

基于最小二乘与均值滤波的 GNSS 伪距单点定位精度分析

王亮¹ 曹诚² 胡敏¹ 胡启亮³

1 邵阳学院 2 湖南省第二测绘院 3 江苏省地质勘查技术院

DOI:10.32629/gmsm.v9i1.2414

[摘要] 全球导航卫星系统(GNSS)伪距单点定位技术因其操作简便、成本低廉和全球覆盖的特性,在导航与位置服务领域具有重要地位。本文系统阐述了GNSS伪距单点定位的基本原理,重点研究了基于最小二乘估计算法的定位解算模型,并详细分析了主要误差源及其改正方法。开发了一套伪距单点定位程序,处理了来自全球不同地区IGS基站的观测数据。实验结果表明,基于最小二乘的伪距单点定位精度可达10米级别,且定位精度受测站地理位置与时间变化的影响显著。为进一步提升定位结果的实用性,本文引入均值滤波算法对定位结果进行后处理平滑。结果表明,该滤波方法能有效抑制定位序列的高频噪声,提升定位结果的稳定性和平滑度,为改善伪距单点定位性能提供了一种有效的后处理思路。

[关键词] GNSS; 伪距单点定位; 最小二乘估计; 精度分析; 均值滤波

中图分类号: TN713 **文献标识码:** A

Analysis of GNSS pseudorange single-point positioning accuracy based on least squares and mean filtering

Liang Wang¹ Cheng Cao² Min Hu¹ Qiliang Hu³

1 Shaoyang University

2 Hunan Province Second Surveying and Mapping Institute

3 Jiangsu Provincial Institute of Geological Exploration Technology

[Abstract] Global Navigation Satellite System (GNSS) pseudorange single-point positioning technology holds significant importance in the field of navigation and location-based services due to its simplicity of operation, low cost, and global coverage. This paper systematically elaborates on the fundamental principles of GNSS pseudorange single-point positioning, with a focused investigation into the positioning solution model based on the least squares estimation algorithm. It also provides a detailed analysis of the primary error sources and their correction methods. A pseudorange single-point positioning program was developed to process observation data from IGS reference stations located in different regions worldwide. Experimental results indicate that the accuracy of least squares-based pseudorange single-point positioning can reach the meter level, and positioning accuracy is significantly influenced by the geographic location of the station and temporal variations. To further enhance the practicality of positioning results, this paper introduces a mean filtering algorithm for post-processing smoothing of the positioning outcomes. The results demonstrate that this filtering method effectively suppresses high-frequency noise in the positioning sequence, improving the stability and smoothness of the positioning results. This provides an effective post-processing approach for enhancing the performance of pseudorange single-point positioning.

[Key words] GNSS; Pseudorange Single-Point Positioning; Least Squares Estimation; Accuracy Analysis; Mean Filtering

引言

全球导航卫星系统(GNSS)已成为提供全天候、全球覆盖的定位、导航与授时服务的关键基础设施。在众多GNSS定位技术中,伪距单点定位因其模型简单、无需参考站支持、可实现绝对

定位等优点,在车辆导航、移动智能终端等对精度要求不高的领域广泛应用^[1]。伪距单点定位的核心是求解一组非线性观测方程,而最小二乘法因其原理直观、解算稳定,成为最常用的参数估计方法^[2]。

尽管高精度的相对定位(如RTK)和精密单点定位(PPP)技术发展迅速,但伪距单点定位在恶劣地理环境或成本敏感场景下,依然具有不可替代的优势^[3]。然而,由于观测噪声和多路径效应等因素,伪距观测值包含大量随机误差,导致最小二乘求解的定位结果存在波动性。为了提升其定位结果的平滑性与可用性,有必要在定位解算后引入数据滤波技术^[4]。均值滤波作为一种经典且计算高效的线性平滑方法,在抑制随机噪声方面具有明显效果^[5]。

本文旨在结合最小二乘估计与均值滤波技术,系统研究GNSS伪距单点定位的精度特性。通过自主开发定位解算程序,利用全球分布的IGS基站数据,分析最小二乘解的精度,并重点验证均值滤波在后处理阶段对提升定位稳定性的效果。

1 伪距单点定位基本原理与关键算法

1.1 伪距观测值与最小二乘估计

伪距观测方程可线性化为:

$$V = A \cdot \delta X - L \quad (1)$$

其中, V 为残差向量; A 为设计矩阵,其元素为各方向余弦;

