

# 高重频测距中多脉冲测量数据的处理方法研究

李祝莲 郑向明 伏红林 何少辉 熊耀恒

(中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650011)

**摘要** 对高重频激光测距中多脉冲异常测距现象进行了分析和研究,采用地靶测量脉冲时间间隔、主波时刻校正和屏幕处理等技术方法,得出多脉冲测量数据的处理方法。将该方法应用于实测数据的处理,结果表明:按多脉冲测量数据进行处理后,有效数据量至少增加 10%,均方根值基本一致,有利于测量回波信号较少但存在多脉冲现象时的中高轨卫星测量数据处理。

**关键词** 测量;激光测距;高重频测距;多脉冲;屏幕处理技术

**中图分类号** TB96 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s108007

## Processing Method Research for Multi-Pulse Measured Data of High Repetition Frequency Laser Ranging

Li Zhulian Zheng Xiangming Fu Honglin He Shaohui Xiong Yaoheng

(Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650011, China)

**Abstract** The data processing method for multi-pulse measured data in high frequency laser ranging is analyzed and researched, and a useful method is got by measuring pulse interval time using ground target ranging, adjusting transmitting epoch, screen processing and etc. Applied to process ranging data from 1.2 m telescope high frequency laser ranging system, it indicates efficient data increasing 10% at least, and root mean square hardly changing. This is significant to middle and high orbit satellites laser ranging data process where the echo signal is a few but there is multi-pulse measured data phenomenon.

**Key words** measurement; laser ranging; high-repetitive frequency ranging; multi-pulse; screen processing

**OCIS codes** 000.3110; 120.3930; 120.3940; 140.3430

## 1 引言

在卫星激光测距中,回波探测器的暗噪声、发射激光的后向散射噪声和天空背景噪声等将会对回波探测器产生误触发,从而导致观测数据中包含大量的噪声信息。尽管在测距回波信号接收系统采用了光谱滤波技术、空间滤波技术和时间滤波技术等<sup>[1]</sup>,但是测量数据中依然包括大量的噪声信息,白天卫星激光测距的观测数据包含的噪声尤其多。因此,在将观测数据有效地用于相关科学研究之前,必须对原始观测数据进行噪声剔除并提取其中有效回波信号。

人工激光测距的激光器通常由振荡器、单脉冲选择器、放大器、倍频晶体以及若干光学元件等组成。激光发射过程为:由振荡器产生光脉冲序列,单

脉冲选择器从中筛选出振幅最大的一个脉冲,然后将选择出的脉冲进行若干级放大后经倍频输出至遥远的测距卫星。在理想状况下,激光器每次输出为单脉冲,但在实际工作中发现会存在多脉冲输出的现象。由各个脉冲获得的回波信号均为有效测量数据,故研究多脉冲测量数据处理方法具有重要的现实意义<sup>[2]</sup>。

高重频激光测距技术是近几年发展起来的新技术,是激光测距的发展方向之一,因为存在上一个激光脉冲的回波光子未到达之前下一个激光脉冲已发射出去的现象,所以高重频测距系统采用事件计时器分别记录激光脉冲发射时刻和回波信号到达时刻。在国家重大科技基础设施建设项目——《中国

收稿日期: 2013-10-23; 收到修改稿日期: 2013-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(10778705)

作者简介: 李祝莲(1978—),女,博士,高级工程师,主要从事空间目标探测方面的研究。E-mail: lzhl@ynao.ac.cn

大陆构造环境监测网络》的支持下,2010年自适应光学在天文中的应用研究团组在中国科学院云南天文台1.2 m望远镜上成功实现了千赫兹激光测距系统<sup>[3]</sup>,并进入常规观测。系统采用的是脉冲式激光测距,它的激光器有时存在多脉冲输出的异常现象,本文对卫星激光测距观测数据预处理算法进行了详细的阐述,并以该系统获得的测量数据为例分析研究高重频测距中多脉冲数据的处理方法,以便充分利用有效测量数据。

