

GNSS 伪距差分定位及精度分析

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.v8i6.2384

[摘要] 随着全球定位系统(GNSS)的广泛应用,高精度定位需求日益增长。差分定位技术是提高GNSS定位精度的有效手段之一。本文基于伪距差分方法,设计并实现了GNSS差分定位程序,通过对比网平差处理后的数据,对定位精度进行了系统分析。实验结果表明,在300秒观测间隔下,伪距差分定位在X、Y、Z坐标方向及基线长度上的平均偏差分别为0.20m、0.35m、-0.31m和0.24m,中误差分别为1.29m、1.25m、1.56m和0.86m。研究证实,伪距差分定位方法原理简单、适用性强,定位精度可达分米级,具备较高的工程应用价值。

[关键词] GNSS; 伪距; 差分定位; 精度分析; 程序设计

中图分类号: TP311.1 **文献标识码:** A

GNSS Pseudo-Distance Difference Positioning and Its Accuracy Analysis

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] With the widespread application of Global Navigation Satellite Systems (GNSS), the demand for high-precision positioning is increasingly growing. Differential positioning technology is one of the effective methods to enhance GNSS positioning accuracy. This paper, based on the pseudorange differential method, designed and implemented a GNSS differential positioning program. The positioning accuracy was systematically analyzed by comparing the results with data processed through network adjustment. Experimental results indicate that with a 300-second observation interval, the average deviations of pseudorange differential positioning in the X, Y, Z coordinate directions and baseline length are 0.20 m, 0.35 m, -0.31 m, and 0.24 m, respectively, with corresponding root mean square errors of 1.29 m, 1.25 m, 1.56 m, and 0.86 m. The research confirms that the pseudorange differential positioning method features a simple principle and strong applicability, achieving decimeter-level positioning accuracy and demonstrating significant value for engineering applications.

[Key words] GNSS; Pseudorange; Differential Positioning; Accuracy Analysis; Program Design

引言

全球定位系统(GNSS)作为一种重要的卫星导航系统,已在测绘工程、导航定位、资源调查等领域得到广泛应用^[1]。随着技术的发展,对GNSS定位精度的要求也越来越高。然而,GNSS信号在传播过程中受到多种误差的影响,包括卫星钟差、星历误差、大气延迟、多路径效应等,这些误差严重制约了GNSS的定位精度。

差分定位技术是提高GNSS定位精度的有效方法之一。该技术通过在已知位置的基准站上计算误差改正数,并将其传输至移动站,对移动站的观测值进行修正,从而显著提高定位精度^[2]。伪距差分定位作为差分技术的一种重要形式,具有原理简

单、实现便捷、适用于中长基线等优点,被广泛应用于海上定位、GIS数据采集等领域^[3]。

近年来,国内外学者对伪距差分定位技术进行了深入研究。Peng Wu等人^[4]提出了一种针对轨迹优化的北斗单频伪距差分定位算法,通过高程相关的大气延迟修正,有效提高了弹载卫星接收机的差分定位精度。Cai C等人^[5]提出了双模式伪距差分定位方法,利用北斗/GNSS双模系统实现无人机的高精度定位和导航。在国内,GNSS伪距差分技术也得到了迅速发展,从最初仅提供简单的距离改正数和坐标改正数,发展到能够分离各种误差因素,并向用户提供卫星钟差改正、星历改正以及大气延迟模型等多种改正信息。

本文旨在设计并实现一套完整的GNSS伪距差分定位程序，通过实验数据分析其定位精度，为工程应用提供参考。研究内容包括伪距差分定位的理论基础、程序设计实现、精度分析方法以及实验结果讨论，旨在验证伪距差分定位技术的可行性和精度特性。

1 伪距差分定位理论与方法

1.1 GNSS系统概述

全球定位系统(GNSS)是由美国政府维护和运行的卫星导航系统，旨在提供全球范围内的精确定位、速度测量和时间信息。GNSS系统由三部分组成：空间段、控制段和用户段。GNSS定位的基本原理是通过测量接收机与多颗卫星之间的伪距，利用空间后方交会方法确定接收机的位置。伪距观测值包含了卫星信号传播时间信息，但由于各种误差源的存在，伪距并不是真实的卫星与接收机之间的距离，故称为“伪距”。^[6]

1.2 伪距差分定位原理

伪距差分定位是一种通过基准站和移动站之间的差分观测来消除或减弱共有误差的方法。其基本原理是：在已知精确坐标的基准站上，通过观测GNSS卫星信号计算出伪距观测值，并根据基准站已知坐标和卫星星历计算出的真实几何距离进行比较，得到伪距改正数。然后将这些改正数传输至移动站，从而提高移动站的定位精度^[7]。

