

基于运动补偿和抗差估计的回波光子实时检测方法

张 艳^{1,2}, 石乾乾^{1,2}, 王鲲鹏^{1,2}, 赵 鹏^{1,2}

¹北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

²空间目标测量重点实验室, 北京 100094

摘要 根据漫反射激光测距回波的误差特性, 提出了一种基于运动补偿和抗差估计的回波光子实时检测方法。通过运动补偿增加了光子积累数量, 可提供可靠的初值。在此基础上, 采用抗差估计策略剔除观测粗差, 有效实现了回波光子的实时在线检测。实验结果表明, 在低信噪比情况下, 该方法能够有效地抑制噪声影响, 并能有效解决漫反射激光测距的实时信号检测问题。

关键词 测量; 漫反射激光测距; 运动补偿; 滑动多项式; 抗差估计

中图分类号 P228.5 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0212002

Real-Time Echo-Photon Detection Method Based on Motion Compensation and Robust Estimation

Zhang Yan^{1,2}, Shi Qianqian^{1,2}, Wang Kunpeng^{1,2}, Zhao Peng^{1,2}

¹Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;

²Key Laboratory of Space Object Measurement, Beijing 100094, China

Abstract According to the error characteristics of the echo of diffuse reflection laser ranging, a real-time echo-photon detection method is proposed based on the motion compensation and robust estimation. By using motion compensation, one can increase the number of accumulation photons to provide a reliable initial value. Based on this, by adoption of robust estimation scheme to removing gross errors of observation data, one can realize the real-time online detection of echo-photon effectively. Experiment results show that, under the condition of low signal-to-noise ratio, the method can not only suppress the impact of noises, but also effectively solve the real-time signal detection problem in diffuse reflection laser ranging.

Key words measurement; diffuse reflection laser ranging; motion compensation; sliding polynomials; robust estimation

OCIS codes 120.1880; 280.3400; 350.6090

1 引 言

空间碎片的高精度测量是当前世界航天界亟待解决的难题之一。卫星激光测距(SLR)是空间目标测量中精度最高的技术之一,其测量精度已达到毫米量级。常规激光测距的对象是装有角反射器的合作式空间目标(如 Ajisai、Lageos-1 卫星等),而空间碎片作为非合作目标,不携带角反射器,只能利用漫反射激光回波进行测距^[1]。国内外很多研究机构均对空间碎片的漫反射测距技术开展了研究^[2-5]。

由于空间碎片反射面积小,漫反射的回波光子数少,探测的异常值较多,信噪比较低^[6]。常规的回波数据处理方法一般采用人工屏幕处理方法^[7-8],该方法精度高,对弱信号的适应性好,但检测效率低且依赖于判读人员经验。快速回波辨识算法^[9]具有快速有效的特点,对低轨卫星的探测的成功率很高,但对高轨卫星的探测的成功率比较低(1%以下)。在白天测距中,相关检测算法^[10]原理简单,但距离窗大小及门限阈值对探测效果影响较大。N/M 检测方法^[11]针对低信噪比信号的适应性好,但存在算法计算量较大,及无法满足实时性要求等不足。Poisson 统计滤波算法^[12]是目前月球激光测距(LLR)和 SLR 的主流方法^[13]之一,澳大利

收稿日期: 2016-09-18; 收到修改稿日期: 2016-10-17

基金项目: 原总装预研项目

作者简介: 张 艳(1975—),女,博士,副研究员,主要从事空间目标探测与识别方面的研究。E-mail: zhyan1227@sina.com

亚斯特姆洛山观测站应用 Poisson 算法实现了无人值守的全自动观测^[14], 但该算法的检测结果受 Poisson 统计滤波影响较大。贝叶斯统计分析方法^[15]已经通过对质量很差的激光测月仿真数据的恢复测试, 测试结果证明它能够很好地恢复未知参数。Herstmonceux 标准点算法^[16]是基于高精度的预报值进行处理的方法, 预报值需要经过先验的时间偏差修正和星地钟差修正, 如果没有现存的理论支持, 这些修正或预报就不太精确, 这种算法的处理过程就会出现异常。基于点云曲线辨识的卫星激光数据预处理算法^[17], 将卫星激光观测数据预处理视为有序的带噪声的空间曲线重建问题, 能够实现激光观测数据的自动处理, 可满足导航系统的需要, 但是在信号点不好的情况下, 可能无法正确地进行曲线重建且计算过程复杂。基于时间相关性的激光漫反射测距回波信号快速提取方法^[18], 采用遗传算法进行寻优搜索获得信号点, 在信噪比低的情况下具有快速提取能力, 但是漏检概率较高且计算量大、耗时长。基于随机 House 变换的有效回波提取算法^[19], 将提取有效回波问题转化为辨识图像目标曲线的问题来解决, 计算速度快, 自动化程度高, 但是在信号点分散程度高或信号点中断的情况下误检概率较高。

针对上述方法存在的问题, 本文通过分析漫反射激光测距回波光子的误差分布情况, 结合空间目标的运动规律, 提出了一种基于运动补偿和抗差估计的实时回波检测方法。通过运动补偿, 增加光子积累数量, 提供可靠的初值, 在此基础上采用抗差估计策略剔除观测粗差, 有效实现了回波光子的实时在线检测。利用云南天文台的实验数据对所提出的方法进行了验证。