## 2 多脉冲数据间时间间隔

处理多脉冲测量数据的关键是确定多脉冲数据间的时间间隔,这可以通过测量激光器的腔长、测量振荡器产生的光脉冲序列或直接对多脉冲地靶测量数据进行分别处理等方法来获得。

### 2.1 激光器腔长

假设激光器腔长的测量值为 $L$ ,则激光脉冲序列间时间间隔可表示为

$$\Delta t = \frac{2 \times L}{c}, \quad (1)$$

式中 $\Delta t$ 为脉冲序列间的时间间隔, $c$ 为光速,取 $c = 299792458.0 \text{ m/s}$ 。可见,一旦测得激光器腔长,即可计算得到脉冲序列间的时间间隔。

### 2.2 激光器脉冲序列

将示波器接到振荡器的输出端测量光脉冲序列,从信号波形图中便可直接获得脉冲序列的时间间隔 $\Delta t$ 。图1所示为1.2 m望远镜高重频激光测

距系统中激光器振荡器输出的光脉冲序列,示波器每一个横格为5 ns,两个波峰之间共占2.5格,故脉冲间的时间间隔为 $\Delta t = 12.5 \text{ ns}$ 。

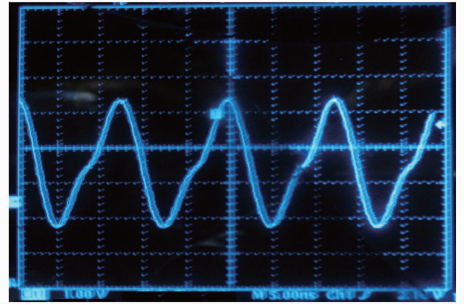


图1 振荡器产生的脉冲序列

Fig.1 Pulse series from oscillator

### 2.3 多脉冲地靶测量数据

按单脉冲测量数据处理方法对多脉冲地靶测量数据进行处理,图2所示为对地面靶进行激光测距所得的多脉冲测量数据,纵坐标为观测值与预报值之差(单位:ps),横坐标为观测时间长度(单位:s),若无特别说明文中观测数据的显示坐标与此一致,其中明显包括4个激光脉冲的测距结果,图中用1,2,3,4标识,显然2中包含最多的回波信号。不考虑保留所有回波信号,即将测量结果视为单脉冲测距处理时,仅对2中的回波信号进行处理。这里为了获得激光脉冲序列间的时间间隔,对相邻两个脉冲进行分别处理,处理后得两个脉冲对应测量数据(为地靶测量距离的平均值),其差即为所要求的脉冲时间间隔 $\Delta t$ 。由此可得脉冲时间间隔 $\Delta t = 12.5 \text{ ns}$ ,与2.2节中所得结果一致。

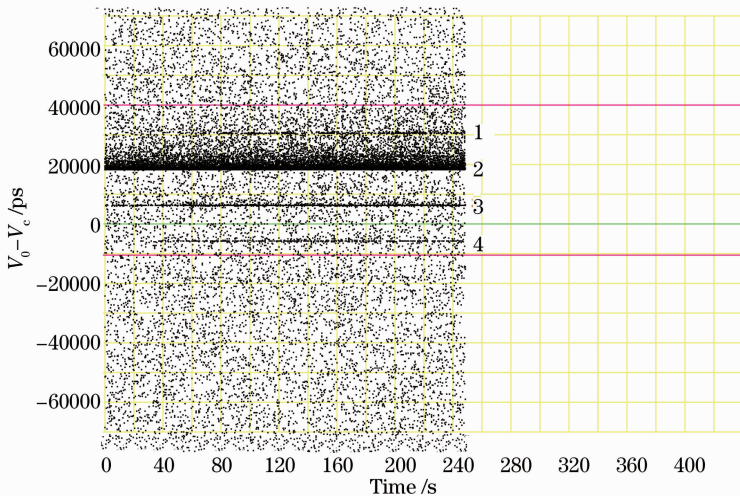


图2 地靶测量数据

Fig.2 Observation data of ground target

### 3 Herstmonceux 算法

Herstmonceux 算法于 1984 年在英国赫斯特蒙苏(Herstmonceux)召开的国际激光测距会议中产生,并在专家们和各测站的共同努力下得到不断发展,它是目前国际卫星激光测距网普遍应用的标准点算法<sup>[4]</sup>,包括数据屏幕预处理和标准点生成。

