,有效回波信号与噪声信号在每个距离栅格内出现的概率 $\eta_s(i)$ 与 $\eta_n(i)$ 均服从泊松分布<sup>[16-18]</sup>。对应于 $N_s(i)$ 与 $N_n(i)$ 内的每个距离栅格单元,分别产生概率为 $\eta_s(i)$ 与 $\eta_n(i)$ 的(0,1)二维随机序列,可根据应用需要调节序列长度。将目标回波序列和噪声回波序列按对应的距离栅格单元相加,得到初始二维合成回波序列 $S$ ,统计每一级的距离栅格内对应的值为1的总数,找出具有最多的1值的栅格距离的序号 $i$ ,以此序号作为泊松分布的 $\lambda$ 参数,再利用泊松分布发生器产生一个随机的距离栅格序号 $i'$ 。最后,根据距离与时间的对应关系将 $i'$ 换算为地靶测量值完成一个脉冲周期的测量。

基于长春站 SLR 系统参数,设地靶距离 $D=3.699$  m,

激光器输出脉宽 $P=50$  ps, 频率 $f=1$  kHz, 量子效率 $\eta_q=0.2$ , 滤光片带宽 $\Delta\lambda=0.15$  nm, 望远镜接收效率 $\eta_r=0.5$ , 接收面积 $A_r=0.251$  m<sup>2</sup>, 目标探测视场角 $\theta_r=10''$ , 在 $\lambda=532$  nm 处,太阳光谱辐射照度 $N_\lambda=1484.9$  W/m<sup>2</sup>, 单光子能量 $E_{hv}=3.53\times 10^{-19}$  J, 日光照射方向与地靶表面法向量的夹角 $\theta_s=45.5^\circ$ , 大气双层透射率 $T=0.5$ , 单次测距获得数据点数为 10 000 点。根据公式(1)~(5), 结合地靶仿真流程, 得到 SLR 地靶仿真测量数据。其中,地靶模拟测量数据的均值为 209.7498 ns, 标准差为 0.049 7 ns, 白天仿真地靶测量数据及其概率统计结果如图 2 所示。

为了验证上述仿真结果的准确性,笔者利用长春站 SLR 系统对地靶目标进行了白天环境下的实测, 实验结果如图 3 所示。其中,长春站 SLR 地靶实测数

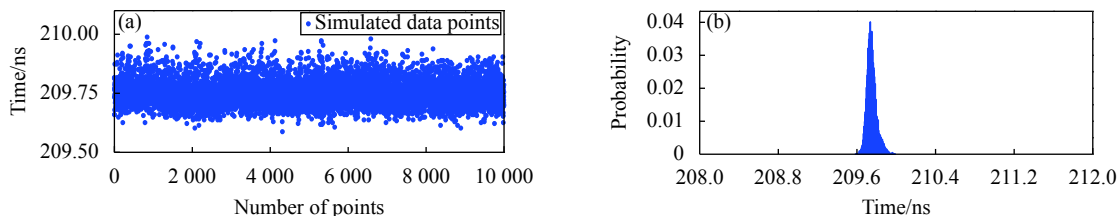


图 2 白天地靶仿真测量数据

Fig.2 Simulated ground target measurement data in daytime

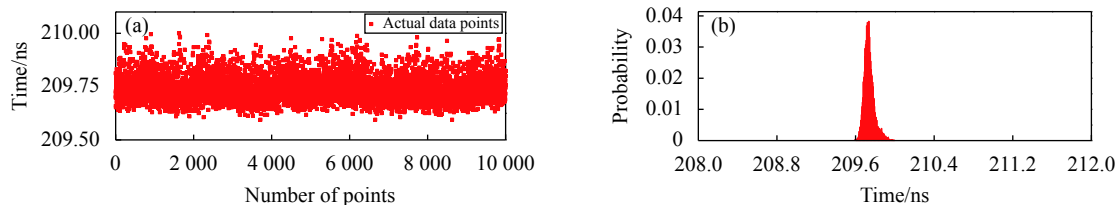


图 3 白天地靶实际测量数据 (UTC: 8 : 05; 温度: 25 °C, 晴)