2 漫反射激光测距误差分析

根据漫反射激光测距原理, 空间碎片漫反射激光测距回波光子数与激光测距系统的望远镜口径、激光发射脉冲能量以及激光发散角等因素之间有明显关系, 同时还与空间碎片的观测仰角、目标尺寸等相关^[20]。其测量误差特性复杂, 难以理论建模。以云南天文台的漫反射激光测距系统为例来进行误差特性分析。激光器能量为 3.4 J, 脉冲频率为 10 Hz, 典型的实验结果见表 1, 目标轨道为近圆轨道。从表 1 可以看出, 由于空间碎片的反射面积小, 在 127~203 s 的观测弧段内, 只有几十个有效光子。同时受探测器的热噪声和天空背景噪声产生的误触发的影响, 漫反射回波探测的异常值较多, 信噪比 R_{SN} 较低(均小于 0.1)。

表 1 云南天文台典型漫反射实验

Table 1 Typical diffuse reflection experiments in Yunnan Observatory

Target No.	Date	Perigee /km	Apogee /km	Target size /m ²	Observation period /s	Number of valid echoes	Distance /km	Signal-to-noise ratio
10517	2011/01/24	477.4	1784.0	6.4×2.0	148	73	841-1489	1/14
27387	2011/01/25	750.9	796.4	10.0×2.5	144	32	1086-1256	1/25
17590	2011/01/25	832.1	842.3	10.4×3.9	148	75	1146-1824	1/15
23769	2011/02/05	358.3	850.8	5.9×2.4	127	60	860-1233	1/10
20509	2011/02/08	948.2	1013.0	6.0×2.4	145	57	1001-1520	1/14
29713	2011/02/08	610.2	651.4	4.0×2.0	203	56	787-1533	1/28

从表 1 中选取两次实验(10517 和 17590), 将实测结果与参考轨道对应回波时间作差, 得到如图 1 所示的 O-C 残差分布图。

由图 1 可以看出, 有效的回波光子残差均具有一定的时间相关性, 而噪声则是随机分布, 因此可利用两者统计特性的差异来提取有效信号。

通过事后处理, 提取两次实验的有效光子信号进行拟合, 分别如图 2(a)、3(a)所示。由图可知, 有效数据 O-C 残差符合多项式模型, 拟合残差均方差分别为 1.67 m 和 2.92 m。

利用拟合后的曲线, 统计测量误差分布的直方图分别如图 2(b)、3(b)所示。由图可知, 在时序上, 其误差分布不完全服从正态分布, 而是接近拖尾的正态分布, 这也是用常规的标准点算法很难获得准确信号的原因。

通过上述分析可知, 漫反射测距的信噪比极低, 基本小于 0.1, 且由于异常观测值较多, 其误差分布在时序上不完全服从正态分布, 因此采用常规的最小二乘方法难以获得有效信号的估值。但进一步的分析结果表明, 有效回波光子信号具有时间相关性, 表现为 O-C 误差曲线随时间有缓变的趋势性。因此, 采用数据拟合的方式提取残差趋势项可以实现有效信号的检测。

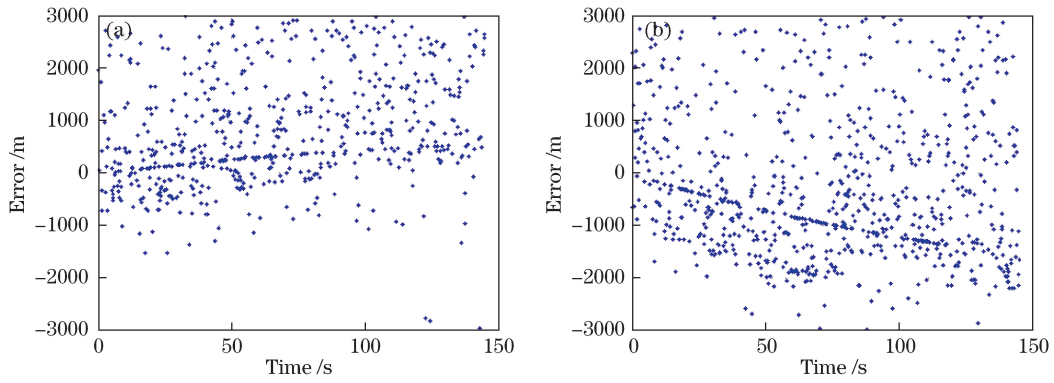


图 1 O-C 残差分布图。(a)目标 10517;(b)目标 17590

Fig. 1 O-C residual distributions. (a) Target No. 10517; (b) target No. 17590

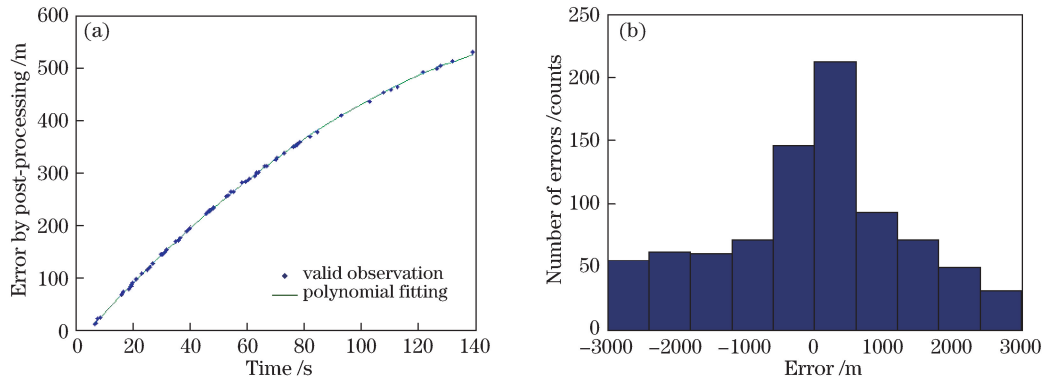


图 2 目标 10517。(a)事后数据拟合;(b)误差分布直方图

Fig. 2 Target No.10517. (a) Data fitting after post-processing; (b) histogram of error distribution

