

引用格式: LI Zhifei, TANG Rufeng, ZHAI Dongsheng, et al. Analysis and Research of Walk Error Based on High-precision Satellite Laser Ranging Data[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(5):0552222

李知非, 汤儒峰, 翟东升, 等. 基于高精度卫星激光测距数据的漂移误差分析与研究[J]. 光子学报, 2023, 52(5):0552222

基于高精度卫星激光测距数据的漂移误差 分析与研究

李知非^{1,2}, 汤儒峰¹, 翟东升^{1,3,4}, 李祝莲^{1,3,4}, 伏红林^{1,4},

黄凯⁵, 曹进^{1,2,5}, 李语强^{1,3,4}

(1 中国科学院云南天文台, 昆明 650216)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 南京 210023)

(4 云南省太阳物理与空间目标监测重点实验室, 昆明 650216)

(5 乐山师范学院 数理学院, 乐山 614000)

摘要: 为了降低卫星激光测距中存在的漂移误差, 基于卫星激光测距所获得的实测数据推算了卫星回波光子数, 结合仿真分析了漂移误差产生的原因与计算方法, 将计算得到的漂移误差补偿到测距结果中。选择特定目标持续五年的卫星激光测距数据, 用所提方法对测量距离进行修正, 修正值为 10 ps 量级~100 ps 量级, 最高可在测距数据中补偿掉 770 ps 的漂移误差。结果表明, 使用该方法可以有效降低每圈数据的数据波动, 减小了数据中由于能量变化导致的漂移误差, 提高了数据质量。

关键词: 激光测距; 单光子探测; 漂移误差; 数据处理; 测距精度

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235205.0552222

0 引言

卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)是通过精确测定激光脉冲从地面观测站发送到卫星的往返时间间隔来测量观测站与卫星距离的技术, 其测距精度可达厘米级。SLR 主要应用于精密确定卫星轨道、精确测量地球自转参数、精密建立地球参考系等^[1]。这些科学应用也推动着 SLR 技术向获得高质量、高精度的数据发展。

目前, 国内外大多数激光测距站采用的探测器是单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD)^[2-5]。SPAD 量子效率高, 时间响应快速, 且灵敏度高, 可以探测到最少为单光子量级的激光脉冲回波^[1], 这对于回波微弱但又需要获得高精度数据的 SLR 来说十分合适, 所以在 SLR 系统中得到了广泛的应用。但由于 SPAD 的探测特性, 其在工作时会在测距结果中引入漂移误差(Walk Error)^[6], 该误差会对激光测距的精度产生影响。针对漂移误差, 国内外科研人员已经做了诸多研究。2010 年, OHMS 等对基于 SPAD 的激光雷达做了探测概率模型描述, 并对基于 SPAD 的激光雷达测量结果中的漂移误差进行分析与改正^[7]。2013 年, 徐璐等针对基于 SPAD 的激光雷达系统提出了一种新的回波信号处理方法来抑制漂移误差^[8]。2015 年, OTSUBOT 等对于激光测距不同回波光子数对质心修正的影响做了统计, 其中也包含了对漂移误差抑制方法的讨论^[9]。2018 年, 黄科等利用 SPAD 的探测概率模型计算漂移误差, 并对激光测距结果进行了修正^[10]。

目前国内外的研究主要针对基于 SPAD 探测器的激光雷达, 从探测器的探测模型出发对漂移误差进行

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 12003065, 12033009, 12293034), 云南省科技厅科技计划(No. 202101AU070115), 云南省创新团队(No. 202005AE160056)

第一作者: 李知非, lizhifei@ynao.ac.cn

通讯作者: 汤儒峰, tangrf@ynao.ac.cn

收稿日期: 2023-01-21; **录用日期:** 2023-02-20

<http://www.photon.ac.cn>

分析与研究,但对于卫星激光测距领域的漂移误差分析较少,对于实际测距数据在漂移误差分析与研究中的应用也较少,且目前结合实测数据对漂移误差的研究较少,缺乏针对性。在卫星激光测距精度向毫米级甚至亚毫米级进军的今天,这个问题需要被考虑和讨论。对于实际测距数据进行针对性分析,可以更准确地减小测距数据中的漂移误差,从而进一步提高测距数据的质量。本文将对卫星激光实际测距数据的分析加入到漂移误差的补偿过程中,通过实际测距数据与仿真模型相结合,有效减小卫星激光测距数据中的漂移误差,从而提高数据质量,提高测距精度。