Fig.3 Actual ground target measurement data in daytime (UTC: 8 : 05; TEMP: 25 °C, sunny)

据均值为 209.738 ns, 标准差为 0.052 9 ns, 与仿真结果基本相符, 实测回波与仿真回波波形的皮尔逊相关系数为 0.946 8。

为进一步验证 SLR 地靶数值仿真模型的有效性, 重复执行仿真程序 3 次, 并与 3 组白天实测地靶数据比较, 结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 3 组统计数据的皮尔逊相关系数分别为 0.9510、0.9247、0.9452。比较结果表明, 上述 SLR 地靶数值仿真程序可有效模拟 SLR 地靶的回波信号分布, 产生与实测数据分布相符的仿真测量数据, 为后续数据处理方法研究提供可靠的数据源和理论基础。

表 1 仿真测量与实际测量数据统计结果

Tab.1 Statistical results of simulated data points and actual data points

	Simulated data points	Actual data points
1	Total	10000
	Average/ns	209.701 7
	Standard deviation/ns	0.051 1
	Pearson correlation coefficient	0.951 0
2	Total	10000
	Average/ns	209.721 4
	Standard deviation/ns	0.048 2
	Pearson correlation coefficient	0.924 7
3	Total	10000
	Average/ns	209.753 1
	Standard deviation/ns	0.050 8
	Pearson correlation coefficient	0.945 2

## 2 自适应噪声相关性匹配算法

在传统地靶数据处理算法中, 从回波的数学统计特征出发筛选 SLR 地靶的有效点数, 以 2.5 中误差作为阈值对数据进行多次迭代处理并得到地靶有效观测距离值<sup>[8]</sup>。但是, 由于地靶回波信号呈高斯分布, 有效信号的筛选更依赖于回波数据本身的偏差, 传统方法无法进一步去除夹杂在 2.5RMS 有效回波中的噪声点。为了进一步提高 SLR 地靶测距精度, 弥补现有统计滤波方法的不足, 文中从噪声分布的角度出发, 提出了一种自适应噪声相关性匹配 (ANCM) 算法。利用长春站 SLR 系统对背景噪声进行实测, 并作为短时静态实测背景噪声模板剔除回波数据中的噪声。具体算法流程如图 4 所示。

在 ANCM 算法中, 首先利用短时静态实测背景噪声模板  $N_p$  对地靶测距数据  $S_0$  进行预处理。以噪声模板的标准差  $\sigma_1$  作为阈值, 初步移除回波数据中的噪声点, 得到经预处理后数据  $S'$ 。SLR 地靶测量是一种典型的微弱光子测量技术, 受到了各种噪声的干扰。这些随机噪声与来自地靶的反射回波相叠加, 导致系统信噪比降低, 严重影响了地靶测量精度。基于长春站 60 cm SLR 系统, 笔者对白天背景噪声进行了测试, 共测量 3 组, 统计结果如图 5 所示。从图中可以看出, 在同一观测环境下, 背景噪声强度大且整体呈现均匀分布。因噪声受到温度、气压等环境因素的影响, 其强度具有一定的随机性。