#### 3.1 屏幕处理技术

屏幕处理技术是借助计算机屏幕显示观测数据,并根据屏幕上的图像进行人机对话的处理方法。该方法还可以对测距系统处于非正常状态下所测得的数据进行有效处理,如激光输出多脉冲状态下的观测数据<sup>[5]</sup>。

屏幕处理技术从原始观测数据中获得有效观测数据的实现过程如下<sup>[6-8]</sup>:

1) 由高精度的卫星轨道预报值产生预报残差  $V_{PR}$  为

$$V_{PR} = V_0 - V_c, \quad (2)$$

并将所有的预报残差计算值画图显示于计算机屏幕上;

2) 删除边缘偏差大的数据点;

3) 对预报残差数据进行多项式拟合得到拟合函数  $f(V_{PR})$ ;

4) 计算拟合残差  $V_{FR}$  为

$$V_{FR} = V_{PR} - f(V_{PR}), \quad (3)$$

得到拟合残差后计算其均方根(RMS)值  $V_{RMS}$ ,删除拟合残差大于  $n \times V_{RMS}$  的预报残差,并重复第 3) 步和第 4) 步,直到无大于  $n \times V_{RMS}$  的预报残差为止。对于使用多个光子探测的系统  $n=3$ ,而对于单光子探测系统  $n=2.5$ 。

#### 3.2 标准点生成

经屏幕处理技术作用后得到的有效信号可以应用,但由于数据量很大,故一般不直接加以应用,而是经过一定的处理技术把庞大的数据进行压缩,生成高质量的数据后再作各种科学应用,即所谓的标准点。标准点指自格林尼治平子夜起,在观测弧段上取固定的时间段为一个“窗口”,按一定的技术把“窗口”中的所有观测数据压缩成的一个数据点。它能代表有效观测数据的一切信息<sup>[4]</sup>。

标准点的生成算法如下<sup>[7]</sup>:

1) 根据不同的卫星选择相应的“窗口”时间,将有效观测数据自格林尼治平子夜起,划分为多段数据;

2) 计算第  $i$  个数据段内有效观测数据拟合残差平均值  $\bar{V}_{FRi}$  和观测时刻平均值,  $i = 1, 2, 3, 4, \dots$ ;

3) 查找距离平均时刻最近的观测时刻  $t_i$ , 对应

的观测值为  $V_{Oi}$ , 拟合残差为  $V_{FRi}$ ;

4) 计算标准点  $P_i$  为

$$P_i = V_{Oi} - V_{FRi} + \bar{V}_{FRi}; \quad (4)$$

5) 计算拟合残差的均方根值  $V_{RMSi}$

$$V_{RMSi} = \sqrt{\frac{1}{n_i} \sum_j (V_{FRj} - \bar{V}_{FRj})^2}. \quad (5)$$

### 4 多脉冲测量数据处理和结果

为了便于多脉冲数据处理方法的研究,这里以中国科学院云南天文台 1.2 m 望远镜激光测距系统及其在激光器输出异常情况下所获得的多脉冲测量数据为研究对象,最终获得具有广泛应用价值的多脉冲数据处理方法。

#### 4.1 多脉冲测量数据处理

##### 4.1.1 脉冲时间间隔确定

获得脉冲间时间间隔是进行多脉冲数据处理的第一关键步骤,这里采用 2.3 节的方法获得 1.2 m 望远镜高重频测距系统中的该时间值为 12.5 ns,并用 2.2 节中的测量结果加以验证。

在激光器振荡器产生的脉冲序列中,各脉冲的宽度和脉冲间的间距是相同的。因此,对于一个固定的测距系统,一旦获得脉冲间时间间隔就不用每次进行数据处理时再进行该节内容所述的工作,直接从下一步工作开始即可。