1 理论分析

1.1 漂移误差产生的原因

在卫星激光测距测量处在某一特定位置的目标时,由于人为因素或者环境因素,回波能量会产生波动,测量数据所对应的距离值分布也会随之波动,这些波动会导致测量距离出现误差,即漂移误差。漂移误差产生的根本原因在于回波能量的波动,所以首先推导出由实际测距数据计算回波能量,即回波光子的方法。

1.1.1 平均回波光子的计算方法

卫星激光测距数据接收端常用的探测器 SPAD 无法直接测量到平均回波光子的数量,但是其探测概率计算公式中包含平均回波光子的数量,所以可以通过统计实际测距数据结果得到探测概率,再由探测概率反推平均回波光子的数量,进一步可以计算得到漂移误差。对于 SPAD 探测器来说,当平均回波光子的数量为 n_0 时,探测器探测到 n 个光电子的概率为^[11]

$$P(n, n_0) = \frac{n_0^n}{n!} \cdot e^{-n_0} \quad (1)$$

由于对 SPAD 来说,当光电子的数量不为 0 时即为被触发状态,所以探测器被触发的概率即为 $n \geq 1$ 的概率,而探测器不被触发的概率即为 $n = 0$ 的概率。设信号到来前噪声回波光子的数量为 n_{n1} ,那么探测器被噪声触发的概率 P_{fa} (噪声触发概率)为

$$P_{fa} = 1 - P(0, n_{n1}) = 1 - e^{-n_{n1}} \quad (2)$$

设在回波持续时间内,信号回波光子的数量为 n_s ,噪声回波光子的数量为 n_{n2} (n_s 远大于 n_{n2}),那么探测器在该段时间内被触发的概率 P_s (信号触发概率)为

$$P_s = 1 - P(0, n_s + n_{n2}) = 1 - e^{-(n_s + n_{n2})} \quad (3)$$

因为在一个距离门时间内,SPAD 只能被触发一次,故信号探测概率 P_e 应为

$$P_e = (1 - P_{fa}) P_s \quad (4)$$

所以,对实测数据进行统计,得到信号到来前的噪声触发概率为 P_{fa} ,信号探测概率为 P_e 时,可反推信号回波光子的数量 n_s 为

$$n_s = -\ln\left(1 - \frac{P_e}{1 - P_{fa}}\right) - n_{n2} \quad (5)$$

同理,噪声回波光子的数量 n_{n1} 为

$$n_{n1} = -\ln(1 - P_{fa}) \quad (6)$$

因为噪声进入到探测器在时间上为均匀分布,所以,若第一段时间长度为 T_n ,第二段时间长度为 T_s ,则第二段时间的噪声回波光子的数量 n_{n2} 为

$$n_{n2} = \frac{n_{n1}}{T_n} \cdot T_s \quad (7)$$

由以上分析可知,对卫星激光测距结果进行统计,就可以反推出平均回波光子的数量,进一步可以通过仿真计算对应的漂移误差,修正误差项,进而提高卫星激光测距的数据质量和精度。

1.1.2 仿真不同回波光子的探测概率分布情况

将式(1)进一步写为^[12]

$$P(m; t_i, t_k) = \frac{1}{m!} [M(t_i, t_k)]^m \exp[-(M(t_i, t_k))] \quad (8)$$

式中, $P(m; t_i, t_k)$ 表示在 t_i 到 t_k 这段时间内探测器触发了 m 个光电子的概率, m 表示在这段时间内触发光电子

的数量, $M(t_i, t_k)$ 表示在 t_i 到 t_k 这段时间内进入到探测器内的光子数量。那么在一个距离门的时间内,如果探测器在第 j 个时隙被触发,那就要求在前 $j-1$ 个时隙内不被触发。故探测器在第 j 个时隙被触发的概率为

$$P_j = \left[\prod_{i=1}^{j-1} P(m=0; i) \right] P(m \geq 1; j) = \exp\left(-\sum_{i=1}^{j-1} M_i\right) [1 - \exp(-M_j)] \quad (9)$$

这样可以计算出在一个距离门事件内,探测器在每个时隙的触发概率,从而得到探测概率曲线;改变平均回波光子数量,就可以得到不同平均回波光子数对应的探测概率曲线。由1.1.1节的计算方法可得,卫星激光测距的平均回波光子数为0~10个,则仿真得到该范围内不同平均回波光子数的探测概率分布情况如图1所示。