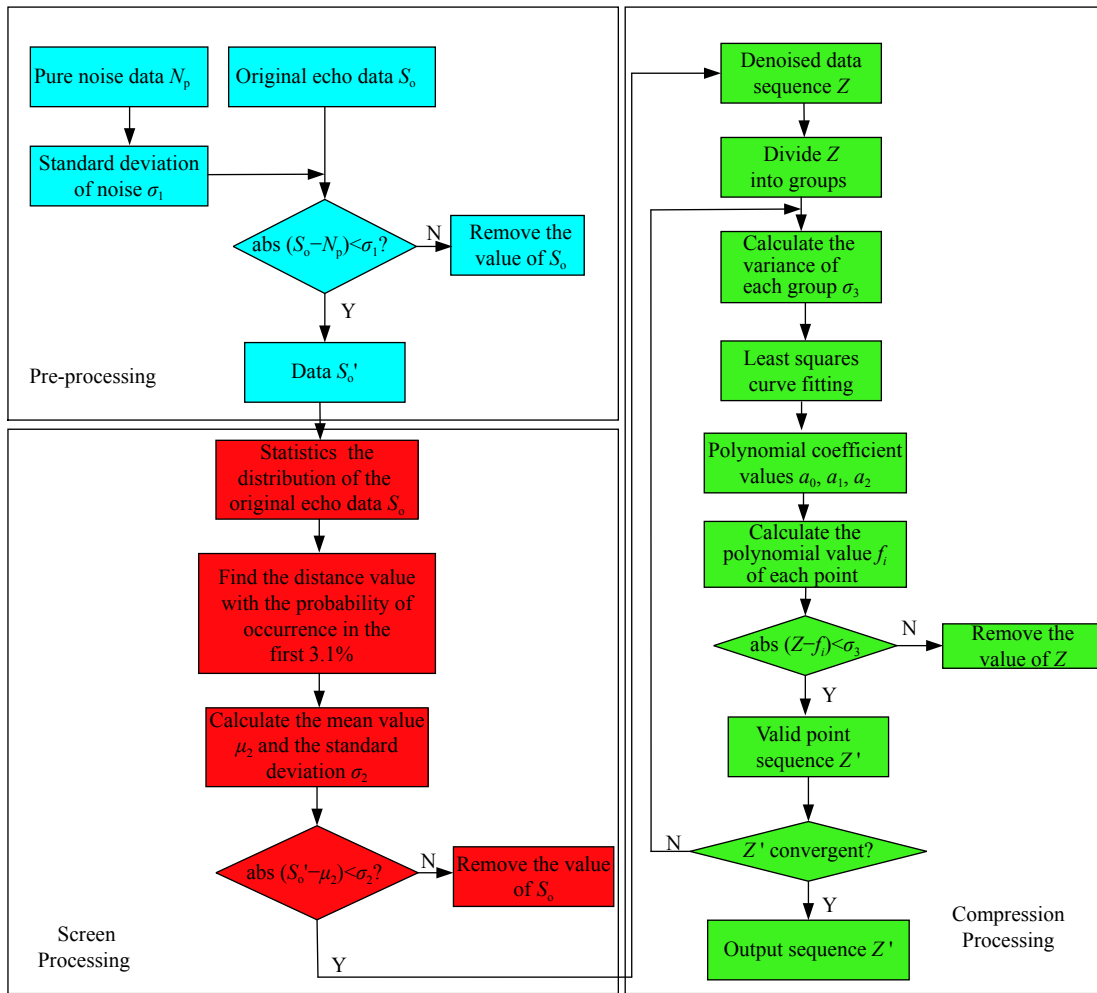


图 4 ANCM 算法流程图

Fig.4 Flow chart of ANCM algorithm

由于地靶测距量程短, 噪声分布均匀, 以实测的纯噪声点数据作为噪声剔除模板, 最大限度地去除回波数据中噪声点, 保留有效回波数据。图 6(a) 为使用 SLR 地靶数值仿真模型模拟地靶距离值为 3 m 时, 得到的 5000 点模拟测距数据图像, 图 6(b) 为使用噪声模板去除噪声后得到的测距数据图像。

从图 6(a) 与图 6(b) 可知, 预处理后点云数据密度降低。对 ANCM 预处理前后的回波数据进行了统计, 统计结果如图 6(c) 与图 6(d) 所示。结果表明, 与预处理前数据相比, 经 ANCM 预处理后的地靶回波标准差由 0.050 1 ns 减小为 0.039 4 ns, 地靶回波波形更加平滑。这表明了该方法可有效去除噪声, 同时改善地靶回波数据的稳定性。由于地靶数据受环境、温度、时间等影响, 测距数据具有一定随机性。为了进一步去除噪声, 利用 SLR 地靶数值仿真模型生成 5 组 3 m 地靶模拟测距数据, 对每组地靶测距数据依

频次进行统计, 确定随机噪声阈值。当回波选取区间为出现频次在前 0%~3.25% 内的测距数据时, 标准差趋于 0; 当回波选取区间为出现频次在 3.25% 以后的测距数据时, 数据标准差变化幅度增大, 地靶数据呈明显波动。结果如图 7 所示。