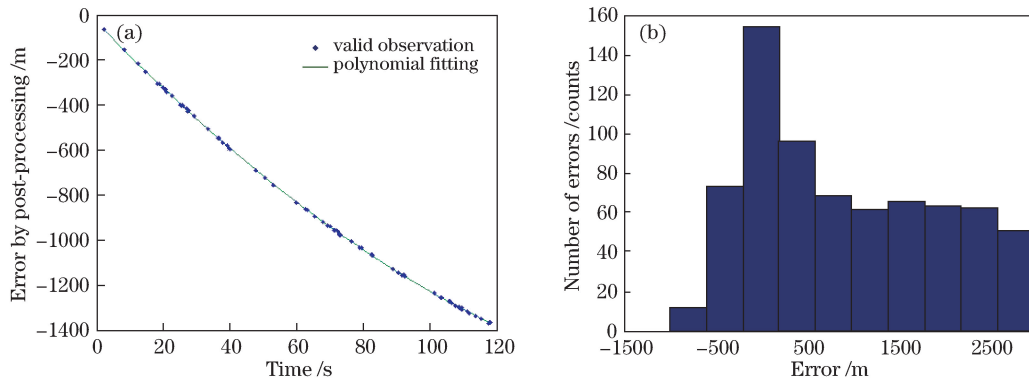


图 3 目标 17590。(a)事后数据拟合;(b)误差分布直方图

Fig. 3 Target No.17590. (a) Data fitting after post-processing; (b) histogram of error distribution

3 实时检测方法

为了能在低信噪比条件下,实现有效回波光子的检测,根据上述误差分析的结果,提出基于运动补偿积累和抗差估计的实时检测方法。首先根据目标参考轨道数据对回波信号进行压缩处理,将回波光子能量集中到同一个波门内,实现光子信号能量的有效累加,获得有效回波的初值。在此过程中,由于目标的高速运动,回波光子对应的时间会存在较大偏差,需要对回波进行运动补偿。其次,由于短时间内信号回波光子残差符合多项式特征,引入基于滑动多项式模型的抗差估计以实现回波信号的在线检测。其中基于运动补偿的回波光子能量积累和基于滑动多项式模型的抗差估计是该方法实现的关键。

3.1 基于运动补偿的回波光子能量积累初检测

3.1.1 基本原理

由于空间目标高速运动,目标与激光测距站的距离变化剧烈且呈非线性,为避免距离迁移以实现一段时间光子的能量积累,需要实施有效的运动补偿。激光测量一般基于参考轨道的引导来实现对目标的捕获,本文也基于参考轨道来实现运动补偿。

如图 4 所示,根据参考轨道数据,得到各脉冲在发射时刻 t_k 时目标相对激光测距站的径向距离 \hat{R}_k ,并转化为相应的时延 $\hat{\tau}_k = 2\hat{R}_k/c$ (c 为光速);再根据时延 $\hat{\tau}_k$ 产生回波光子采集波门,波门中心时刻对应时延 $\hat{\tau}_k$ 。实际测量中,从发射脉冲到接收回波光子的时延 τ_k 与目标轨道转化的时延 $\hat{\tau}_k$ 之间存在误差

$$\Delta\hat{\tau}_k = \tau_k - \hat{\tau}_k, \Delta\hat{\tau}_k \in (-T_G/2, T_G/2), \quad (1)$$

式中 T_G 为波门宽度,它与参考轨道的精度有关。如参考轨道采用 TLE(双行轨道根数)作轨道引导, T_G 一般取 2×10^{-5} s。

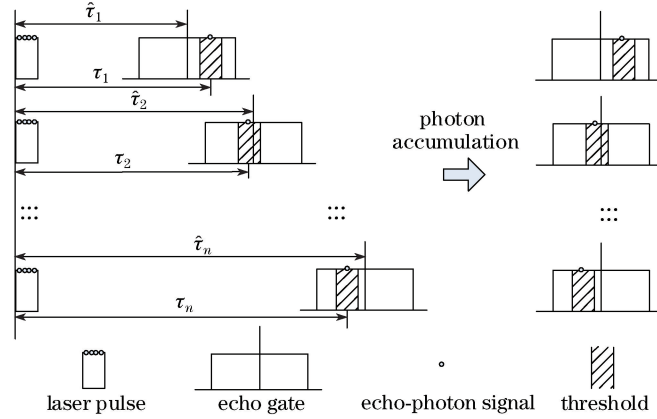


图 4 回波光子积累示意图

Fig. 4 Schematic diagram of echo-photon accumulation

取积累区间内某个回波光子信号作为基准信号(图 4 中选择第一个回波为基准),其他光子通过运动补偿与它对齐。具体过程如下。

设积累窗口内的轨道满足状态方程

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k,1}(\mathbf{X}_1) + \mathbf{W}_k, \quad (2)$$

式中 \mathbf{X}_1 和 \mathbf{X}_k 分别为 t_1 和 t_k 时刻目标的状态向量, $\Phi_{k,1}$ 为状态转移函数, \mathbf{W}_k 为状态噪声向量。设 t_k 时刻的观测模型为

$$\tau_k = h(\mathbf{X}_k) + \boldsymbol{\varepsilon}_k, \quad (3)$$

式中 τ_k 为 t_k 时刻的目标到激光测距站径向距离的观测量, $h(\mathbf{X}_k) = 2\sqrt{(\Delta X_k)^2 + (\Delta Y_k)^2 + (\Delta Z_k)^2}$, $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ 为观测量 τ_k 的随机误差; $\Delta X_k = X(t_k) - X_0$, $\Delta Y_k = Y(t_k) - Y_0$, $\Delta Z_k = Z(t_k) - Z_0$; $X(t_k)$, $Y(t_k)$, $Z(t_k)$ 为 t_k 时刻目标的位置, X_0 , Y_0 , Z_0 为激光测距站的位置。令 $\mathbf{x}_k = \mathbf{X}_k - \mathbf{X}_k^*$, 其中 \mathbf{X}_k , \mathbf{X}_k^* 分别为 t_k 时刻目标的状态向量和参考状态向量,则

