

卫星激光测距数据处理方法研究进展

安 宁¹, 关博文^{1,2}, 张漪伦³, 高 健¹, 温冠宇¹, 董 雪¹, 马 磊¹, 范存波¹

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;
3. 中国人民解放军 31401 部队, 吉林 长春 130117)

摘 要: 数据处理技术的发展与进步是实现毫米级卫星激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR) 的重要保障。文中简要回顾了 SLR 技术的发展历程, 阐述了数据处理技术在 SLR 的实际应用, 着重介绍了国内外典型的数据处理算法及其发展脉络。同时, 针对大地测量产品的应用需求, 分析了目前 SLR 数据处理算法的适用性、稳定性及存在的问题。最后, 针对激光测距的未来发展态势, 提出了新一代 SLR 数据处理方法面临的挑战及可能的解决方案, 并对其发展趋势做出展望。

关键词: 卫星激光测距; 数据处理; 标准点算法; 数据质量

中图分类号: P228.5 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200408

Development review of satellite laser ranging data processing technology

An Ning¹, Guan Bowen^{1,2}, Zhang Yilun³, Gao Jian¹, Wen Guanyu¹, Dong Xue¹, Ma Lei¹, Fan Cunbo¹

1. Changchun Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130117, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. 31401th, The Chinese People's Liberation Army, Changchun 130117, China)

Abstract: The development and progress of data processing technology is important to guarantee the realization of millimeter-level satellite laser ranging (Satellite Laser Ranging, SLR). The history and research actuality of SLR technology were reviewed briefly, the practical application of data processing methods in SLR was introduced emphatically, and the typical data processing algorithms and its development at home and abroad were summarized. At the same time, the suitability, stability and technical problems of the existing SLR data processing algorithms were concluded and analyzed in accordance with the applicable demands and features of geodetic data products. Finally, in view of the future development trend of laser ranging, the challenges and possible solutions of the new generation of SLR data processing methods were proposed and its development trend was prospected.

Key words: satellite laser ranging; data processing; normal point algorithm; data quality

收稿日期: 2020-12-05; 修订日期: 2021-02-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (12073052); 吉林省科技发展计划 (2020081050GH, 2020SYHZ0049)

作者简介: 安宁, 女, 副研究员, 博士, 主要从事卫星激光测距技术及应用等方面的研究工作。

0 引言

SLR 是目前精度最高的大地空间测量技术之一。作为一门融合光电探测、自动控制、电子通讯、卫星轨道等多学科的综合技术,SLR 通过记录激光脉冲往返测站到卫星的时间,精确获得地卫之间的距离^[1]。高精度 SLR 技术的出现极大地促进了大地测量、地球动力学和地球物理科学等学科的发展,为卫星导航、星地双向激光时间对比等国家重大项目的研制提供了关键的技术保障^[2-3]。

为开展大地测量和地球物理等相关研究活动,全球大地测量观测系统(Global Geodetic Observation System, GGOS)对 SLR 数据提出了标准点精度优于 1 mm 的长期要求^[4]。随着光电器件研究水平的不断提高,SLR 系统由第 1 代发展到第 3 代,经历了由体积笨重、功耗高、精度差、人工依赖性强到小型化、高精度、自动化、多功能的转变。目前,SLR 观测精度已从早期的米量级提高到了亚厘米量级,观测距离从 1000 km 内提高到了 381 104 km,观测数据量得到大幅度提升^[5-6]。尽管如此,相比 GGOS 及卫星定轨等应用需求,现有的 SLR 数据质量仍具有明显差距^[7]。

SLR 回波点数据涵盖了大量的有用信息,包括激光回波时间、卫星高度角、方位角、星-地观测距离以及与预报差值 O-C 等。千赫兹 SLR 技术的出现大幅度增加了回波点数据量、提高了标准点精度,但由于天光背景及系统噪声的影响,原始数据中存在的大量噪声使提取回波信号极为困难。SLR 数据处理技术通过数学建模或统计方法剔除了原始数据中的异常噪声,实现了有效数据的筛选。在对回波信号的获取途径上,不再局限于通过高能量的激光发射来获得高信噪比的回波率,而更加注重对回波数据的分析与利用,是 SLR 研究领域的热点问题之一^[8]。

目前,SLR 数据处理算法的研究主要围绕标准点算法框架和 SLR 数据识别与滤波算法两大研究方向进行开展。文中以此为出发点,梳理了 SLR 系统数据处理算法的发展脉络及研究进展,并对 SLR 数据处理存在的技术问题进行了回顾与总结。最后,针对激光测距技术的发展态势,提出了新一代 SLR 数据处理方法的技术方向和发展建议。