为了保证地靶数据的稳定性, 修改 SLR 地靶仿真模型中的距离参数, 对具有不同距离的地靶目标进行了仿真, 并利用上述方法获得了具有不同距离的回波数据稳定区间, 结果如图 8 所示。

从图 8 可知, 由于系统时延值具有一定的随机性, 对于不同距离的地靶, 数据的稳定区间各不相同。为了保证地靶数据的稳定性, 同时兼顾程序运行效率, 将随机回波阈值设定为 3.1%, 即利用频次统计在前 3.1% 的数据的均值  $\mu_2$  与标准差  $\sigma_2$  作为判断依据, 对回波数据进行二次筛选, 得到数据序列  $Z'$ 。

最后, 采用最小二乘拟合方法实现对回波数据

Z 的压缩处理, 将多项式结果 Z 与  $f_i$  作差取绝对值, 以数据标准差  $\sigma_3$  作为判断阈值去除残余的噪声数据, 得到有效地靶数据  $Z'$ 。压缩处理可减小系统对大数

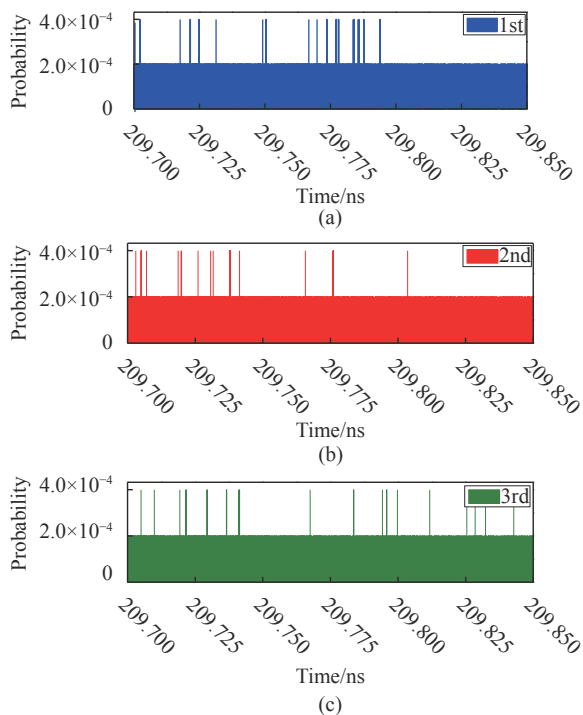


图 5 长春站实测纯噪声数据统计 (UTC: 8 : 10; 温度: 19 °C, 晴)  
Fig.5 Statistics of pure noise data measured at Changchun station (UTC: 8 : 10; TEMP: 19 °C, sunny)

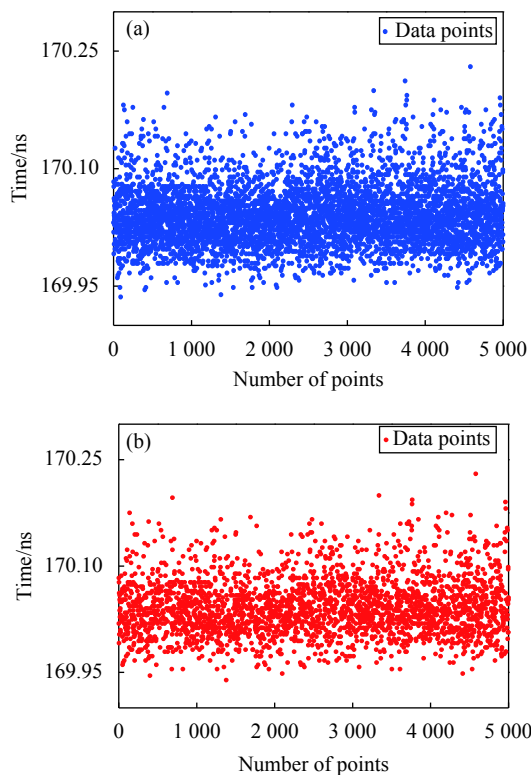


图 6 预处理前后数据及回波波形比较。(a) 处理前的数据; (b) 处理后的数据; (c) 处理前的回波波形; (d) 处理后的回波波形  
Fig.6 Data and echo waveform comparison before and after pre-processing. (a) Data before processing; (b) Data after processing; (c) Echo waveform before pre-processing; (d) Echo waveform after pre-processing