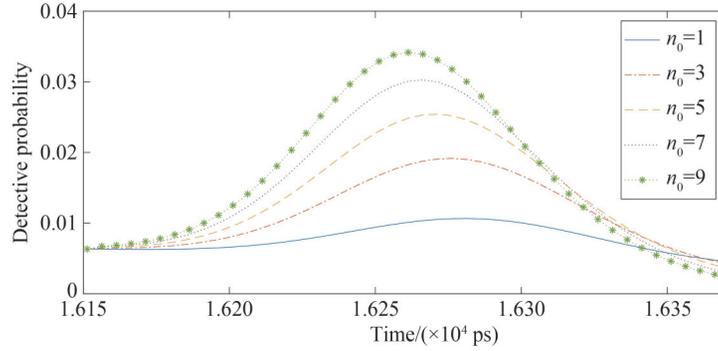


图1 不同回波光子数对应的探测概率分布
Fig.1 Detection probability distribution of different echo photon numbers

由图1可知,当回波光子数增加时,探测概率的峰值前移,意味着测量数据分布中,更近的位置将会有更多的探测点,导致卫星激光测距的解算距离更近。

1.2 漂移误差的仿真计算方法

当对接收到的信号进行分析、解算距离时,所依赖的正是基于探测概率所得到的探测情况。由探测概率解算激光飞行距离 R_c 的计算公式为

$$R_c = \frac{\int_0^T p(t) \cdot r(t) dt}{\int_0^T p(t) dt} \quad (10)$$

式中, $0 \sim T$ 为信号回波持续的时间段长度, $p(t)$ 为该时间段内信号的探测概率, $r(t)$ 为该时间段内每一个探测概率所对应的距离值。用此式(10)计算出加权平均值作为探测概率解算距离值。设目标实际距离值为 R ,则漂移误差 R_w 的计算公式为

$$R_w = R_c - 2R \quad (11)$$

因卫星激光测距的平均回波光子数为单光子量级,故对0.1~10个回波光子进行仿真计算,解算得到的激光飞行距离如图2所示,漂移误差如图3所示。

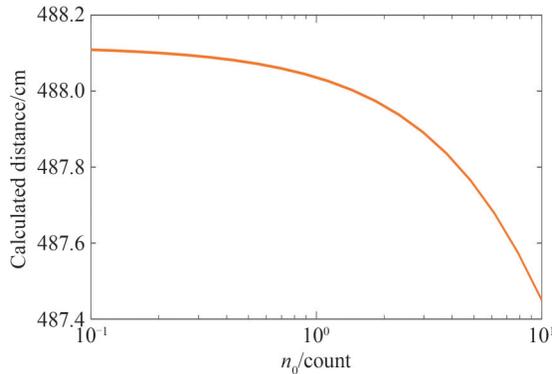


图2 解算得到的激光飞行距离与平均回波光子数的关系
Fig.2 Relationship between calculated distance and average echo photon number

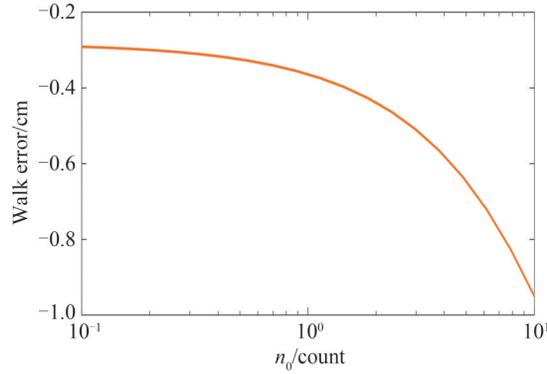


图3 漂移误差与平均回波光子数的关系

Fig.3 Relationship between walk error and average echo photon number

1.3 常规测距系统中系统时延标校过程中的漂移误差分析

卫星激光测距过程通常会采用地靶测量的方法标校系统延时^[13]。在进行地靶测量时,往往会人为衰减激光能量,这是为了将地靶回波信号能量大小尽可能与卫星回波信号能量大小相匹配,从而减少两者的漂移误差差值。但由于对激光能量无法做到精细控制,所以漂移误差在激光测距中仍然存在。由激光雷达方程估算测量 LAGEOS 卫星和地靶时的回波光子数^[14]为

$$N_r = \frac{E_0 N T_e A_m \rho A_r T_r \eta T_a^2}{\Omega \pi \left(\frac{\theta_e}{2} R + \frac{D}{2} \right)^2 R^2} \quad (12)$$