##### 4.1.2 主波时刻校正

卫星激光测距的实质是测量激光脉冲在地面观测站与卫星之间的飞行时间。在高重频测距系统中,激光器发射激光时,截取很少一部分激光,经主波探头 PIN 光电二极管转换为采样信号,使其通过定比鉴别器整形后送事件计时器记录下该主波时刻,同时,绝大部分激光从测距光路射向测距卫星,当望远镜接收到从测距卫星反射回来的回波信号时,由接收光路中的 C-SPAD 单光子探测器接收回波光子并将其转换成电信号输出,同样使其通过定比鉴别器整形后送事件计时器记录下该回波时刻。回波时刻与主波时刻的差即所要测量的激光脉冲飞行时间。

因激光器输出的多脉冲信号强弱不同,因此从 PIN 主波探头获得的多脉冲经定比鉴别器后只有幅度最大的信号被留下,这样事件计时器只能记录到最强激光脉冲对应的主波时刻。如此,需要对多脉冲激光中的其余脉冲进行主波时刻校正,如果事件计时器记录的主波时刻为  $t_0$ ,那么其余脉冲对应的主波时刻  $t_n$  为

$$t_n = t_0 \pm 12.5 \times 10^{-9} \times n, \quad (6)$$

式中  $n$  表示  $t_0$  前或后的第  $n$  个激光脉冲, 多脉冲在  $t_0$  后选择“+”号, 否则选择“-”号。

#### 4.1.3 单脉冲数据处理

经过主波时刻校正后, 重新计算观测值和预报值之间的偏差, 并将其显示于计算机屏幕上。此时, 理论上所有的回波信号与主波信号的偏差应出现在一条线上, 但是实际处理过程中存在不可避免的误

差, 例如少选了回波信号或多选了噪声信号。图 3 所示为 Ajisai 激光测距卫星的多脉冲异常情况下的数据测量结果, 共 5 条分散的测距回波线, 经 4.1.2 节的回波时刻校正处理后得到如图 4 所示的结果, 5 条回波信号线基本重合在一起, 从而变多脉冲数据处理问题为单脉冲数据处理问题, 采用目前正在使用的单脉冲数据处理方法进行数据处理即可。