$$\Delta\hat{\tau}_k = \tau_k - \hat{\tau}_k = h(\mathbf{X}_k) - h(\mathbf{X}_k^*) = \frac{\partial h}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{\mathbf{X}_k^*} \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_k = \mathbf{H}_k \Phi(t_k, t_1) \mathbf{x}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_k, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{H}_k = 2[a_1(k) \quad a_2(k) \quad a_3(k)]$, $a_1(k) = \Delta X_k/R_k$, $a_2(k) = \Delta Y_k/R_k$, $a_3(k) = \Delta Z_k/R_k$, $R_k = \sqrt{(\Delta X_k)^2 + (\Delta Y_k)^2 + (\Delta Z_k)^2}$; $\Phi(t_k, t_1)$ 为目标状态转移矩阵。

由(4)式可得

$$\Delta\hat{\tau}_1 = \mathbf{H}_1 \Phi(t_1, t_1) \mathbf{x}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \mathbf{H}_1 \mathbf{x}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_1, \quad (5)$$

忽略随机误差的影响,则 $\mathbf{x}_1 \approx \mathbf{H}_1^{-1} \Delta\hat{\tau}_1$, 从而

$$\Delta\hat{\tau}_k = \mathbf{H}_k \Phi(t_k, t_1) \mathbf{H}_1^{-1} \Delta\hat{\tau}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_k, \quad (6)$$

因此, $\mathbf{H}_k \Phi(t_k, t_1) \mathbf{H}_1^{-1}$ 就是目标到激光测距站径向距离的观测量从 t_1 时刻到 t_k 时刻的运动补偿因子。如果 t_k 时刻和 t_1 时刻为同一目标测量值, 则 t_k 时刻径向距离测量值补偿之后的值应在 t_1 时刻径向距离测量值的邻域内。

理论上, 通过这种运动补偿可将任意时间内的光子信号进行积累, M 个光子的积累可以使信噪比提高 M 倍。但在实际工作时, 综合考虑实时性和精度, M 一般可选 $2/R_{SN}$ 。对于漫反射测量, 根据上述分析, M 可取 $20 \sim 30$, 也可根据目标的 R_{SN} 自适应选取。

3.1.2 门限的确定

通过判断门限范围 δ_k 内的光子信号数量, 就可实现对上述有效信号的检测。但参考轨道的误差会对光子的能量积累产生影响。将参考轨道数据的误差分为径向速度误差、径向加速度误差和角度(方位角、俯仰角)误差。

当角度误差较大时, 目标可能不处于激光照射范围内, 这会影响目标的捕获, 但对积累误差没有影响。因此只需分析参考轨道的径向速度误差和径向加速度误差对积累的影响。

假设目标状态转移矩阵 $\Phi(t_k, t_1)$ 符合二阶运动模型, 且参考轨道数据的径向距离 \hat{R}_k 近似为匀加速变化, 则有

$$\hat{R}_k \approx \hat{R}_1 + \hat{v}_1 \cdot \Delta T_k + \hat{a}_1 \cdot (\Delta T_k)^2 / 2, \quad (7)$$

式中 \hat{v}_1, \hat{a}_1 分别为 t_1 时刻参考轨道的径向速度和径向加速度, $\Delta T_k = t_k - t_1$ 。将参考轨道上目标的径向距离测量值从 t_k 时刻积累到 t_1 时刻, 有

$$\begin{cases} \hat{R}_1 \approx \hat{R}_k - \hat{v}_1 \cdot \Delta T_k - \hat{a}_1 \cdot (\Delta T_k)^2 / 2 \\ R_1 \approx R_k - v_1 \cdot \Delta T_k - a_1 \cdot (\Delta T_k)^2 / 2 \\ \hat{R}_1 - R_1 \approx \hat{R}_k - R_k - \Delta v_1 \cdot \Delta T_k - \Delta a_1 \cdot \Delta T_k^2 / 2 \end{cases}, \quad (8)$$

式中 v_1, a_1 分别为 t_1 时刻实际轨道的径向速度和径向加速度。因此, 如果 t_k 时刻和 t_1 时刻参考轨道上目标的径向距离为同一目标测量值, 其补偿后的误差门限满足

$$\delta_k < |\Delta v_1 \cdot \Delta T_k + \Delta a_1 \cdot \Delta T_k^2 / 2|, \quad (9)$$

当回波光子积累区间较短时, 可忽略加速度的影响, 误差门限可近似为

$$\delta_k < |\Delta v_1| \Delta T_k. \quad (10)$$

3.2 基于滑动多项式抗差估计的回波检测

实际测量中激光回波光子信号的异常观测值较多, 仅依赖参考轨道的波门限制是难以实现实时检测的, 甚至极有可能产生错误结果。根据目标运动的连续性特征, 激光回波的测量时间在时间序列上具有相关性, 可以利用这种特征进行回波信号的检测。

分析表明, 在较短的时间内, O-C 残差序列可以用一次多项式表示。此时 t_k 时刻测量值残差可以表示为

$$\Delta \hat{\tau}_k = \hat{\tau}_k - \tau_k = a + bt_k = [1 \quad t_k] \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \quad (11)$$

n 个时刻方程联立并用矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{\tau}_1 \\ \Delta \hat{\tau}_2 \\ \vdots \\ \Delta \hat{\tau}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 \\ 1 & t_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & t_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \quad (12)$$