基准站与卫星j之间的真实几何距离为：

$$R^j = \sqrt{(X' - X_0)^2 + (Y' - Y_0)^2 + (Z' - Z_0)^2} \quad (1)$$

其中， (X_0, Y_0, Z_0) 为基准站已知坐标， (X', Y', Z') 为卫星的地心坐标。

基准站观测得到的伪距为 ρ_0^j ，则伪距改正数为：

$$\Delta\rho^j = R^j - \rho_0^j \quad (2)$$

伪距改正数的变化率为：

$$d\rho^j = \Delta\rho^j / \Delta t \quad (3)$$

基准站将 $\Delta\rho^j$ 和 $d\rho^j$ 发送给用户，用户在测出的伪距

ρ^j 上加改正，求出改正后的伪距：

$$\rho_p^j(t) = \rho^j(t) + \Delta\rho^j(t) + d\rho^j(t - t_0) \quad (4)$$

最后，利用改正后的伪距，通过最小二乘法求解移动站坐标：

$$\rho_p^j = \sqrt{(X' - X_p)^2 + (Y' - Y_p)^2 + (Z' - Z_p)^2} + C \cdot \delta + V_1 \quad (5)$$

其中， δ 为钟差， V_1 为接收机噪声。

1.3 主要误差源分析

GNSS伪距差分定位的误差源可分为三类：一是多台接收机共有的误差(如卫星钟差、星历误差和相对论效应)，可通过差分技术基本消除；二是传播延迟误差(如电离层延迟、对流层延迟和多路径效应)，其差分效果随站间距离增大而减弱；三是接收机固有的误差(如接收机钟差、硬件延迟和测量噪声)，与硬件性能相关，难以通过差分完全消除。

2 程序设计与实验分析

2.1 程序算法设计与实现

本文基于MATLAB平台，采用模块化设计开发了GNSS伪距差分定位程序。程序主要包含数据读取、卫星坐标计算、伪距改正数计算、移动站坐标解算及精度分析五大功能模块，依次完成从读取RINEX格式观测与导航文件、计算卫星位置、生成差分改正数，到利用最小二乘法求解移动站坐标并进行精度评估的全流程。核心代码由主程序及相应的子程序构成，实现了完整的差分定位解算。

2.2 实验数据与处理

实验采用2023年10月13日上午9:55至10:55的静态观测数据，观测时长为1小时，采样间隔为1秒。实验数据包括两个测点：T070(基准站)和T068(移动站)，两点之间的实际距离约为448.1米。数据文件包括观测文件(O文件)和导航文件(N文件)，均采用RINEX标准格式存储。

表1 实验数据基本信息

点号	数据类型	文件名	数据来源
T070	观测文件、导航文件	35056281286B.230	校园内静态测量
		35056281286B.23N	
T068	观测文件、导航文件	35056301286B5.230	校园内静态测量
		35056301286B5.23N	

基准站T070的已知坐标为：

X: -2074915.2161m

Y: 5284080.2078m

Z: 2898372.3565m

数据处理过程分为三个主要步骤：

(1) 数据读取与卫星坐标计算：读取N文件和O文件，根据星历数据计算观测时间段内所有可见卫星的位置，得到三个 3336×13 的矩阵，分别表示卫星的X、Y、Z坐标；(2) 伪距改正数计算：计算基准站与各卫星之间的真实几何距离，并与伪距观测值比较，得到伪距改正数；(3) 移动站坐标解算：利用伪距改正数对移动站伪距观测值进行校正，采用最小二乘法求解移动站坐标，初始坐标设为 $[0, 0, 0]$ 。

2.3 精度分析结果

从3336组观测数据中，每300秒提取一组数据，共11组数据进行精度分析。将伪距差分定位结果与网平差处理结果进行对比，分析定位精度。

表2 伪距差分定位坐标与基线长度结果

基线长度(m)	时间(秒)	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
446.603141	300	425.811	106.307	82.691
448.762897	600	429.334	101.927	81.678
448.143469	900	427.809	104.796	82.643
448.685579	1200	428.486	103.897	83.211
447.258112	1500	426.852	104.269	83.459
449.176268	1800	428.716	104.679	83.691
447.864682	2100	428.165	102.697	81.921
448.935036	2400	429.573	102.347	80.836
448.008469	2700	427.425	104.006	84.864
449.562398	3000	430.383	103.103	79.035
448.330336	3300	428.188	104.032	82.656
448.086000	网平差结果	428.080	103.786	82.405