式中, N_r 为脉冲平均回波光子数, E_0 为每一束激光脉冲的能量, N 为每焦耳能量激光包含的光子数, T_e 为发射系统光路的透过率, A_m 为目标的横截面积, ρ 为目标的反射率, A_r 为接收望远镜的有效接收面积, T_r 为接收系统的光学效率, η 为探测器的量子效率, T_a 为单程大气透过率, Ω 为激光反射发散角, θ_e 为激光出射发散角, D 为激光发射的光束的直径。按照表 1 的参数, 计算测量 LAGEOS 卫星和地靶时的回波光子数, 再将计算结果输入到探测概率公式(9)和漂移误差计算公式(11)中, 计算漂移误差情况, 结果如图 4 所示。可知, 由

表 1 53 cm 双筒激光测距系统参数

Table 1 53 cm binocular laser ranging system parameters

Parameters	Value
Pulse width/ps	100
Pulse energy/(mJ·pulse ⁻¹)	1
Laser divergence angle/(°)	5
Optical efficiency of transmitting system	0.62
Effective area of receiving telescope/m ²	0.18
Optical efficiency of receiving system	0.32
Quantum efficiency of detector	0.2
Beam diameter of laser emission/m	0.1
Ground target distance/m	2.442

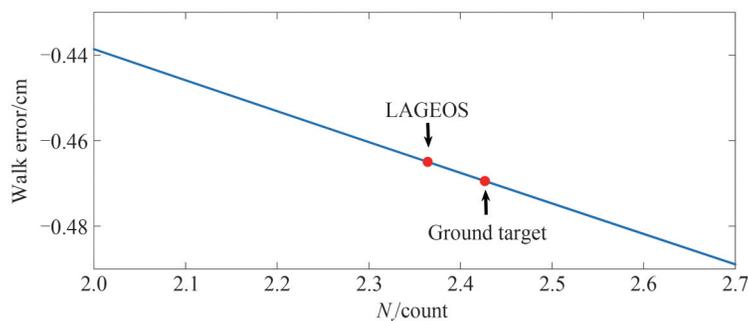


图 4 LAGEOS 卫星和地靶的回波光子数差导致的漂移误差差值示意图

Fig.4 The difference of walk error caused by the difference of echo photon number between LAGEOS satellite and ground target

于两者的回波光子数不同,所以漂移误差有区别,在这种情况下,如果直接使用地靶测量结果去修正卫星测量结果,势必会引起误差,使测距数据质量下降。

2 卫星激光测距实测数据结合理论模型的漂移误差补偿方法

基于理论分析提出一种卫星激光测距中由实际测距数据结合理论模型的漂移误差补偿方法。

2.1 地靶测量数据处理

首先,对地靶测量数据进行信号识别^[15],识别结果如图5所示。再结合标称值计算地靶系统延迟;统计信号光子数与信号到来前的噪声光子数,结合测量时间计算噪声触发概率与信号探测概率,进而计算得到信号触发概率,由概率计算出地靶平均回波光子数以及测量地靶对应的漂移误差。设由地靶测量数据的识别结果计算得到系统延迟为 Δ ,进而得到的地靶漂移误差为 $R_{\text{walk_error}}(n_{\text{tb}})$ 。

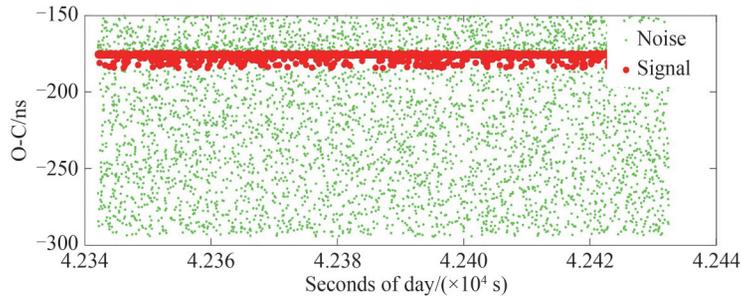


图5 地靶信号识别结果

Fig.5 Identified data of ground target

2.2 卫星测量数据处理

其次,对卫星测量数据进行处理。将计算得到的系统误差加入到卫星测距数据中,对卫星测距数据进行信号识别,识别结果如图6所示。由识别结果计算卫星测量距离;统计信号光子数与信号到来前的噪声光子数,结合测量时间计算噪声触发概率与信号探测概率,进而计算得到信号触发概率,由概率计算出卫星平均回波光子数以及该测量时段对应的漂移误差。设由卫星测量数据计算所得的卫星测量距离为 R ,卫星漂移误差为 $R_{\text{walk_error}}(n_{\text{sat}})$ 。