根据最小二乘法原理, 可得多项式系数的估值为

$$\mathbf{a} = (\mathbf{T}^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{Y}, \quad (13)$$

式中 $\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$, $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \Delta\hat{\tau}_1 \\ \Delta\hat{\tau}_2 \\ \vdots \\ \Delta\hat{\tau}_n \end{bmatrix}$, $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 \\ 1 & t_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & t_n \end{bmatrix}$, $\mathbf{P} = \mathbf{I}_n$ 为 n 阶单位矩阵。因此可采用拟合多项式来检测新测量回

波的正确性。

以 t_k 时刻前 m 个有效测量为例,拟合后的多项式函数为 g ,预报 t_k 时刻测量值为 $g(t_k)$,则预报误差为

$$v_k = \hat{\tau}_k - g(t_k), \quad (14)$$

当 $|v_k| < \delta_k$ (δ_k 为 t_k 时刻的预报误差门限)时,认为 t_k 时刻测量值为有效点,否则为异常值。

如果 t_k 时刻测量值为有效点,将其加入到前面 m 个有效测量值中,重新拟合的多项式函数为 g' ,求得估计残差序列为

$$v_n = \hat{\tau}_n - g'(t_n), \quad n = 1, \dots, m, k. \quad (15)$$

在此基础上,为提高实时检测的可靠性,根据前述误差分析(时间序列为拖尾的正态分布),采用抗差估计的方法对实时测量值进行二次检测。

由于每次观测都是相互独立的,因此根据等价权原理,设计能够适应淘汰区的抗差权为^[21]

$$\psi(v_k) = \begin{cases} \bar{v}_k, & |\bar{v}_k| \leq k_0 \\ k_0 \text{sign}(\bar{v}_k), & k_0 < |\bar{v}_k| \leq k_1 \\ 0, & |\bar{v}_k| > k_1 \end{cases} \quad (16)$$

$$\omega(v_k) = \begin{cases} 1, & |\bar{v}_k| \leq k_0 \\ k_0/|\bar{v}_k|, & k_0 < |\bar{v}_k| \leq k_1 \\ 0, & |\bar{v}_k| > k_1 \end{cases} \quad (17)$$

式中 v_k 为 t_k 时刻测量值的残差; $\psi(v_k)$ 为与残差 v_k 相关的单调非降函数; $\omega(v_k)$ 为抗差权因子,且

$\omega(v_k) = \psi(v_k)/\bar{v}_k$, $\bar{v}_k = v_k/\sigma$, 均方差 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_k^2}$, N 为观测次数; k_0 可取 1.5~3.0, k_1 可取 2.5~5.0。采用最大似然估计得

$$\mathbf{a} = (\mathbf{T}^T \bar{\mathbf{P}}^{-1} \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^T \bar{\mathbf{P}}^{-1} \mathbf{Y}, \quad (18)$$

式中 $\bar{\mathbf{P}} = \text{diag}[\omega(v_1), \omega(v_2), \dots, \omega(v_N)]$ 。剔除 p 个 $\omega(v_k) = 0$ 的测元,重新估计其方差为

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N-p} \sum_{k=1}^{N-p} v_k^2}, \quad (19)$$

该均方差可用于后续窗口的检测。

3.3 实现过程

回波光子的实时检测的具体步骤如下:

1) 通过在能量积累窗口 M 内采用运动补偿积累找出 q 个有效回波光子的信息,将窗口向前滑动,逐个检测,获得 m 个有效回波的 O-C 测量值,一般 $q < m$;

2) 利用 m 个有效回波的 O-C 测量值拟合出多项式函数 g ,并利用多项式函数 g 预报到当前时刻 t_k ,通过与测量值比较获得 t_k 时刻残差 v_k ,当 $|v_k| < \delta_k$ 时,认为 t_k 时刻测量值为有效点,否则为异常值;

3) 将粗检测为有效点的 t_k 时刻测量值加入到前面 m 个有效测量值中,重新拟合多项式函数 g ,求得估计残差序列 v_n ,再利用抗差估计进行二次检测,计算 t_k 时刻拟合残差 v_k ,当 $|v_k| < \delta_k$ 时,认为 t_k 时刻测量值为有效点,否则为异常值。

当确认 t_k 时刻测量值为有效点后,在有效序列 $[\Delta\hat{\tau}_1, \dots, \Delta\hat{\tau}_m]$ 中增加 t_k 时刻的有效序列 $\Delta\hat{\tau}_{m+1}$,并去掉最旧的有效数据 $\Delta\hat{\tau}_1$ 。采用滑动方法重复步骤 2) 和 3),完成整个序列的检测。

可以看出,处理方法的计算量取决于能量积累窗口 M 和多项式拟合窗口 m 的选择。1) 能量积累窗口 M : 积累窗口 M 越大,包含的有效回波光子的信息就越多,对信噪比和有效光子选择可靠性的提高也越明

显;但 M 过大,会增加计算量,同时使运动补偿的门限过大,会导致错误检测结果的出现。2)多项式拟合窗口 m :拟合窗口 m 越宽,对残差的约束就越强,对随机误差的抑制效果就越好;但 m 过大,计算量会增加,同时模型的截断误差也会变大。上述两个参数在实际计算过程中可根据不同卫星测量的先验信息来确定。

4 实测数据验证

为验证算法的精度和可靠性,以云南天文台漫反射激光测距系统为例,选取了一些体积较大的火箭残骸进行实际测量,激光器能量为 3.4 J,脉冲频率为 10 Hz,分别使用两种方法进行检测。