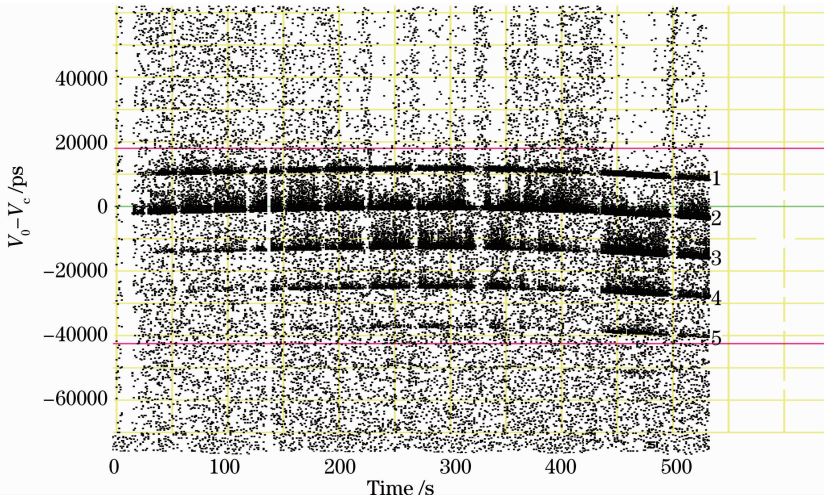


图 3 Ajisai 卫星测量数据

Fig. 3 Observation data of Ajisai satellite

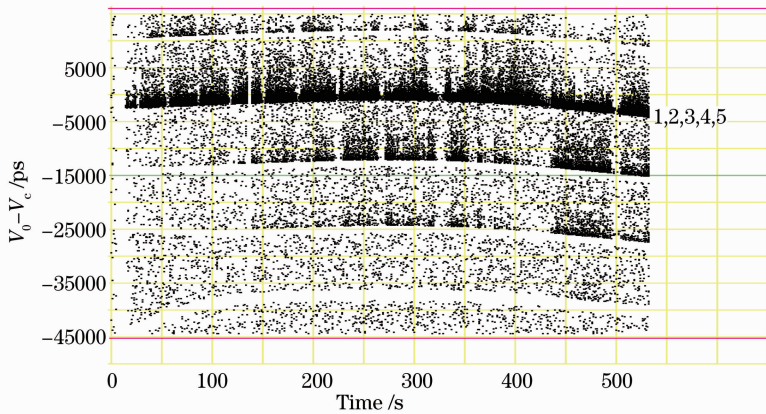


图 4 主波时刻校正后的结果

Fig. 4 Result after transmitting epoch corrected

## 4.2 多脉冲测量数据处理方法应用

### 4.2.1 Ajisai 卫星多脉冲测量数据

对图 3 所示的 Ajisai 激光测距卫星多脉冲测量结果进行数据处理。若不考虑充分利用所有多脉冲测量数据, 则选择回波信号最强的线 2 进行处理, 处理后有效数据为 121830 个点, 均方根值为 1.78 cm,

如图 5 所示。若考虑充分利用多脉冲测得的数据, 即按 4.1 节中所述的方法对测量数据进行处理, 结果如图 6 所示, 有效数据为 138718 个点, 均方根为 1.78 cm。有效数据增加了约 17000 个点, 回波率增加约 13.95%, 均方根值基本一致。