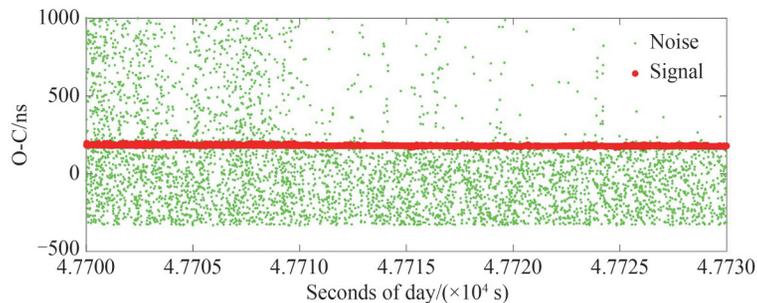


图6 卫星信号识别结果

Fig.6 Identified data of satellite

2.3 漂移误差补偿

最后,将计算得到的地靶漂移误差和卫星漂移误差加入卫星信号识别后解算的卫星测量距离结果中进行漂移误差补偿,得到修正后的距离结果。修正结果为

$$R_{\text{fixed}} = R - [\Delta - R_{\text{walk_error}}(n_{\text{tb}}) + R_{\text{walk_error}}(n_{\text{sat}})]$$

3 回波时变下卫星激光测距漂移误差的补偿

3.1 回波时变下卫星激光测距漂移误差补偿方法

在卫星激光测距的每一圈测距数据中,也存在着回波能量随时间波动的情况,所以对每一圈数据,将其

中的信号划分为 10 s 一段的片段进行光子数统计以及漂移误差的计算和补偿工作;在做该数据分析时,由于卫星和测站之间的距离是在时刻变化的,所以不能直接对计算出来的标准点数据(Normal Point, NP)进行计算判断,而是将标准点数据去势后进行计算。对于一圈数据所有划分的片段,计算其去势标准点数据修正前和修正后的均方根(Root Mean Square, RMS)来说明数据质量的提高。

3.2 方法应用实例

对 2019 年 1 月 18 日 KOMPSAT-5 卫星的测距原始数据进行分段计算,并补偿测距数据中的漂移误差,得到结果如图 7 所示。图 7 中每一个数据点均为去趋势后的标准点数据,可以看到经过漂移误差补偿后,整个数据的 RMS 降低,说明数据离散程度更低,数据波动更小。这表明数据中因漂移误差导致的距离值波动经过处理后变小,数据质量有所提高。

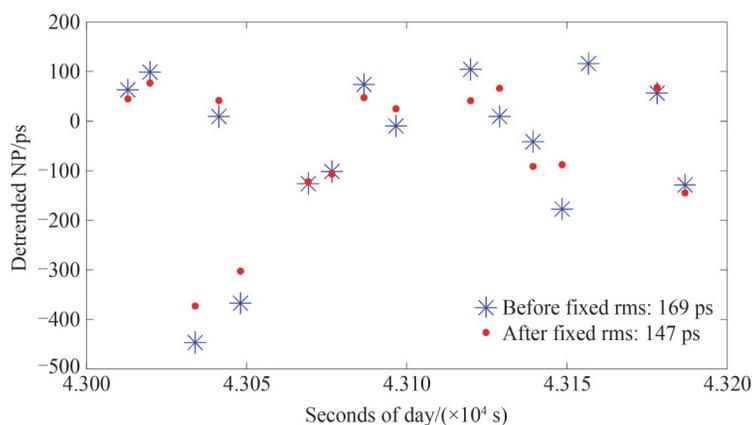
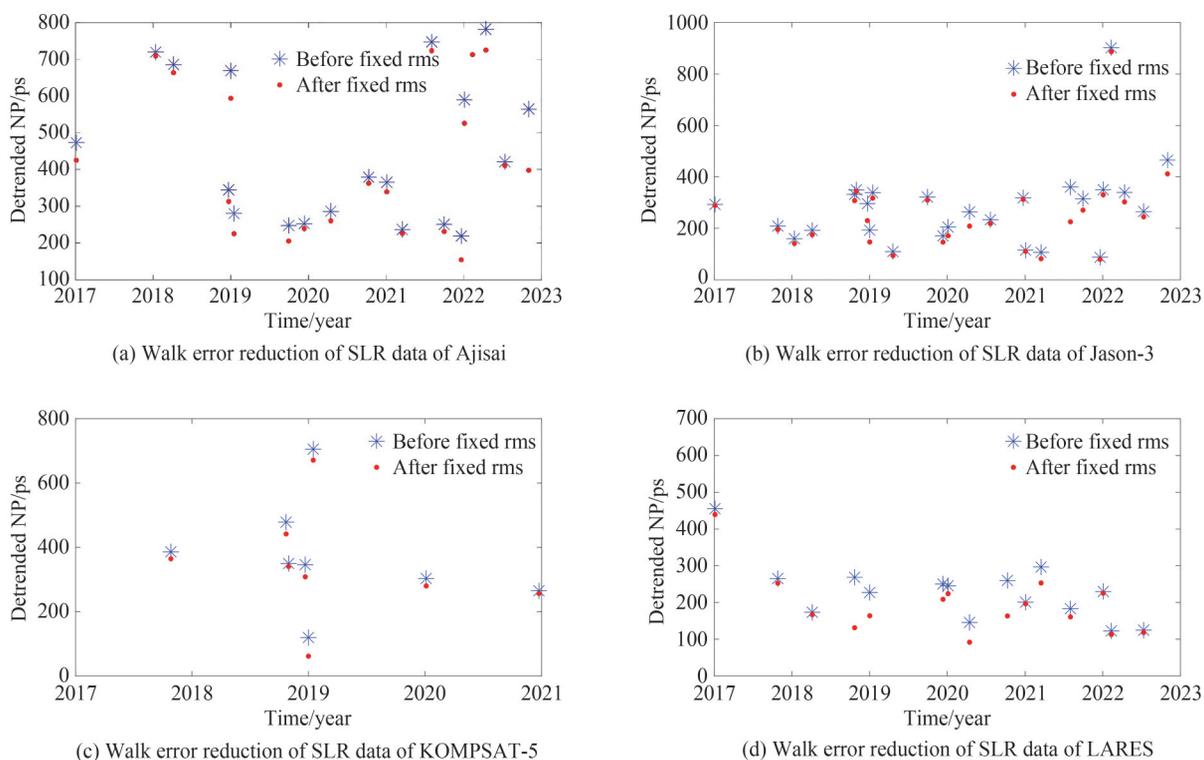