1 标准点算法框架

1984 年, Torrence 和 Klosko 等人在第五届卫星激光测距大会上提出了 SLR“标准点”这一概念,利用数据压缩技术将单位时间内的观测信息压缩成一个数据点,大大减小了对大数据集进行轨道分析的计算时间^[9]。随后, Herstmonceux 站提出的标准点算法认为 SLR 回波数据呈高斯分布,利用回波分布的三倍中误差对原始数据进行滤波,可剔除大量的背景及系统噪声,实现回波信号的提取^[10]。然而, Herstmonceux 标准点算法过分依赖于高精度的预报值且运行速度较慢。为此,1992 年 Appleby 和 Sinclar 在 Herstmonceux 标准点算法框架下提出了平滑拟合方法计算观测值与预报值之间的时间偏差与距离偏差,有效提升了标准点算法程序的运行速度^[11]。1994 年, NASA 公布了第一代标准点生成(GNP-1)算法^[12]。该方法倾向于回波数据本身的偏差,利用迭代方法剔除异常值,摆脱了对卫星预报的依赖性。但由于采用了单次拟合确定趋势函数,当噪声增多时,趋势函数将受到大量异常值的影响,造成 SLR 数据质量下降。为了解决上述问题, NASA 基于 Paunonen 的中值滤波算法、中国科学院上海天文台的稳健自适应算法等数据处理算法,提出了第二代标准点生成(GNP-2)算法,在算法中采用多次迭代去除异常值,有效改善了 GNP-1 的稳健性^[13]。

1997 年, Sinclar 等人以 Herstmonceux 标准点算法及相关研究为基础,给出了标准点算法的标准框架^[14]。具体分为以下步骤:(1) 将测量值减预报值得到预报残差,结合数据识别与滤波方法剔除预报残差中的离群值;(2) 对预报残差进行多项式拟合生成趋势函数,通过预报残差减去趋势函数得到拟合残差,利用迭代的中值滤波法剔除拟合残差 N 倍中误差外的异常值,重复该过程,直到数据精度不再发生明显变化;(3) 根据 ILRS 标准划分标准点间隔,在间隔内利用数据压缩技术生成标准点数据。图 1 为标准点算法流程。

在 Herstmonceux 标准点算法中,SLR 的回波分布呈高斯对称。然而,由于探测器效应与卫星形状效应等测距误差的影响,部分卫星的 SLR 回波数据呈非对称分布(图 2)为了表征回波信号的时域分布, Sinclar 等人将回波分布的偏度与峰度作为额外参数评价标

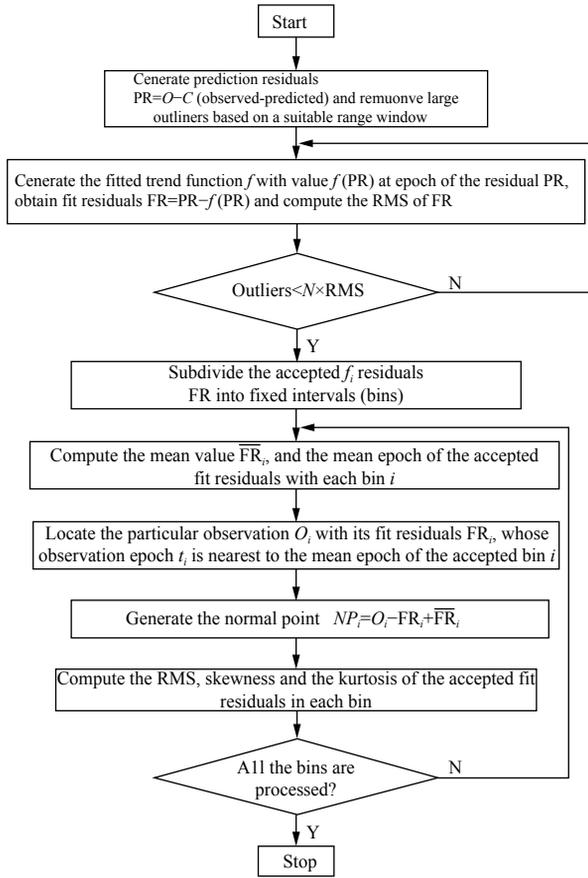


图 1 标准点算法流程

Fig.1 Processing flow of normal point algorithm

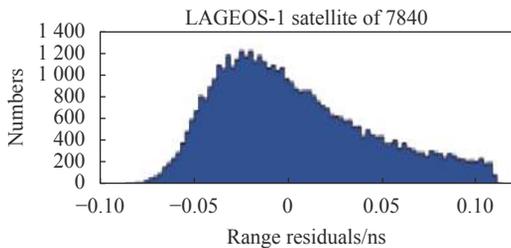


图 2 Herstmonceux 站 Lageos-1 卫星 SLR 实测数据

Fig.2 Lageos-1 initial SLR observation data from Herstmonceux station
 准点数据质量,完善了标准点算法的评价体系^[10, 15]。

此后,如何提高标准点算法的可靠性及稳定性成为 SLR 数据处理的研究重点。2002 年,ILRS 针对不同的重频 SLR 系统,给出了生成标准点最低点数的建议^[16]。2012 年,为了提高 SLR 系统的工作效率,ILRS 重新定义了 SLR 标准点生成的时间间隔。该项修正使高重频 SLR 系统能够在低于常规标准点间隔的时间段内生成标准点,有效提高了系统的工作效率^[17]。2013 年,Clarke 与 Degnan 等人分析了 NGSLR 系统与 MOBLAS-7 系统的 SLR 回波数据^[18]。研究结果表