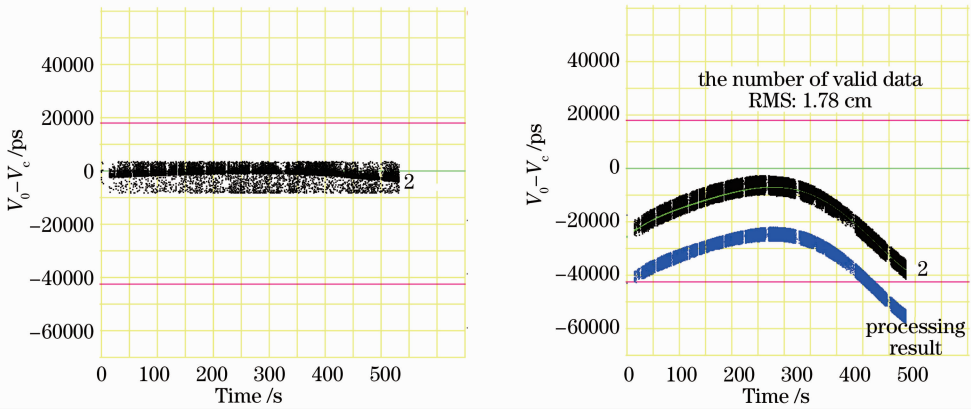


图 5 单脉冲方法处理结果

Fig. 5 Processing result of single pulse method

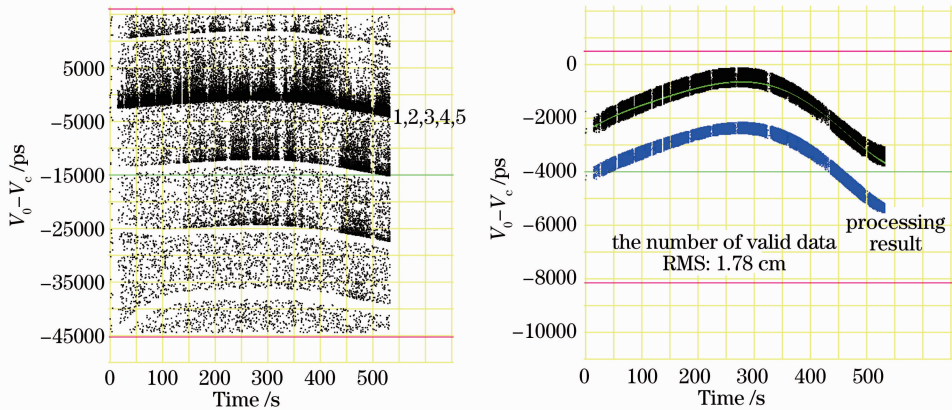


图 6 多脉冲方法处理结果

Fig. 6 Processing result of multi-pulse method

#### 4.2.2 Lageos1 卫星多脉冲测量数据

图 7 所示为 Lageos1 卫星的激光测距数据, 显然比 Ajisai 测距卫星的测距回波信号少很多, 但依然能存在多脉冲测量的异常情况。若不考虑充分利

用所有多脉冲测量数据, 选择回波信号最强的线 2 进行处理, 处理后有效数据为 4238 个点, 均方根值为 1.80 cm, 如图 8 所示。

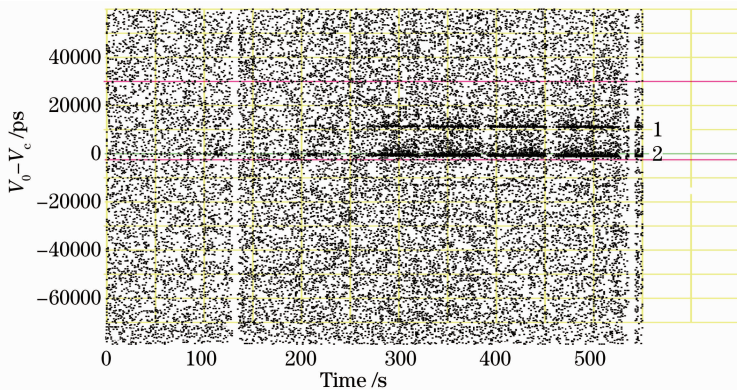


图 7 Lageos1 卫星测量数据

Fig. 7 Observation data of Lageos1 satellite

若考虑充分利用多脉冲所测得的数据, 即按 4.1 节中所述的方法对测量数据进行处理, 结果如图 9 所示, 有效数据为 5270, 均方根为 1.78cm。有效数

据增加了约 1032 个点, 回波率增加约 24.35%, 均方根误差基本不变。

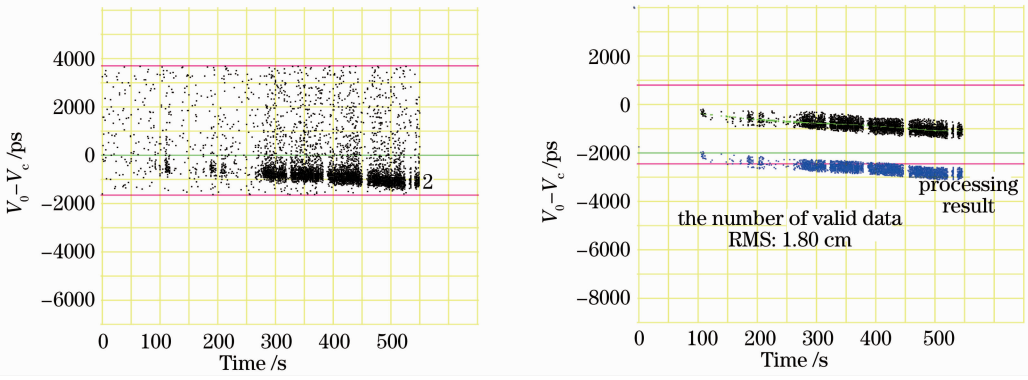


图 8 单脉冲方法处理结果

Fig. 8 Processing result of single pulse method

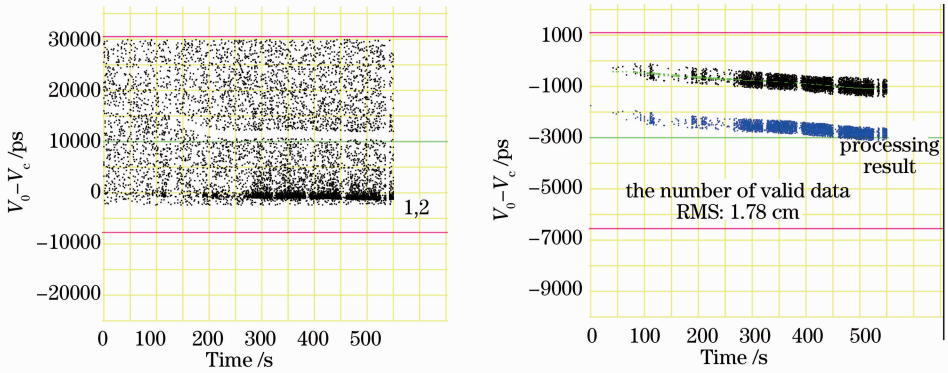


图 9 多脉冲方法处理结果

Fig. 9 Processing result of multi-pulse method

可见,对所有的多脉冲测量数据均进行处理利用后,有效测量数据量增加至少 10%。对测距回波比近地卫星少得多的 Lageos 卫星或高轨卫星,增加有效测量数据量具有重要的意义。