$\delta X = [\delta x, \delta y, \delta z, c \cdot \delta t_r]^T$ 为待求的接收机坐标和钟差改正数向量; L 为观测值与计算值之差向量。

根据最小二乘原理,通过极小化残差平方和 $V^T P V$, 可得参数的最优解为:

$$\delta X = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (2)$$

通过迭代计算,直至改正数小于设定的阈值,最终得到接收机的精确坐标。该方法是本文定位解算的核心^[1]。

1.2 均值滤波算法

为改善最小二乘单点定位结果的波动性,本文采用均值滤波对解算出的坐标序列进行后处理平滑。对于一个长度为 n 的坐标序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 其在第 i 个历元经过均值滤波后的值 $\{\bar{x}_i\}$ 为:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=k}^{i+k} x_j \quad (3)$$

其中, $m = 2k + 1$ 为滤波窗口宽度(本文设置为30个历元,即15分钟)。该算法通过计算滑动窗口内的坐标平均值,有效滤除高频噪声,使定位轨迹更为平滑^{[2][3]}。

1.3 误差源分析与改正模型

GNSS伪距差分定位的误差主要来源于卫星、信号传播及接收机自身。对于卫星相关误差(如钟差、相对论效应),可通过广播星历改正和模型予以削弱;传播路径误差(如电离层与对流层延迟)分别采用双频组合与萨斯塔莫伊宁模型进行改正,而多路径效应则可通过设置卫星高度角阈值(如 $\geq 30^\circ$) 来减小。这些分析与改正模型为后续差分定位解算提供了重要的误差处理基础^[3]。

2 实验设计与精度分析

2.1 数据来源与处理流程

为评估伪距单点定位的实际性能,从IGS数据中心选取了四个分布在不同地理区域的测站(JFNG-中国、GAMB-法国、TASH-乌兹别克斯坦、ABPO-马达加斯加)2022年某日的观测数据(.obs)和广播星历(.nav)文件。

表1 实验数据基本信息

测站名	国家	接收机类型	天线型号
JFNG	中国	TRIMBLE ALLOY	TRM59800.00
GAMB	法国	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00
TASH	乌兹别克斯坦	SEPT ASTERX4	SEPCHOKE_B3E6
ABPO	马达加斯加	SEPT POLARX5	ASH701945G_M

其主要处理流程包括:读取RINEX格式的观测文件和广播星历文件,提取伪距观测值、卫星星历等必要信息;依次进行地球自转、卫星钟差、相对论效应、电离层(IF组合)、对流层等误差改正;根据广播星历参数,计算每一历元各卫星在WGS-84坐标系中的坐标;利用线性化后的观测方程和最小二乘法,迭代求解接收机的位置坐标和钟差。

2.2 定位精度整体评估

将四个测站全天的定位结果(每30秒一个历元)与IGS公布的测站参考坐标进行对比,统计其坐标偏差,并计算精度衰减因子(PDOP)。

表2 各测站最小二乘定位结果与精度指标

测站	参考坐标	定位坐标	PDOP	GDOP
JFNG	-2279829.1291	-2279834.1571	2.4149	2.8354
	5004705.4249	5004706.4566		
	3219778.0106	3219779.5110		
GAMB	-4147128.4039	-4147132.8711	2.4204	2.8352
	-4152219.6423	-4152229.7503		
	-2490038.3824	-2490039.1672		
TASH	1695945.1994	1695943.1500	2.2304	2.5949
	4487138.5684	4487141.9577		
	4190140.6931	4190144.0688		
ABPO	4097216.5539	4097218.9675	2.7948	3.2697
	4429119.1897	4429129.3121		
	-2065771.1988	-2065776.1905		

分析表2可知:所有测站的定位精度均在10米以内,验证了伪距单点定位在开阔环境下能够提供米级精度的定位服务。不同测站的定位精度存在差异。亚欧地区的JFNG、GAMB和TASH测站精度相对较高且稳定,而位于南非的ABPO测站定位精度明显更低,这与该站卫星几何构型较差(PDOP较高)密切相关。

2.3 定位精度随时间变化分析

以JFNG测站为例,将全天数据按2小时间隔分组,计算各时段的平均坐标偏差,结果如表3所示。分析表3可知,JFNG测站的定位精度在一天中呈现明显的规律性变化:午间(10:00-14:00):三个方向的坐标偏差最小,定位精度最高。清晨和夜间:坐标偏差较大,精度较低。这种变化与电离层延迟的日变化特性密切相关。午间太阳辐射强烈,电离层电子浓度高但其梯度变化相对平缓,且通过IF组合能有效消除大部分延迟;而清晨和黄昏时段,电离层处于变化剧烈的过渡期,模型改正残余误差较大,从而影响定位精度。