明,由于测站系统的差异,当采用标准点算法处理同一卫星的原始观测数据时,不同 SLR 系统的数据处理结果不同。因此,应针对 SLR 系统的性能参数,调整标准点算法中的中误差倍率。2018 年, Degnan 提出了一种根据观测数据回波率校正标准点数据的方法^[19]。利用实验数据反演由探测器响应模型引起的系统误差,并对标准点数据进行修正。该方法有效提高了标准点数据的精度,为进一步优化标准点算法提出了新的思路。

标准点算法框架作为 ILRS 的标准数据处理流程已推广到全球的 SLR 观测站。ILRS 对各测站上传的标准数据进行综合评估,并及时给予反馈^[20-21]。目前,由标准点算法生成的全速率数据 (Full-Rate Data, FRD) 与标准点数据 (Normal Point Data, NP) 作为 ILRS 的数据产品免费提供给世界各地研究者下载研究,为地球动力学、大地测量学、地球物理学和天文学等研究提供重要的数据支持与技术保障。图 3 为标准点算法框架发展进程。

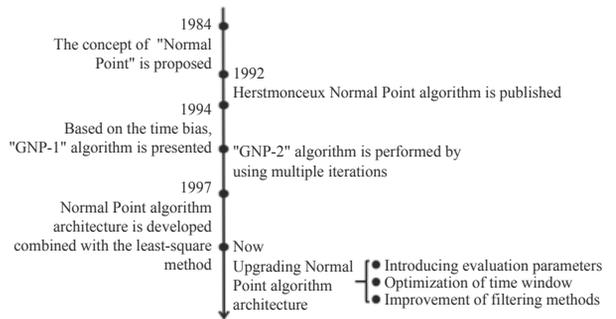


图 3 SLR 标准点算法框架发展进程

Fig.3 Development of normal point algorithm

2 SLR 数据识别与滤波

为了丰富 SLR 数据处理研究体系,完善标准点算法框架,研究者对 SLR 数据识别与滤波开展了充分的探讨与摸索。作为 SLR 数据处理面临的主要难题,数据的有效识别与滤波可提高 SLR 数据精度,改善算法运行效率,对生成高质量 SLR 数据产品具有重要意义。随着 SLR 数据建模与统计方法的不断完善,不同的 SLR 数据识别与滤波方法应用在数据处理过程中,主要包括:人工的屏幕处理法、直方图法、图像处理算法、卫星形状效应滤波算法等。

2.1 人工屏幕处理法

人工屏幕处理技术是最原始的 SLR 回波信号提取方式。随着激光发射频率的提升, SLR 回波数据量大幅度增长, 噪声也随之增加。尽管 SLR 系统中采用多种滤波技术, 如空间滤波、光谱滤波、时间滤波等技术抑制噪声, 但仍无法解决白天或天气恶劣情况下系统低信噪比的问题^[22-23]。为了解决上述问题, SLR 测站多采用人工屏幕处理方法, 利用数据坐标转换、翻转拉直等手段, 人工地将明显的离群值剔除。该方法可快速识别包含大量噪声的微弱回波, 适合各种类型数据的初步筛选。作为标准点算法的补充, 屏幕处理法在中国科学院上海天文台、中国科学院长春人造卫星观测站 (下面简称长春人卫站)、Zimmerwald 站等 SLR 台站都取得了不错的效果^[24-26]。图 4

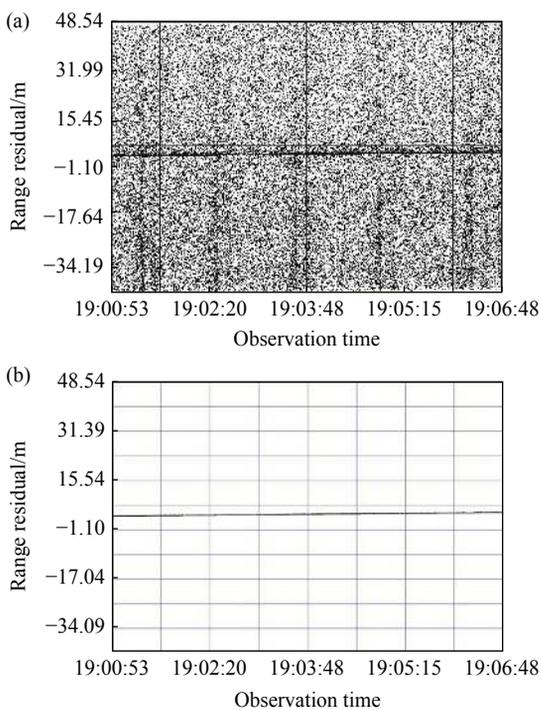


图 4 长春站 SLR 屏幕处理结果。(a) 未处理; (b) 处理后

Fig.4 Lageos-1 observation data with screening processing method for Changchun station. (a) Pre-treatment; (b) Post-treatment