图 7 减小漂移误差对卫星激光测距数据的影响

Fig.7 SLR data with the influence of walk error reduction

3.3 批量数据处理结果分析

对 2017 年至 2022 年间持续观测的 6 个目标卫星: Ajisai、Jason-3、KOMPSAT-5、LARES、Stella、Swarm-B 的部分激光测距数据进行补偿漂移误差处理,得到结果如图 8。



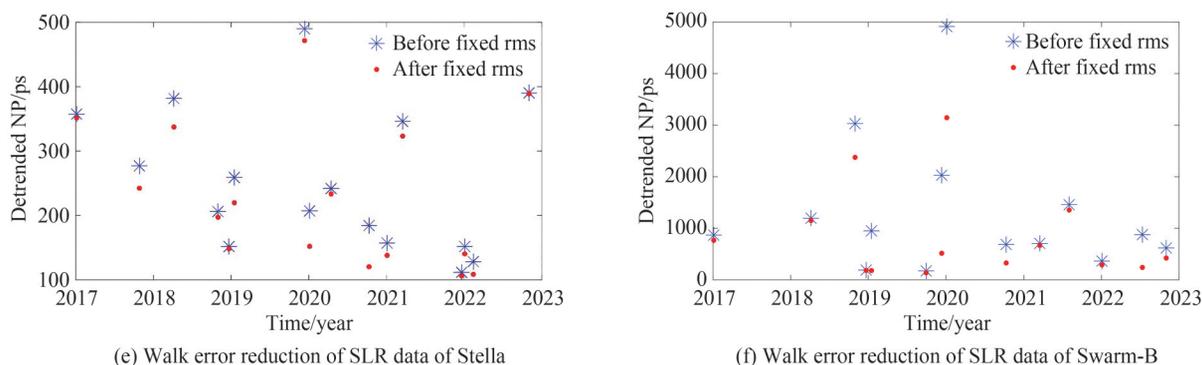


图8 减小漂移误差前后的卫星激光测距数据对比结果(2017年—2022年)

Fig.8 Comparison results of satellite laser ranging data before and after walk error reduction (2017—2022)

由图8可以看出,经过补偿漂移误差后的数据,去势标准点的RMS都有所降低,反映出数据中由于能量变化带来的波动被有效降低,数据质量有所提高。对于不同卫星来说,修正量最多的为Swarm-B卫星,平均修正量为450.7 ps,这是由于Swarm-B卫星轨道高度低(460 km),运行速度快,在进行常规卫星观测时,望远镜会为了跟上目标而快速移动,导致激光光束无法时刻对准卫星,使回波能量变化比较大,数据中的漂移误差也就比较大。而轨道较高的目标,例如Jason-3卫星(轨道高度1 336 km),其运行速度较慢,过境时间长,望远镜比较容易锁定目标,回波信号能量大小比较稳定,数据中的漂移误差也就比较小,平均修正量为28.5 ps。所以,对于轨道高度较低的目标,漂移误差对数据的影响较大,如果能够对其测距数据中的漂移误差进行有效减小或降低,将会显著提升数据质量。