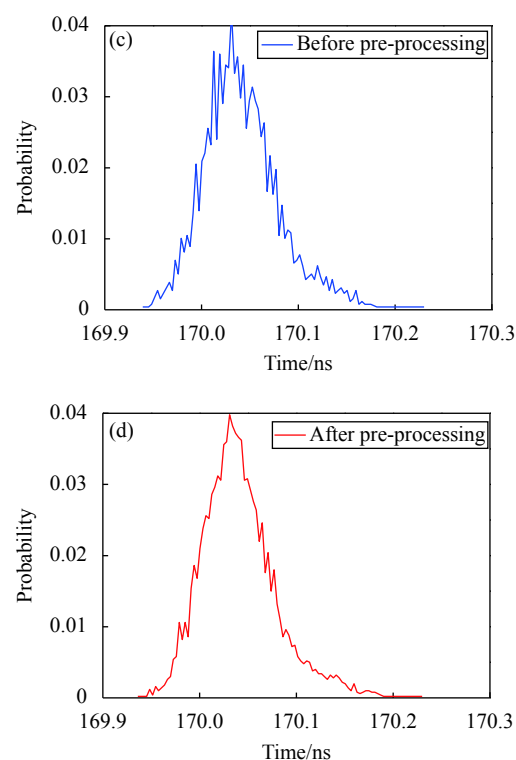


图 7 模拟原始点云数据标准差变化 (地靶距离值设为 3 m)  
Fig.7 Standard deviation change of original data points (Distance of the ground target is set to 3 m)

据的运行时间, 并最大程度地保留有效距离信息。表 2 为不同算法迭代次数对模拟 3 m 地靶测距数据有效点精度的影响。

从表 2 可以看出, 随着算法迭代次数的提高, 地

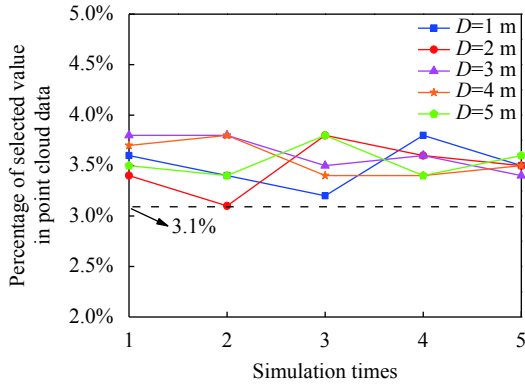


图 8 不同距离下噪声阈值变化图

Fig.8 Threshold change of noise at different distances

表 2 不同迭代次数对有效点精度的影响

Tab.2 Precision of valid points with different iteration times

Times	Total	Valid points	Average/ns	Standard deviation/ns
1	5000	848	169.9745	0.0177
2	5000	387	169.9741	0.0153
3	5000	329	169.9743	0.0126
4	5000	328	169.9742	0.0125
5	5000	328	169.9742	0.0125
6	5000	328	169.9742	0.0125

靶数据的平均测量值与标准差趋于收敛。当迭代次数大于 4 次后, 均值和标准差结果基本保持不变。这表明了 ANCM 算法经过 4 次迭代即可获得精度较高的有效点数据, 且数据的稳定性较好。因此, 为提高程序运行效率, 在 ANCM 算法中采用 4 次迭代对地靶数据进行处理。

### 3 ANCM 算法比较与应用

为验证 ANCM 算法的有效性, 采用传统地靶数据处理算法与 ANCM 算法对长春站白天条件下测得的 5000 点实测地靶数据进行处理, 处理结果如表 3 所示。