示出长春站 SLR 的屏幕处理结果。

2.2 直方图法

直方图法诞生于 SLR 发展早期, 克服了人工屏幕处理法对研究人员经验的依赖性, 是一种高效、简便的数据处理手段。直方图法基于回波信号的时间相关性, 对 SLR 原始数据换算并统计距离的累加值, 通过分析 SLR 回波的统计特征设定距离窗的大小、框间隔以及回波阈值, 实现卫星回波的有效提取。当直方图中某一时间区域内的数据量超过设定阈值, 则认为在该区间内存在 SLR 有效的回波数据^[27]。典型的直方图法包括 Graz 快速回波辨识算法、SLR2000 系统的相关检测算法、N/M 算法等。表 1 为常见直方图法的优缺点。

随着激光测距理论研究的不断完善, 以直方图方法为基础衍生出了多种适用不同 SLR 系统的数据处理方法。1994 年, 针对单光子量级的 LLR (Lunar Laser Ranging, LLR) 与 SLR 系统, Ricklefs 与 Shelus 等人以探测器响应的泊松过程为设计思想, 提出了泊松滤波算法^[28]。

在 SLR 过程中, 背景噪声在距离内呈随机分布, 而回波光子理论上服从以下分布:

$$p(k) = \frac{N_s^k}{k!} \exp(-N_s) \quad (1)$$

式中: $N_s = \frac{E_{rec}}{h\nu}$ 。

泊松滤波算法从 SLR 回波光子数统计分布规律出发, 利用矩形窗口对短时间间隔内的 SLR 数据进行斜率扫描, 并对扫描结果进行直方图统计。当单位时间间隔内统计的回波点数超过阈值且符合泊松过程时, 则判定该区域内存在有效回波数据。该方法不依赖高精度预报与趋势函数, 可快速提取 SLR 的有效回波, 且不会造成数据损失, 是目前高精度 SLR 回波数据处理方法的代表之一。图 5 为泊松滤波原理示意图。

表 1 常见直方图法优缺点

Tab.1 Advantage and disadvantage of various histogram methods

Name	Advantage	Disadvantage
1 Graz echo identifying algorithm	Human machine interface, simple to operate	Low detection rates for high-orbit satellites
2 SLR2000 correlation algorithm	Highly flexible and efficient for dealing massive observation data	Sensitive to the range window and low automation
3 N/M algorithm	More adaptive, especially for low S/N ratio	Complicated calculation and poor real-time performance

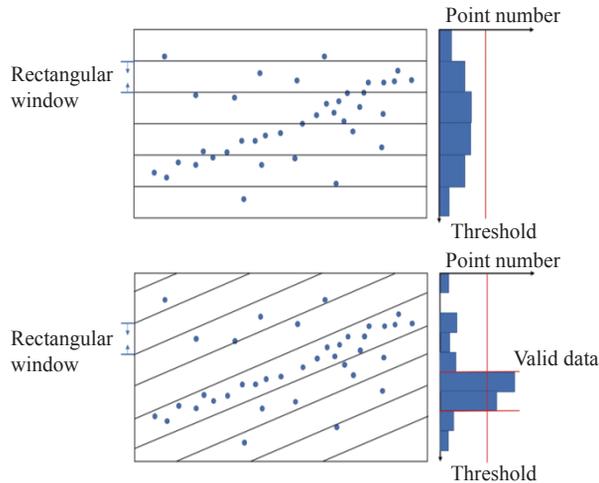


图 5 不同数据处理算法产生的 SLR 数据。(a) 直方图法; (b) 泊松滤波算法

Fig.5 SLR data generated by various data processing algorithm.

(a) Histogram method; (b) Poisson filtering method

泊松滤波算法是一种统计滤波算法,对 SLR 回波量级有着极高的要求。当激光脉冲强度改变或天气变化时,回波数据强度及分布也随之变化,直接影响数据处理结果。2016 年, Rodriguez 与 Appleby 等人提出了一种改进的泊松滤波方法^[29]。该算法基于 SLR 单光子及多光子探测机制的分析,利用多光子探测方程评估在该时间间隔内探测器响应时的光子数,将不符合单光子探测的观测数据与噪声同时滤除,有效提高了 SLR 观测数据的质量。表 2 为泊松统计滤波算法计算不同卫星的处理结果。

表 2 泊松滤波、后处理算法产生的 SLR 数据

Tab.2 SLR data generated by post-treatment and Poisson filtering

Number	Satellite	Echo points by post-treatment	Echo points by Poisson filtering	Observation arc length/s
1	Ajisai	430	159	171.25
2	Jason-1	600	298	349.75
3	Stella	347	119	268.57
4	BE-C	723	372	316.87
5	ERS-1	284	97	144.50

2014 年, Clarke 等人发现在低信噪比情况下,经过泊松滤波处理后的 SLR 数据中仍存在一些与有效数据无法分离的背景噪声。为此, Clarke 等人设计了一种噪声抑制算法,通过统计、比较背景噪声密度与原始数据密度,实现有效信号的筛选。当回波数据密

度结果大于背景噪声密度时,则认为该区域内包含有效回波数据,并依据背景噪声密度随机剔除该区域内的数据点,进而获取 SLR 的有效回波。噪声抑制算法有效提升了回波点数据量及标准点精度,并减小了不同测站的数据结果差异^[30]。