4 结论

本文利用中国科学院云南天文台53 cm双筒激光测距系统的实际测距数据和仿真,对卫星激光测距数据中存在的漂移误差进行了分析与补偿。研究表明:在卫星激光测距中,能量波动会导致数据中存在漂移误差,这些漂移误差能够通过计算得出,将该误差的补偿加入到数据处理过程后,测距数据质量会得到提升。本方法将卫星激光测距的实测数据加入到补偿过程中,与单纯考虑模型相比能够更有针对性、更准确且实时地对漂移误差进行抑制,也在一定程度上弥补了现有的对卫星激光测距数据处理方面的不足,能为卫星激光测距的数据处理过程提供参考。但本文通过仿真计算出的漂移误差没有经过实验验证,为理论上的计算值。后续工作中,可以通过实验计算数值,以更精确地确定漂移误差数值,更大程度地减小漂移误差对实际测距数据的影响。

参考文献

- [1] YE Shuhua, HUANG Cheng. Astro-geodynamics [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2000.
叶叔华, 黄铖. 天文地球动力学 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000.
- [2] WILKINSON M, SCHREIBER U, PROCHÁZKA I, et al. The next generation of satellite laser ranging systems [J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(11): 2227-2247.
- [3] LI Chunxiao, LI Zhulian, TANG Rufeng, et al. Target distance measurement experiment with a bistatic satellite laser ranging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(S1): 19-25.
李春晓, 李祝莲, 汤儒峰, 等. 一发两收卫星激光测距系统中目标距离测量试验 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(S1): 19-25.
- [4] ZHANG Haifeng, LONG Mingliang, DENG Huarong, et al. Detection ability of laser ranging system based on multi-telescopes to receive echo signal [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(9): 0906002.
张海峰, 龙明亮, 邓华荣, 等. 多望远镜信号接收的激光测距系统探测能力 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9): 0906002.
- [5] LIU Yuan, AN Ning, FAN Cunbo, et al. Echo characteristics of satellite laser ranging based on Geiger mode SPAD [J]. 2018, 47(8): 0828002.
刘源, 安宁, 范存波, 等. 基于G-SPAD的卫星激光测距回波特性 [J]. 光子学报, 2018, 47(8): 0828002.
- [6] KIRCHNER G, KOIDL F. Determination of satellite signatures and time walk effects [C]. 9th Int. Workshop on Laser Ranging Instrumentation (Canberra), 1994: 107-112.

- [7] OH M S, KONG H J, KIM T H, et al. Reduction of range walk error in direct detection laser radar using a Geiger mode avalanche photodiode[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(2): 304-308.
- [8] XU L, ZHANG Y, ZHANG Y, et al. Restraint of range walk error in a Geiger-mode avalanche photodiode lidar to acquire high-precision depth and intensity information[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(7): 1683-1687.
- [9] OTSUBO T, SHERWOOD R A, APPLEBY G M, et al. Center-of-mass corrections for sub-cm-precision laser-ranging targets: Starlette, Stella and LARES[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(4): 303-312.
- [10] HUANG Ke, LI Song, MA Yue, et al. Theoretical model and correction method of range walk error for single photon laser ranging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(6): 141-151.
黄科, 李松, 马跃, 等. 单光子激光测距的漂移误差理论模型及补偿方法[J]. *物理学报*, 2018, 67(6): 141-151.
- [11] ZHAI Dongsheng, TANG Rufeng, HUANG Kai, et al. Analysis on detection performance of satellite laser ranging based on Geiger mode APD arrays[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0608007.
翟东升, 汤儒峰, 黄凯, 等. 基于 G-APD 阵列的卫星激光测距系统探测性能分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0608007.
- [12] O'BRIEN M E, FOUICHE D G. Simulation of 3D laser rader systems [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(1): 37-60.
- [13] ZHANG Haoyue, ZHAO Chunmei, QU Feng, et al. Implementation and analysis of accurate calibration for SLR system delay[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2020, 8(1): 74-77.
张浩越, 赵春梅, 瞿锋, 等. SLR 系统时延精确标校实现及分析[J]. *导航定位学报*, 2020, 8(1): 74-77.
- [14] LI Zhulian, ZHAI Dongsheng, TANG Rufeng, et al. Research and experiment of space debris daytime laser ranging based on 532 nm wavelength[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 276-283.
李祝莲, 翟东升, 汤儒峰, 等. 基于 532 nm 波长的空间碎片白天激光测距研究与试验[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 276-283.
- [15] TANG Rufeng, LI Yuqiang, LI Xi, et al. Spin rate determination of AJISAI based on high frequency satellite laser ranging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0608010.
汤儒峰, 李语强, 李熙, 等. 基于高重频卫星激光测距测算 AJISAI 卫星自转速率[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0608010.