从表 3 中可以看出, 与传统处理算法相比, 使用 ANCM 算法得到的有效点点数增加了 33.5%, 地靶数据标准差从 0.0373 ns 降低至 0.0153 ns。同时, ANCM 处理时间从 2.84 s 降低为 1.45 s, 约提高了 2 倍, 数据处理效率得到改善。

为进一步验证 ANCM 算法的适用性, 对不同时刻的 20 组白天地靶实测数据进行了处理, 统计结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 与传统地靶数据处理算法相

表 3 传统地靶数据处理算法与 ANCM 算法数据处理结果 (UTC: 8 : 55; 温度: 22 °C, 晴)

Tab.3 Processing results of traditional ground target data processing algorithm and ANCM algorithm (UTC: 8 : 55; TEMP: 22 °C, sunny)

	Traditional algorithm	ANCM algorithm
Valid points	200	267
Standard deviation/ns	0.0373	0.0153
Processing time/s	2.84	1.45

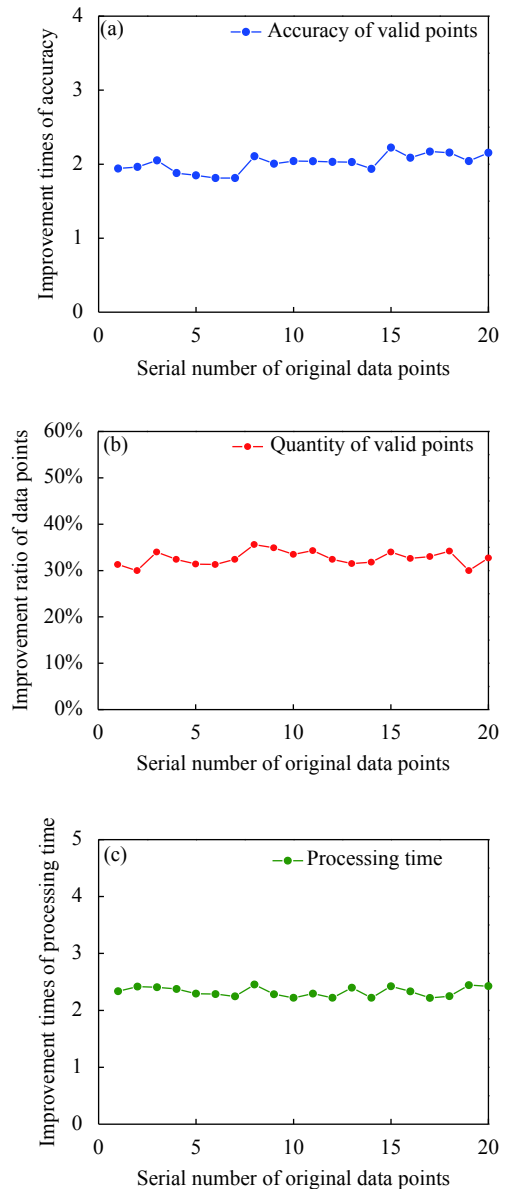


图 9 标准点算法与 ANCM 算法统计结果。(a) 精度变化; (b) 点数变化; (c) 处理时间变化

Fig.9 Statistical results between standard point algorithm and ANCM. (a) Change of precision; (b) Change of data points; (c) Change of processing time

比,由 ANCM 算法得到的地靶数据处理精度提高了 2 倍左右,得到的平均有效点数提高了 32.63%,观测数据质量得到明显改善。同时,算法处理效率提高 2.3 倍左右。这是因为 ANCM 算法采用了实测背景噪声和随机噪声阈值构建了噪声模板,进一步去除了混杂在地靶回波数据中的噪声,有效提高了 SLR 地靶数据质量。同时,ANCM 算法优化了数据迭代次数,采用了更快、更有效的判断方法筛选回波数据,在提高有效点数据数量的同时,也提高了程序运行效率。