## 5 结 论

在卫星激光测距中存在激光器输出为多脉冲的异常现象,表现为屏幕处理界面显示多条测距回波线,其中有一条测距回波线聚集的回波数据最多,此回波线通常位于多条回波线的最中间。高重频激光测距是通过增加激光发射频率来获得比传统激光测距法多得多的有效测量数据,虽然单次测量回波率并没有得到提高,但是提高了标准点精度。如果将多脉冲测量结果中的所有回波信号都加以有效利用,那么也相当于提高了测距频率,利于提高标准点精度。本文分析和研究了高重频多脉冲异常激光测距时获得的多脉冲数据处理方法,并将该处理方法用于 1.2 m 望远镜高重频共光路激光测距系统获得的多脉冲测量数据的处理,得出按多脉冲测量数据进行处理后,在均方根值基本不变的情况下,有效数据量至少增加 10%,这对于获得的测量回波信号

比较少<sup>[9]</sup>但伴随着多脉冲异常测距现象时的数据处理十分有利,不但增加了有效测量数据,而且能够提高每个标准点的精度。

## 参 考 文 献

- Ye Shuhua, Huang Cheng. Astrodynamics [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Publishing House Publication, 2000. 114—115.  
叶叔华, 黄 斌. 天文地球动力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000. 114—115.
- Zhang Zhongping, Yang Fumin. Processing method for multi-pulse data of SLR[J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica, 1997, (18): 113—116.  
张忠平, 杨福民. 卫星激光测距中的多脉冲测距资料的处理[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1997, (18): 113—116.
- Zheng Xiangming, Li Zhulian, Fu Honglin, et al.. 1.2 m telescope satellite co-optical path kHz laser ranging system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0512002.  
郑向明, 李祝莲, 伏红林, 等. 云台 1.2 m 望远镜共光路千赫兹卫星激光测距系统[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0512002.
- Fang Qinghai, Zhao Yongli. The research progress in data processing algorithm of satellite laser ranging [J]. Laser Technology, 2008, 32(4): 417—419.  
房庆海, 赵永丽. 卫星激光测距数据处理算法的研究进展[J]. 激光技术, 2008, 32(4): 417—419.
- Zhang Zhongping. Screen preprocess method for SLR data[J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica, 1993, (14): 118—125.  
张忠萍. 人卫激光测距资料的屏幕预处理方法[J]. 中国科学院

- 上海天文台年刊, 1993, (14): 118—125.
- 6 A T Sinclair. Data screening and normal point formation[J]. Royal Greenwich Observatory, 1997.
- 7 Qin Xianping, Zhang Ruihua. Data preprocessing for satellite laser ranging[J]. Journal of PLA Institute of Surveying and mapping, 1999, (4): 35—39.
- 秦显平, 张瑞华. 卫星激光测距资料的预处理[J]. 解放军测绘研究所学报, 1999, (4): 35—39.
- 8 Sun Baosan, Zhang Zhongping, Yang Fumin. Screen processing for satellite laser ranging at high repetition rate[J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica, 2006, 27: 129—135.
- 孙宝三, 张忠萍, 杨福民. 高重频激光测距数据处理方法[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2006, 27: 129—135.
- 9 Li Yuqiang, Li Zhulian, Fu Honglin, *et al.*. Experimentation of diffuse reflection laser ranging of space debris[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0908001.
- 李语强, 李祝莲, 伏红林, 等. 空间碎片漫反射激光测距试验[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0908001.

栏目编辑:何卓铭