表3 伪距差分定位偏差统计

方向	平均偏差(m)	中误差(m)
X	0.20	1.29
Y	0.35	1.25
Z	-0.31	1.56
基线长度	0.24	0.86

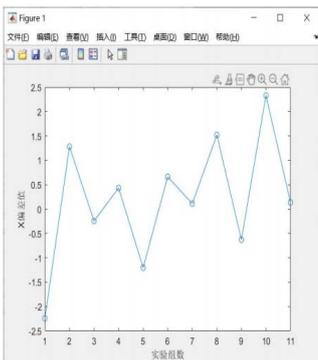


图1 X坐标偏差序列图

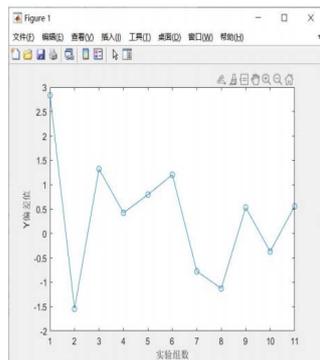


图2 Y坐标偏差序列图

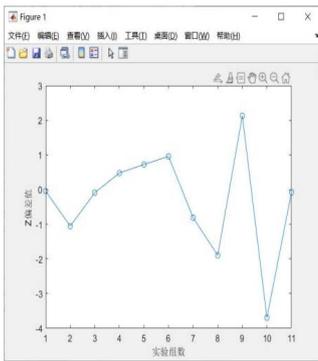


图3 Z坐标偏差序列图

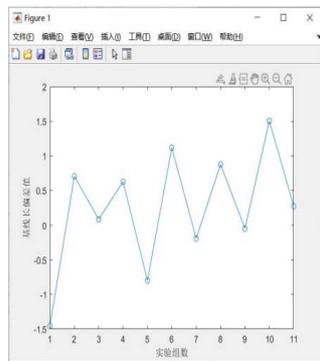


图4 基线长度偏差序列图

从精度分析结果可以看出：

(1)伪距差分定位在X、Y、Z三个方向上的平均偏差分别为

0.20 m、0.35m和-0.31m,中误差分别为1.29m、1.25m和1.56m,表明伪距差分定位具有较高的精度；(2)基线长度的精度最高,平均偏差为0.24m,中误差为0.86m,说明伪距差分定位在相对定位方面表现优异；(3)在X坐标方向,第300秒和第3000秒的偏差较大,分别达到-2.24 m和2.33m；在Y坐标方向,第300秒的偏差较大,为2.83m；在Z坐标方向,第2700秒和第3000秒的偏差较大,分别为2.13 m和-3.70m。这些异常值可能与多路径效应或大气条件变化有关；(4)整体来看,伪距差分定位的精度可达分米级,部分方向甚至接近厘米级,满足大多数工程应用的精度要求。

3 结论与展望

本文设计并实现了一套完整的GNSS伪距差分定位程序,实验结果表明该程序原理清晰、易于实现,定位精度较高,在X、Y、Z方向上的平均偏差分别为0.20m、0.35m和-0.31m,中误差分别为1.29m、1.25m和1.56 m,可达分米级精度；同时基线计算稳定,平均偏差为0.24m,中误差为0.86m,且只需一个已知基准站即可适用于各类中短基线测量场景。该程序在算法优化、多系统融合、实时定位等方面仍有进一步改进和拓展的空间。

[课题]

湖南省教育厅科学研究项目,基于GNSS与ERA5融合的湖南省高精度水汽建模机理研究(No.25C0553)。

[参考文献]

[1]Tang W, Cui J,Hui M, et al. Performance Analysis for BDS Phase-smoothed Pseudorange Differential Positioning[J]. Journal of Navigation,2016,69(5).

[2]Kang C.A Differential Dynamic Positioning Algorithm Based on GNSS/Beidou[J].Procedia Engineering,2016,137.

[3]邓潇.GNSS伪距差分技术研究[J].硅谷,2011(11):111-112.

[4]Wu P,Yang P, Yang S,et al.A BeiDou Single-Frequency Pseudo-range Differential Positioning Algorithm Optimized for Trajectory[J].Journal of Physics: Conference Series,2023,2460(1).

[5]Cai C,Wang F,Qiu Y.Dual Mode Pseudo-Range Differential Positioning Method[J].IOP Conference Series:Materials Science and Engineering,2019,677(5).

[6]刘基余.GNSS伪距差分定位及其特色——GNSS卫星导航定位方法之二[J].数字通信世界,2016(08):1-6.

[7]徐君毅,李金龙.基于观测值加权相位平滑伪距的北斗伪距差分定位[J].大地测量与地球动力学,2014,34(4):123-126.

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。