Analysis and Research of Walk Error Based on High-precision Satellite Laser Ranging Data

LI Zhifei^{1,2}, TANG Rufeng¹, ZHAI Dongsheng^{1,3,4}, LI Zhulian^{1,3,4}, FU Honglin^{1,4},
HUANG Kai⁵, CAO Jin^{1,2,5}, LI Yuqiang^{1,3,4}

(1 *Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *Key Laboratory of Space Object & Debris Observation, PMO, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China*)

(4 *Yunnan Key Laboratory of the Solar Physics and Space Science, Kunming 650216, China*)

(5 *College of Mathematics and Physics, Leshan Normal University, Leshan 614000, China*)

Abstract: Satellite laser ranging is one of the most accurate astronomical and geodynamic measurements. At present, the detectors used by most stations in the world are single-photon avalanche diodes. Due to the detection characteristics of single-photon avalanche diodes, energy fluctuations will cause walk errors in each ranging data during every daily observation. The existence of walk error limits the development of satellite laser ranging to higher precision, so it needs to be studied. This study first introduces the detection principle of single photon avalanche diodes, and explains why walk error exists in single photon avalanche diodes: the fluctuation of the number of echo photons. Secondly, based on the detection principle of the single photon avalanche diode, the theoretical calculation of the walk error and the calculation method of the photon number of the laser ranging echo are deduced. The method for calculating the number of photons can calculate the number of echo photons corresponding to the satellite laser ranging original data. According to the data processing protocol of satellite laser ranging, the data processing of satellite ranging data should be combined with the ground target ranging data. However, satellite echo photon numbers and the ground target echo photon numbers cannot be guaranteed to be strictly consistent, so there will still be walk error in the processed data. The simulation result of laser ranging of LAGEOS satellite and ground target can show the difference in echo photon numbers and walk error of two targets, which can explain the question above.

Furthermore, a compensation method for the walk error of the satellite laser ranging measured data combined with the theoretical model is proposed. The operation process of the method is as follows: first, signal identification, photon number calculation, and walk error calculation are performed on the ground target laser ranging data; then, signal identification, photon number calculation and walk error calculation are performed on the satellite laser ranging data; at last, the difference between the two walk errors is added to the satellite laser ranging results. Combining the proposed method of calculating the number of echo photons with the simulation based on the 53 cm binocular laser ranging telescope of the Yunnan Astronomical Observatory of the Chinese Academy of Sciences, the calculation results of the echo photons numbers are obtained. Then we apply the walk error compensation method to the data processing process of the corresponding data. In this way, walk errors in the satellite laser ranging data can be compensated. We select the satellite laser ranging data from the laser ranging data of 6 satellites to practice this method and analyze the results. The data is part of the laser ranging data of Ajisai, Jason-3, KOMPSAT-5, LARES, Stella, and Swarm-B from 2017 to 2022. Among them, the five-year average compensation value of Ajisai is 41.9 ps (1.257 cm), Jason-3 is 28.5 ps (0.855 cm), KOMPSAT-5 is 28.7 ps (0.861 cm), LARES is 34.7 ps (1.041 cm), Stella is 22.6 ps (0.678 cm), Swarm-B is 450.7 ps (13.521 cm). At the same time, the maximum correction value appeared in the Swarm-B ranging data on January 5, 2020, which was 770 ps. This means the data exists a distance deviation of 23.1 cm. The reason is that Swarm-B satellite owns a low orbit altitude and its running speed is fast, which lead to low tracking accuracy of the telescope. As a result, the echo photon numbers will fluctuate more than other High-Orbit Satellite. In this study, we analyze and study the cause, simulation of walk error and how to compensate for it. The results show that using the proposed walk error compensation method in this study to process satellite laser ranging data can reduce the distance measurement value fluctuation caused by the fluctuation of the number of echo photons in the laser ranging data of each satellite. As a result, it can correct walk errors caused by energy changes in the data and improve data quality.

Key words: Laser ranging; Single photon detection; Walk error; Data processing; Ranging accuracy

OCIS Codes: 040.1345; 040.1880; 140.3460