方法 1: 能量积累检测。全弧段用该方法进行实时检测。

方法 2: 能量积累检测结合滑动多项式抗差检测。能量积累方法用于初值的确定,采用滑动多项式抗差估计方法进行实时检测。

约束条件:以当天的 TLE 作为参考轨道的轨道根数。能量积累窗口 $M=20$ (补偿门限内的光子数大于 2),多项式拟合窗口 $m=9$ 。

共处理了三次实测数据,误差曲线如图 5~7 所示,处理结果见表 2。2011 年 1 月 24 日进行了第一次实验,目标 10517 是尺寸为 $6.4\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 的残骸,在 148 s 的观测时间内,共观测到 1004 个测量数据,其中有效点 73 个,信噪比为 1/14。2011 年 1 月 25 日进行了第二次实验,目标 17590 是尺寸为 $10.4\text{ m}\times 3.9\text{ m}$ 的残骸,在 148 s 的观测时间内,共观测到 1141 个测量数据,其中有效点 75 个,信噪比为 1/15。2011 年 2 月 5 日进行了第三次实验,目标 23769 是尺寸为 $5.9\text{ m}\times 2.4\text{ m}$ 的残骸,在 127 s 的观测时间内,共观测到 547 个测量数据,其中有效点 60 个,信噪比近似为 1/10。

结合图 5~7 和表 2 可知,三组实验中,测量信噪比在 1/15 以内的情况下,采用方法 2 的全时段检测效率提高到 90%以上,信噪比比原始测量值提高 30 倍以上,检测性能明显优于方法 1,具体分析如下:

1) 由图 5(b)可以看出,相对时间 80 s 后,有效测量值之间的时间间距均大于 2 s;由图 5(c)可以看出,方法 1 在能量积累窗口($M=20$)内不满足光子数大于 2 的要求,无法检测出有效测量值,因此全时段方法 1 的检测效率仅为 69.9%(51/73),信噪比为 1.59。方法 2 利用了方法 1 获得的初值和有效测量值的时序相关性,由图 5(d)可以看出,通过滑动多项式迭代抗差估计进行预报检测,明显提高了时间间隔稀疏段的检测效率,降低了错误检测率,全时段检测效率提高到 97.2%(71/73),信噪比提高到 4.43。但相对

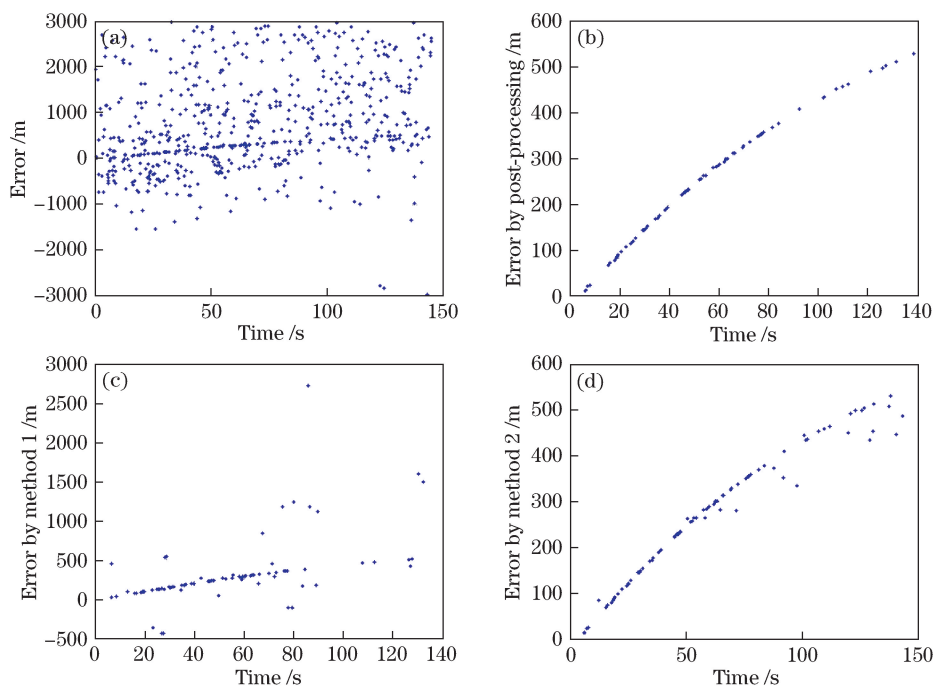


图 5 目标 10517 处理结果。(a)测量值;(b)事后处理结果;(c)方法 1;(d)方法 2

Fig. 5 Processing results of target No. 10517. (a) Measurement value; (b) post-processing result; (c) method 1; (d) method 2