表3 JFNG测站不同时段坐标偏差统计(单位：米)

时段	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标
参考坐标	-2279829.1291	5004705.4249	3219778.0106
(0: 00-2: 00)	-2279835.0275	5004710.2031	3219783.3752
坐标偏差	-5.8984	4.7782	5.3646
(2: 00-4: 00)	-2279834.0452	5504709.3180	3219781.0248
坐标偏差	-4.9161	3.8931	3.0142
(4: 00-6: 00)	-2279834.6720	5004708.5668	3219780.0987
坐标偏差	-5.5429	3.1419	2.0881
(6: 00-8: 00)	-2279833.2392	5004707.7466	3219780.8421
坐标偏差	-4.1101	2.3217	2.8315
(8: 00-10: 00)	-2279833.9779	5004706.2674	3219778.7056
坐标偏差	-4.8488	0.8425	0.6950
(10: 00-12: 00)	-2279833.8706	5004705.5684	3219777.9557
坐标偏差	-4.7415	0.1435	-0.0549
(12: 00-14: 00)	-2279832.9502	5004705.7719	3219777.1848
坐标偏差	-3.8211	0.3470	-0.8258
(14: 00-16: 00)	-2279834.4618	5004705.3215	3219777.0739
坐标偏差	-5.3327	-0.1034	-0.9367
(16: 00-18: 00)	-2279833.5859	5004703.2448	3219779.4158
坐标偏差	-4.4568	-2.1801	1.4052
(18: 00-20: 00)	-2279835.2505	5004702.7621	3219779.1871
坐标偏差	-6.1214	-2.6628	1.1765
(20: 00-22: 00)	-2279834.3079	5004703.2045	3219779.6702
坐标偏差	-5.1788	-2.2204	1.6950
(22: 00-24: 00)	-2279834.4966	5004702.4840	3219779.5977
坐标偏差	-5.3675	-2.9409	1.5871

2.4 均值滤波对定位精度的改善

为评估均值滤波的效果,以JFNG测站为例,对最小二乘解算出的X方向坐标序列进行后处理。结果显示,经过均值滤波处理后,坐标序列的抖动显著减小,曲线变得更为平滑。计算表明,滤波后坐标序列的标准差降低了约30%。这证明,均值滤波作为一种简单的后处理手段,能有效改善由最小二乘解算出的定位结果的短期波动,显著提升其平滑度和稳定性。图1: 均值滤波对JFNG测站X方向坐标序列的平滑效果

3 结论与展望

通过系统评估了基于最小二乘与均值滤波的GNSS伪距单点定位精度。实验表明,采用最小二乘估计算法可实现10米量级的绝对定位,其定位结果易受卫星几何构型与电离层日变化影响而存在明显波动;引入均值滤波作为后处理手段能有效平滑定

位序列中的高频噪声,显著提升结果的稳定性与平滑度,验证了该算法在提升定位质量方面的有效性。同时,测站地理位置对精度影响显著,南半球ABPO测站因卫星几何构型较差,其定位精度明显低于北半球中纬度地区测站。基于上述研究成果,未来的研究可着眼于多系统深度融合、卡尔曼滤波等先进算法集成、随机模型精化以及自适应滤波技术等方面,以期在复杂环境下进一步提升定位性能与可靠性。

[参考文献]

[1]吕汉峰,吴杰,张良.两种伪距单点定位模型最小二乘解的等价性证明[J].国防科技大学学报,2014,36(1):34-40.

[2]Li F, Psimoulis P, Li Q, et al. Assessment accuracy of standard point positioning enhanced by observation and position domain filtering utilizing a multi-epoch least-squares integration method[J]. Remote Sensing, 2024, 16(3): 517.

[3]管庆林,樊春明,朱正平,等.单点定位中一种载波相位平滑伪距方法[J].测绘科学,2019,44(2):14-19.

[4]Lotfy A, Abdelfatah M, El-Fiky G. Improving the performance of GNSS precise point positioning by developed robust adaptive Kalman filter[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2022, 25(4): 919-928.

[5]Greiff M, Di Cairano S, Berntorp K. Adaptive smoothing with ambiguity fixation for GNSS post-processing[J]. IFAC-PapersOnLine, 2023, 56(2): 10276-10282.

作者简介:

王亮(1987—),男,汉族,辽宁葫芦岛人,硕士,讲师,主要从事卫星导航定位与卫星气象学等。