#### 4 结 论

文中基于 SLR 系统地靶测量原理,建立了一种基于蒙特卡洛方法的地靶测距数值仿真模型,得到了与实际相符的 SLR 地靶测距数据。利用数值仿真模型生成的模拟地靶测量数据分析了 SLR 系统中噪声分布的特点,提出了 ANCM 数据处理方法。在回波选取区间与算法迭代次数等方面对 ANCM 算法进行了优化,完成了地靶测量数据中的信噪分离,得到了有效回波信号。与传统地靶数据处理算法相比,利用 ANCM 算法得到的长春站地靶数据点数增加了 33.5%,数据标准差从 0.037 3 ns 降低至 0.015 3 ns,有效降低了数据处理误差对地靶测距精度的影响,提高了数据处理的稳定性。为进一步验证 ANCM 的适用性,利用上述方法对 20 组不同时刻的白天地靶原始数据进行处理。结果表明,由 ANCM 算法得到的地靶数据处理精度可提高 2 倍左右,有效点数平均增加了 32.63%,算法处理效率提高了约 2.3 倍,地靶数据处理的质量得到明显改善。文中的研究结果为获取系统时延值、校正系统误差提供了新的研究思路。

#### 参考文献:

- [1] Strugarek D, Sonica K, Arnold D, et al. Determination of global geodetic parameters using satellite laser ranging measurements to Sentinel-3 satellites [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(2282): 1-21.
- [2] Matthew W, Ulrich S, Ivan P, et al. The next generation of satellite laser ranging systems [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(11): 2227-2247.
- [3] José R, Appleby G, Otsubo T, et al. Upgraded modelling for the determination of centre of mass corrections of geodetic SLR satellites: impact on key parameters of the terrestrial reference frame [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(12): 2553-2568.
- [4] Song Qingli, Liang Zhipeng, Dong Xue, et al. High repetition rate laser ranging to space debris from Changchun Observatory [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10s): 175-182. (in Chinese)
- [5] Wen Guanyu, Wang Shuang, An Ning, et al. Analysis of aberration effect on high orbit satellite laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0906001. (in Chinese)
- [6] Kunimori H, Ishizu M, Araki Hi. Transmit/receive optical ranging system for long distance target [J]. *Technical Report of Ieice Sane*, 2012, 111(436): 7-12.
- [7] Guo Tangyong, Tan Yechun, Li Cuixia, et al. Research on calibration of super short distance target in satellite laser ranging [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2001, 21(1): 90-94. (in Chinese)
- [8] Liu Yuan. Research on data processing method of high frequency laser ranging of spherical satellite[D]. Changchun: Changchun Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2019: 23-27. (in Chinese)
- [9] Samwel S W, Metwally Z, Mikhail J S, et al. Analyzing the range residuals of the SLR data using two different methods [J]. *NRIAG Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2005, 4(1): 1-14.
- [10] Zhao Nan, Xue Yu, Wang Jing. Analysis of stray radiation from infrared optical system with Monte-Carlo method [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(6): 665-670. (in Chinese)
- [11] Salih Y, Victor, Jun R O, et al. 2D Monte Carlo simulation of a silicon waveguide-based single-photon avalanche diode for visible wavelengths [J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15232-15246.
- [12] Drodewski M, Sonica K, Zus F, et al. Troposphere delay modeling with horizontal gradients for satellite laser ranging [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(8): 1-14.
- [13] Li Ming, Xue Li, Huang Chen, et al. Estimation of detection range for space debris laser ranging system based on efficient echo probability [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 260-267. (in Chinese)
- [14] Liu Chenghao, Chen Yunfei, He Jiwei, et al. Simulation and accuracy analysis of single photon ranging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 382-387. (in Chinese)



- [15] Zheng Xiangyang. Research of data processing technology in photon counting LIDAR systems under movable conditions[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016: 31-34. (in Chinese)
- [16] Xu L, Zhang Y, Zhang Y, et al. Signal restoration method for restraining the range walk error of Geiger-mode avalanche photo diode lidar in acquiring a merged three-dimensional image [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(11): 3059-3065.
- [17] Liu Qun, Liu Chong, Zhu Xiaolei, et al. Analysis of the optimal operating wavelength of spaceborne oceanic lidar. [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 148-155. (in Chinese)
- [18] Xue W, Liu L, Dai X, et al. Moving target ranging method for a photon-counting system [J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34161-34178.