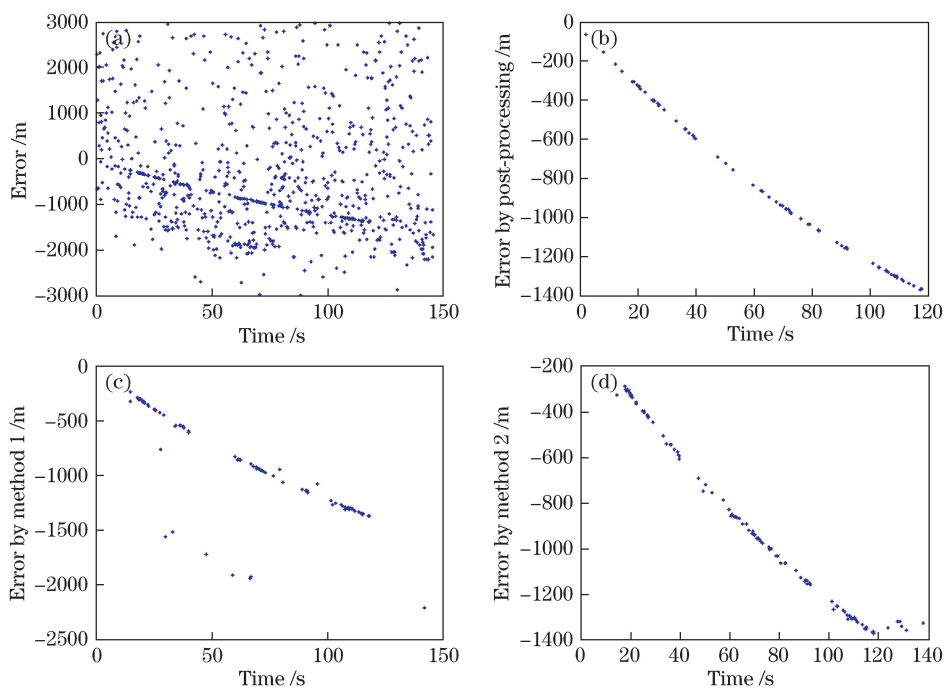


图 6 目标 17590 的处理结果。(a)测量值;(b)事后处理结果;(c)方法 1;(d)方法 2

Fig. 6 Processing results of target No. 17590. (a) Measurement value; (b) post-processing result; (c) method 1; (d) method 2

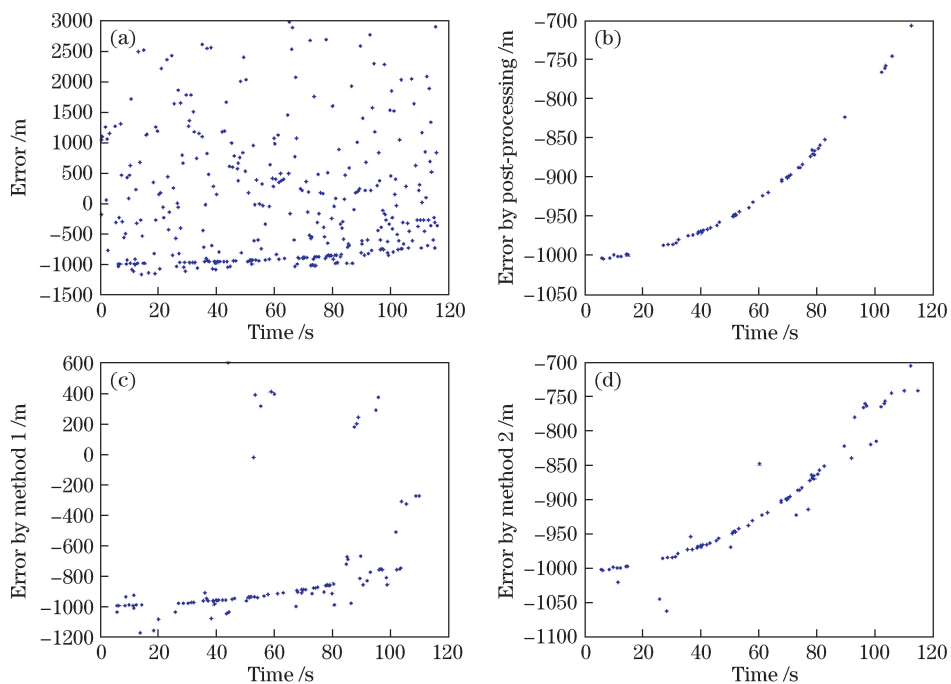


图 7 目标 23769 的处理结果。(a)测量值;(b)事后处理结果;(c)方法 1;(d)方法 2

Fig. 7 Processing results of target No. 23769. (a) Measurement value; (b) post-processing result; (c) method 1; (d) method 2

时间 80 s 后,由于有效测量的时间间隔过于稀疏(最大间隔 9.2 s),预报模型误差的影响导致该部分的错误检测明显增多。

2) 由图 6(b)、(c)可以看出,在相对时间 40~60 s 内仅有三个有效测量值,与图 5(c)所示结果类似,方法 1 在时间间隔稀疏的情况下,无法检测出有效测量值,全时段检测效率为 68%(51/75),信噪比为 1.34。由图 6(d)可以看出,方法 2 的检测效率得到明显提高,但在 114.4 s 后,长时段预报模型误差导致了错误的检测,全时段检测效率为 92%(69/75),信噪比为 2.38。

3) 由图 7(b)可以看出,在相对时间 15.05~27.22 s 内,没有有效测量值。在相对时间 82.95~102.5 s 内,仅有一个有效测量值。由图 7(c)、(d)可以看出,方法 1 和方法 2 在时间间隔稀疏的情况下均检测出错误的测量值,但方法 2 的错误检测率明显低于方法 1 的,尤其是在 82.95 s 后。方法 1 全时段检测效率为 86.7%(52/60),信噪比为 1.00;方法 2 的全时段检测效率为 95%(57/60),信噪比为 3.16。

综上所述,方法 1 利用了目标的轨道特性,可以有效提高实时检测的正确性,但受参考轨道误差和观测误差的影响,积累门限难以适用于整个测量过程,当回波光光子稀疏时(有效测量值之间的时间间距大于 2 s)就会出现漏检现象,错误检测率也会大大增加。方法 2 在方法 1 的基础上,利用了有效测量值的时序相关性,进一步提高了检测效率,通过抗差估计降低了错误检测率,最终使得方法 2 在全时段的检测效率提高到 90%以上,信噪比比原始测量值的信噪比提高 30 倍以上。当有效回波光光子稀疏时,受多项式预报门限 $|v_k| < \delta_k$ 的影响,错误检测率会有所增加。

表 2 不同检测方法的统计结果

Table 2 Statistical results for different detection methods

Targets No.	Date	R_{SN}	Number of valid photons	Method 1		Method 2	
				Total number/number of valid photons	R_{SN}	Total number/number of valid photons	R_{SN}
10517	2011/01/24	1/14	73	83/51	1.59	87/71	4.43
17590	2011/01/25	1/15	75	89/51	1.34	98/69	2.38
23769	2011/02/05	1/10	60	104/52	1.00	75/57	3.16