作为直方图法的另一典型代表,样条差值法常应用于自转周期性明显、回波数据曲线波动较大的卫星数据处理^[31]。样条差值法是基于细分的统计算法,即将整个观测弧段分成细小的子弧段,然后分别在这些小的时间间隔内应用切比雪夫多项式对观测数据进行拟合,最后在时间间隔的边界点进行多项式匹配。该算法通过低阶多项式拟合,可有效提高数据处理精度,提供更好的标准偏差。图 6 为利用样条差值法处理的 Topex 卫星观测数据结果图。

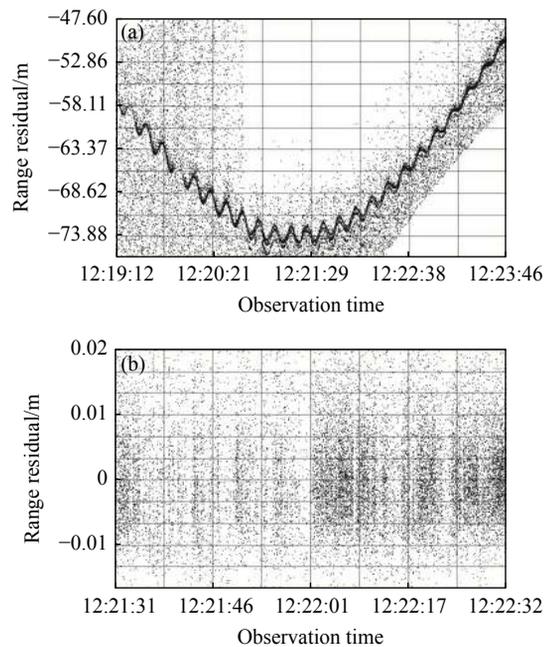


图 6 利用样条差值法处理 Topex SLR 观测数据的结果。(a) 未处理; (b) 处理后

Fig.6 Topex SLR observation data generated by spline difference method. (a) Pre-treatment; (b) Post-treatment

2.3 图像处理算法

图像工程技术的出现为 SLR 数据处理带来了新的契机。以时间相关光子计数为基础的 SLR 系统在测距过程中出现了大量的噪声点。这些噪声点将呈现无规则的弥散分布,与卫星返回的有效光子呈交替存在。回波光子点云相对密集,而噪声点数据比较分

散。为此,2011 年雁雨等人提出一种基于点云曲线识别的 SLR 数据处理算法^[32]。该算法将 SLR 数据视为点云数据,将数据分布网格化后,利用计算机视觉技术、遗传算法等方法确定点云的有效区域,再结合多项式拟合方法剔除离群点,多次迭代最终得到有效数据。

为了进一步改善激光测距数据处理中信号提取困难以及自动化程度不高的现状,2014 年李熙提出一种基于二值图像的 SLR 数据处理方法^[33]。将原始数据文件映射为二值图像,再利用区域处理方法将像素点分割,通过图片降噪的方法提取有效数据区域,最后做逆变换求解有效数据。结果表明,二值化方法充分考虑了信号点间的关系,在 SLR 自动数据处理方面有很好的效果,有效减少了人为误差。然而,该方法鲁棒性较差,在回波率较低时,数据处理结果并不理想。

随着人工智能技术的发展,机器视觉广泛应用于海量数据识别、信息深度挖掘以及图像轮廓提取等方面。2019 年, Lixue 等人基于深度卷积神经网络模型,利用 DeepLabcut 工具对 SLR 回波图像进行有效信号数字标记^[34]。然而,由于 SLR 回波数据呈一维分布,无法在二维图像或视频中看到其回波特征,Deep Labcut 无法有效区分 SLR 回波图像的有效信号点及噪声点。当回波图像帧数较少时,有效信号识别率仅为 4%,不能满足高精度 SLR 数据处理的需求。

2.4 卫星形状效应滤波法

作为影响 SLR 回波数据精度的最主要因素,卫星质心修正 (Centre-of-Mass correction, CoM) 误差是由角反射器的卫星形状效应引起的系统误差,其误差范围在 10 mm 以上^[35]。在 SLR 过程中,卫星表面布满角反射器,发射光束中的同一波阵面的光子到达角反射器的时间不同,不同平面角反射器反射回波有先后之分,最前面的角反射器回波最早,两边的反射器回波较晚,不同的反射回波混叠在一起,导致回波波形的展宽和畸变,严重影响了系统的精度与稳定性^[36]。图 7 为卫星形状效应示意图。

1976 年, NASA 在对 Lageos 角反射器阵列进行研究时发现,入射在球形卫星不同角反射器上的激光回波时刻存在明显差异^[35]。由于当时技术水平的限制,由卫星形状效应引起的测距误差被其他误差如激