5 结 论

提出了基于回波光光子能量积累和抗差估计的实时检测方法,利用目标的轨道特性通过运动补偿实现了回波光光子能量积累的初检测;基于有效测量值误差符合多项式模型的特性,引入滑动多项式的迭代抗差估计,提高了实时有效回波检测效率,降低了错误检测率。利用云南天文台多次实测数据进行了实验,实时检测结果与事后结果对比表明:在有效测量值连续的情况下(时间间距小于 2 s),利用该方法基本可以实现准确的实时检测;当有效测量值稀疏时,错误检测率有所增加;当测量信噪比在 1/15 以内时,实时检测效率均优于 90%,信噪比比原始测量值的信噪比提高 30 倍以上。

参 考 文 献

- [1] Liu Jun, Xiong Yaoheng. Research on diffuse satellite laser ranging[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2008, 5(3): 253-258.
刘 军, 熊耀恒. 漫反射卫星激光测距的地面模拟研究[J]. *天文研究与技术*, 2008, 5(3): 253-258.
- [2] Greene B. Laser tracking of space debris[C]. *Proceedings of 13th International Workshop on Laser Ranging*, 2002: 1-7.
- [3] 陈苗海. 奥地利的激光卫星观察站[J]. *激光与红外*, 1984(12): 56-58.
- [4] 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.
- [5] Yang F M, Zhang Z P, Chen J P, *et al.* Preliminary results of laser ranging to un-cooperative targets at Shanghai SLR Station[C]. *Proceedings of 16th International Work Shop on Laser Ranging Instrumentation*, 2008: 695-699.
- [6] Zhai Dongsheng, Fu Honglin, He Shaohui, *et al.* Study on the characteristic of laser ranging based on diffuse reflection[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2009, 6(1): 13-19.
翟东升, 伏红林, 何少辉, 等. 漫反射激光测距特性研究[J]. *天文研究与技术*, 2009, 6(1): 13-19.
- [7] Gurtner W, Pop E, Utzinger J. Improvements in the automation of the Zimmerwald SLR Station[C]. *Proceedings of the 13th International Workshop on Laser Ranging*, 2002: 1-9.
- [8] Zhang Zhongping. Screen preprocessing method for SLR data[J]. *Annals of Shanghai Observation Academia Sinica*, 1993, 16(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, 16(14): 118-125.
- [9] Kirchner G, Koidl F. Graz kHz SLR systems: Design, experiences and results[C]. *Proceedings of 14th International*

- Workshop on Laser Ranging, 2004: 2-5.
- [10] Degnan J J. Optimization of the correlation range receiver parameters in SLR2000[C]. Proceeding of the 13th International Laser Ranging Workshop, 2002: 3-7.
- [11] McGarry J, Cheek J, Conklin B, *et al.* SLR2000 automated system control software[C]. Proceedings of 11th International Workshop on Laser Ranging, 1998: 5-8.
- [12] Ricklefs R L, Shelus P J. Poisson filtering of laser ranging data[C]. Proceedings of 8th International Workshop on Laser Ranging, 1992: 26-32.
- [13] Feng Hesheng, Xiong Yaoheng, Jiang Chongguo, *et al.* The height of detection technique for single photo lunar laser ranging[J]. Acta Photonica Sinica, 2000, 29(Z1): 29-33.
冯和生, 熊耀恒, 姜崇国, 等. 单光子探测技术的高峰—月球激光测距[J]. 光子学报, 2000, 29(Z1): 29-33.
- [14] Luck J, Moore C. Autonomous laser ranging results from mount Stromlo[C]. Proceedings of 12th International Workshop on Laser Ranging, 2000: 2-12.
- [15] WillJam H J, Judit G R. Bayesian analysis of lunar laser ranging data[M]//Babu G J, Feigelson E D. Statistical challenges in modern astronomy II. New York: Springer, 1997: 19-65.
- [16] John H S. Enhancements toward robust normal point generation[C]. Proceedings of 11th International Workshop on Laser Ranging, 1998: 1-12.
- [17] Liu Yanyu, Wu Xiaoping, Gao Hao, *et al.* Data pre-processing algorithm of satellite laser ranging based on curve recognition from points cloud[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(1): 105-108.
刘雁雨, 吴晓平, 高 皓, 等. 基于点云曲线辨识的卫星激光数据预处理算法[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(1): 105-108.
- [18] Zhao Peng, Zhang Yan, Zhang Xiaoya, *et al.* Echo online extraction for diffuse reflection laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1028002.
赵 鹏, 张 艳, 张小亚, 等. 激光漫反射测距回波信号在线提取方法[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1028002.
- [19] Liu Tong, Chen Hao, Shen Ming, *et al.* Effective echo extraction for space debris laser ranging using randomized Hough transform[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0408002.
刘 通, 陈 浩, 沈 鸣, 等. 随机 Hough 变换提取空间碎片激光测距有效回波[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0408002.
- [20] Wu Zhibo, Zhang Zhongping, Yang Fumin, *et al.* Statistical analysis of successful detection probability of the return satellite laser ranging[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(3): 28-29.
吴志波, 张忠萍, 杨福民, 等. 卫星激光测距回波探测成功概率统计分析[J]. 测绘科学, 2006, 31(3): 28-29.
- [21] Yang Yuanxi, Wen Yuanlan. Synthetic self-adaptive robust filter for precise satellite orbit determination[J]. Science in China (Series D), 2003, 33(11): 1112-1119.
杨元喜, 文援兰. 卫星精密轨道综合自适应抗差滤波技术[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(11): 1112-1119.