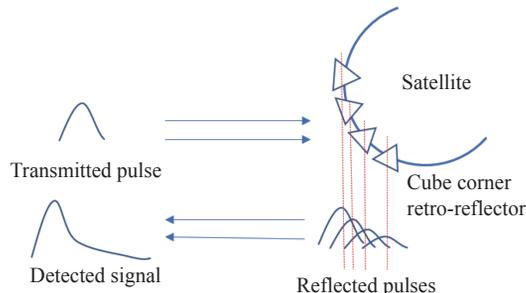


图 7 卫星形状效应示意图

Fig.7 Schematic diagram of satellite signature effect

光脉宽、探测器响应、大气误差等因素所掩盖,并没有得到重视。随着高重频 SLR 技术日益成熟,系统的回波点数大幅度增长,由卫星形状效应引起的回波分布的非对称性从噪声中显现出来。1994 年, Neubert 提出卷积方法,对卫星形状效应进行建模分析,计算了不同球形卫星的 CoM 值^[37];2001 年,范建兴等人通过概率密度函数建立了 CoM 模型,模拟了 SLR 回波波形^[38];2003 年, Toshimichi Otsubo 等人分析了测站参数对 CoM 值的影响,讨论了 SLR 实际回波与理论模型函数的差异^[39];2008 年, Graz 站基于卫星形状效应,提出了前沿切割算法以减小或消除卫星形状效应对 SLR 数据质量的影响^[40](图 8)。结果表明,当只选取 Lageos 有效数据前沿 10% 数据进行多项式拟合剔除异常值时,可大幅度提高 SLR 回波数据质量。2018 年, Wilkinson 与 Rodriguez 等人利用前沿切割算法对 Herstmonceux 测站 Lageos-1、Lageos-2 原始观测数据 (2015~2018 年) 进行数据处理,验证了该算法可有效改善数据精度,但由于 Lageos-1、Lageos-2 卫星轨道不同,在相同切割位置时数据处理结果存在一定差异,其稳健性并不理想^[41]。

为进一步减小或消除卫星形状效应,2016 年,

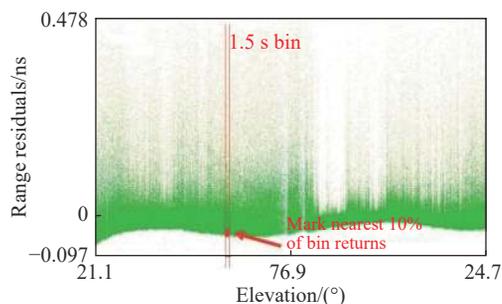


图 8 Graz 测站滤波方法得到的 Ajsai SLR 数据^[39]

Fig.8 Ajsai SLR data generated by Graz station filtering method^[39]

Graz 站提出了零势效应算法^[42]。该算法利用信号处理方法从 SLR 数据中提取 Ajsai 的旋转频率,通过建立 Ajsai 卫星的运动模型筛选 Ajsai 的有效回波。最后,综合分析 Ajsai 卫星角反射器的结构参数与分布,只保留测距站最近的角反射器回波数据。这一方法成功地将 Ajsai 标准点精度从 15.44 mm 提升至 3.05 mm,大幅度提高了 Ajsai 回波数据质量。

2018 年, Riepl 等人基于卫星形状效应提出了一种基于最优维纳滤波的去卷积算法^[43]。利用维纳滤波算法平滑 SLR 数据分布曲线,根据卫星形状效应模型对 SLR 数据进行反卷积,并生成了标准点数据。同时,对 Wettzell 站的 Lageos、Ajsai、Etalon 等 SLR 原始数据进行处理。结果表明,维纳滤波算法明显优于 2 倍中误差的标准点算法。

2019 年,长春人卫站刘源等人开展了卫星形状效应的研究,并提出边缘滤波算法^[44]。该算法沿承了前沿切割算法的思想,根据不同球形卫星的回波特性对数据进行剪切,选取了回波数据半峰宽内的回波数据,滤除了大量噪声点。与基本滤波算法相比,边缘滤波算法处理的 SLR 标准点精度约提高 20%~50%。

3 总结与展望

随着计算机技术的不断进步,SLR 数据处理技术已成为激光测距研究领域最活跃的课题之一。利用 SLR 数据处理技术获取高精度的 SLR 数据产品,对完善激光测距理论研究、构建测距系统以及拓展技术应用具有重要的科学需求和现实意义。文中对 SLR 数据处理技术的基本内涵进行了阐述,系统地介绍了几种典型的 SLR 数据处理方法及其发展脉络。通过总结分析发现,现有的数据处理方法通常基于回波分布统计特征的分析,利用回波光子的时间相关性对回波中的噪声数据进行滤波,回波数据的阈值设定或剪切范围人工依赖性较强,在处理低信噪比、微弱光子测距回波时存在一定的局限性。

如今,SLR 数据处理技术正向着精(高精度)、稳(数据稳定性好)、快(自动化程度高)、广(适用性强)等方向发展,具有极大的发展空间和上升潜力。未来值得进一步研究的工作主要包括:

(1) 微弱光子探测数据处理方法的研究

深空激光测距是激光测距研究领域中的重要发

展方向和追求目标。对于月球或者超月球的空间飞行器,由于观测距离远、测距环境复杂,系统信噪比低、微弱回波光子极易被淹没,仅依靠统计学滤波提取有效信号十分困难^[45]。探测器效应、卫星形状效应等 SLR 误差源的深入分析为提取 SLR 回波信号的研究带来了新的突破口,弥补了现有数学滤波技术的不足。但在微弱光子探测的数据处理方法的研究中仍有许多问题有待进一步解决,包括如何基于物理效应优化回波阈值、距离栅格参数等。同时,应进一步完善多/双波长 SLR 系统,地靶测距系统等结构设计,减小大气延迟、系统时延误差等误差对 SLR 数据精度的影响等。

(2) 海量观测数据处理方法的研究

光电器件产业的蓬勃发展使 2 kHz、4 kHz、5 kHz 和 10 kHz 甚至是 100 kHz 的高重频 SLR 系统从理论设想走向现场试验^[46-47]。回波数据量大幅度增长为 SLR 数据处理单元和存储单元带来了很大的负担,导致处理时间长、操作缓慢、存储设备容量不能满足。因此,未来的数据处理方法应采用专用高速硬件,结合数据采集技术、数据压缩技术,开展 FPGA 的算法硬件语言、高速 AD 数据转换等方面的研究,充分利用 Visual C++ 可视化操作和 Fortran 高效运算能力,实现短时间内对 SLR 海量观测数据的集中高速处理,进而提高 SLR 系统的工作效率、改善系统探测性能。

(3) 综合数据处理方法的研究

现有的 SLR 数据处理过程通常采用单一算法获取有效回波信号,极大地限制了应用范围。为了完成 SLR 系统要求的高精度、智能化、快速反应等目标,未来数据处理技术可采用多算法合并的综合处理策略,实现不同算法的技术优势互补,手段多源融合。例如,可在标准点算法框架的基础上,应用卫星形状效应滤波算法,减小或消除由卫星形状效应引起的系统误差。同时,综合考虑回波信号的统计特征及形状特征,可利用短时静态实测背景噪声构建噪声模板,结合机器视觉技术最大限度剔除背景噪声,提取有效信号,改善 SLR 数据质量,实现激光测距自动数据处理。

总而言之,SLR 数据处理技术在 SLR 系统精度提升中扮演者至关重要的角色。经过研究人员的不懈努力,SLR 数据处理技术取得了一定的进展和突

破,但仍未满足未来大地测量数据产品的应用需求,迫切需要在算法的数据处理精度、稳健性、运行效率、自动化等方面做出原始创新,并逐步建立起完整的 SLR 数据处理算法评价体系,为载人航天、卫星导航系统及深空探测等国家重大专项的突破提供不可或缺的高精度测量数据支持。

参考文献:

- [1] Lucchesi D, Anselmo L, Bassan M, et al. General relativity measurements in the field of earth with laser-ranged satellites: state of the art and perspectives [J]. *Universe*, 2019, 5(6): 141.
- [2] Choi E J, Bang S C, Sung K P, et al. Design and development of high-repetition-rate satellite laser ranging system [J]. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 2015, 32: 209-219.
- [3] Prochazka I, Kodet J, Blazej J, et al. Identification and calibration of one-way delays in satellite laser ranging systems [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(10): 2466-2472.
- [4] Pearlman M R, Noll C E, Pavlis E C, et al. The ILRS: Approaching 20 years and planning for the future [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(11): 2161-2180.
- [5] Deng Huarong, Wu Zhingbo, Li Pu, et al. Improvement research on SLR data deviation by using polarization technology for energy regulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0917005. (in Chinese)
- [6] Liu Bo, Chen Nianjiang, Zhang Zhongping, et al. Technology of micro-pulse satellite laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S3): 234-237. (in Chinese)
- [7] Meisel B, Angermann D, Krügel M, et al. Refined approaches for terrestrial reference frame computations [J]. *Advances in Space Research*, 2005, 36(3): 350-357.
- [8] Ding Renjie, Wu Zhibo, Deng Huarong, et al. Research and design of high automation satellite laser ranging system [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(9): 1102-1107. (in Chinese)
- [9] Zajdel R, Sośnica K, Drożdżewski M, et al. Impact of network constraining on the terrestrial reference frame realization based on SLR observations to LAGEOS [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(11): 2293-2313.
- [10] Torrence M H, Klosko S M, Christodoulidis D C. The construction and testing of normal points at goddard space flight center[C]//Proceedings of 5th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 1984: 506-516.
- [11] Appleby G M, Sinclair A. Formation of on-site normal points[C]// Proceedings of 8th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 1992, 9: 19-25.
- [12] Conklin B M, Davis D, Edge V, et al. NSLR PC software packages for normal point and acquisition generation[C]// Proceedings of the 9th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 1994: 1090-1095.
- [13] Paunonen M. Adaptive median filtering for preprocessing of time series measurements[C]//Proceedings of the 8th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 1992, 2: 44-50.
- [14] Sinclair A T. Re-statement of herstmonceux normal point recommendation[R/OL]. 1997. https://ilrs.gsfc.nasa.gov/data_and_products/data/npt/npt_algorithm.html.
- [15] Sinclair A T, Neubert R, Appleby G M. The LAGEOS centre of mass correction for different detection techniques[C]//Proceedings of Annual Eurolas Meeting, 1995: 31-36.
- [16] Seemüller, W W. Missions working group report[C]// Proceedings of Seventh General Assembly of ILRS, 2002.
- [17] Appleby G, Deleflie F, Desch N, et al. ILRS governing board meeting report[R].Vienna, Austria: EGU General Assembly, 2012.
- [18] Clarke C B, Degnan J J, McGarry J F, et al. Processing single photon data for maximum range accuracy[C]//Proceedings of the 18th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2013.
- [19] Degnan J J. A data processing approach to high precision, high return rate kHz SLR stations[C]//Proceedings of the 21th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2018.
- [20] Noll C E, Ricklefs R, Horvath J, et al. Information resources supporting scientific research for the international laser ranging service [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(11): 2211-2225.
- [21] Bayer I, Gibbs P, Wilkinson M. Herstmonceux time bias system as a possible real-time QC tool[C]//Proceedings of the 14th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2004.
- [22] Kang Wenyun, Song Xiaoquan, Wei Zhen. Weak signal detecting method of laser ranging for space target in daytime [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3026-3029. (in Chinese)
- [23] Cheng Bohui, Wei Zhibin, Qu Feng, et al. The realization of daytime laser ranging on Beijing satellite laser observatory [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015(3): 58-60. (in Chinese)
- [24] 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 Instrumentation, 2002.
- [25] Zhang Zhongping. Screen preprocess method for SLR data [J]. *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*, 1993: 118-125. (in Chinese)
- [26] Dong Xue. Research of high repetition space debris laser ranging system[D]. Changchun: Graduate School of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2014. (in Chinese)
- [27] Heiner M, Schreiber U, Brandl N. Recursive filter algorithm for noise reduction in SLR[C]//Proceedings of the 15th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2006.
- [28] Ricklefs R L, Shelus P J. Poisson filtering of laser ranging data[C]//Proceedings of the 8th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 1992, 9: 26-33.
- [29] Rodriguez J, Appleby G, Otsubo T, et al. Assessing and enforcing single-photon returns: poisson filtering[C]//Proceedings of the 20th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2016.
- [30] Clarke C B, Degnan J J, McGarry J F, et al. Background noise suppression for increased data acceptance[C]//Proceedings of the 19th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2014.
- [31] Eckl J J, Schreiber K U. Single photon tracking under difficult condition[C]//Proceedings of 2015 ILRS Technical Workshop, 2015.
- [32] 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. (in Chinese)
- [33] Li Xi, Tang Rufeng, Li Zhulian, et al. Laser ranging data processing based on the analysis of the binary image [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1208005. (in Chinese)
- [34] Li Xue, Zhu Zhaokun, Wu Wentang, et al. Simulated analysis of processing satellite laser ranging data using neural networks trained by DeepLabCut[C]//Processings of the 2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communiactions, 2019: 468-472.
- [35] 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*, 2014, 89(4): 303-312.
- [36] Fitzmaurice M W, Minott P, Abshire J B, et al. Prelaunch testing of the laser geodynamic satellite (LAGEOS): NASA-TP-1062, G-7702-F16[R/OL]. NASA, 1977: 1.
- [37] Neubert R. An analytical model of satellite signature effects[C]//Proceedings of 9th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 1994: 82-91.
- [38] Fan Jianxing, Yang Fumin, Chen Qixiu. Center-of-mass of satellites used for laser ranging [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(11): 1012-1016. (in Chinese)
- [39] Otsubo T, Appleby G M. System-dependent center-of-mass correction for spherical geodetic satellites [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B4): 2201-2210.
- [40] Liu Yuan, An Ning, Fan Cunbo, at al. Influence of shape effect of angle reflector on ranging precision of satellite lser ranging system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 110101. (in Chinese)
- [41] Wilkinson M, Rodrguez J, Otsubo T, et al. Implementing consistent clipping in the reduction of SLR data from SGF, Herstmonceux[C]//Proceedings of 21th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2018.
- [42] Kucharski D, Kirchner G, Otsubo T, et al. A method to calculate zero-signature satellite laser ranging normal points for millimeter geodesy-a case study with Ajisai [J]. *Earth, Planets and Space*, 2015, 67(1): 34.
- [43] Riepl S, Blobfeld M, Schuler T. Processing of SLR observations with an optimal wiener filter-an alternative way to calculate normal points[C]//Proceedings of 21th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2018.
- [44] Liu Yuan. Research on data processing method of high frequency laser ranging of spherical satellite[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [45] Samain E, Mangin J F, Veillet C, et al. Millimetric Lunar Laser Ranging at OCA (Observatoire de la Côte d'Azur) [J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1998, 130(2): 235-244.
- [46] He Yun, Liu Qi, Tian Wei, et al. Study on laser ranging for satellite on the second lagrange point of earth-moon system [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(2): 131-137. (in Chinese)
- [47] Wu Zhibo, Deng Huarong, Zhang Haifeng, et al. Interference and avoidance of atmospheric backscattering on satellite laser ranging with high repetition rate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0206002. (in Chinese)