



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

北斗分米级广域差分增强系统用户端算法研究与实现

姓 名：王恒

学 号：1434899

所在院系：测绘与地理信息学院

学科门类：工学

学科专业：测绘科学与技术

指导教师：伍吉仓 教授

副指导教师：陈俊平 研究员

二〇一七年三月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of Engineering

**Realization of User Program with BDS
Decimeter-level Wide-area SBAS**

Candidate: Heng Wang

Student Number: 1434899

School/Department: College of Surveying and
Geo-Informatics

Discipline: Engineering

Major: Science and Technology of Surveying
and Mapping

Supervisor: Prof. Jicang Wu /Junping Chen

March, 2017

北斗分米级广域差分增强系统用户算法研究与实现

王恒

同济大学

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 是中国正在实施的自主发展、独立运行的全球卫星导航系统, 是继美国全球定位系统 (GPS)、俄罗斯格洛纳斯卫星导航系统 (GLONASS) 之后第三个成熟的卫星导航系统。2012 年 12 月 27 日, 北斗系统空间信号接口文件正式版 1.0 正式公布, 北斗导航业务正式对亚太地区提供无源定位、导航、授时服务。北斗系统由 14 颗卫星组成, 包括 5 颗地球同步轨道卫星、5 颗倾斜地球同步轨道卫星以及 4 颗中圆地球轨道卫星。由于北斗系统的星座构成较为特殊, 利于实现基于广域差分技术的星基增强业务, 使用户能够获得廉价而方便的高精度定位服务。本文开展了北斗分米级广域星基增强系统用户端程序的研究工作, 主要包括:

1、介绍了北斗定位的基本理论, 分析了北斗非差定位的各项误差, 并给出了相应的处理方法。对北斗广域星基增强参数及其使用方法进行了说明。

2、分双频和单频对北斗实时非差定位的周跳探测进行了研究, 分析了多种方法的优劣, 提出综合运用多种方法进行周跳探测。在使用组合观测值进行周跳探测时, 提出利用滑动窗口进行动态阈值设置, 可以提高周跳探测效率, 同时减少因误探测造成的模糊度反复初始化。

3、介绍了动态非差定位的常用参数估计方法, 重点介绍了卡尔曼滤波算法。研究了 Kalman 滤波初值解算过程中, 基于最小二乘残差的故障探测方法, 可以有效剔除伪距粗差, 提高初值解算的可靠性, 提升系统的完好性。

4、编写完成了北斗分米级广域星基增强系统用户端程序, 并利用该程序进行了大量实测数据验证, 分别验证了单频和双频的动态定位性能, 并与未使用系统改正参数的定位结果进行了对比, 对其收敛时间和收敛精度进行了分析。

关键词: 北斗, 星基增强, 周跳探测, 参数估计, 用户端

ABSTRACT

BeiDou Navigation Satellite System (BDS) is a self-developed, independent operation of the global satellite navigation system of China, which is the third mature satellite navigation system after the United States Global Positioning System (GPS) and the Russian GLONASS. As the spatial signal interface file (version 1.0) of Beidou system was released on December 27, 2012, Beidou system began to provide passive positioning, navigation and timing services in the Asia-Pacific region. The Beidou system consists of 14 satellites, including five geosynchronous orbit satellites, five inclined geostationary satellites and four medium earth orbit satellites. As the Beidou system constitutes a special satellite constellation, which is conducive to the realization of the satellite-based business based on wide-area differential technology, so that users can get cheap and convenient high-precision positioning services. This paper carries out the work of user program design and realization for Decimeter-level positioning using BDS wide-area SBAS corrections, the main work include:

1. The basic theory of positioning with Beidou system is introduced, and the errors of Beidou non - difference positioning are analyzed, and the corresponding processing methods are given. The parameters of the BDS Wide-area SBAS are explained and the usage method is introduced.

2. The methods of cycle slip detection of both dual-frequency and single-frequency are analyzed. A combination of several methods of cycle slip detection with different advantages and disadvantages is suggested. When using the combined observation value to carry out the cycle jump detection, it is proposed to use the sliding window to set the dynamic threshold, which can improve the efficiency of the cycle slip detection and reduce the frequency of reinitializing ambiguity caused by false detection.

3. The common methods of parameter estimation of kinematic non-difference positioning are introduced, especially the Kalman filter. In this paper, the fault detection method based on least squares residuals in Kalman filter initial calculation process can effectively eliminate the error in pseudorange, improve the reliability of the initial value and improve the integrity of the system.

4. The user program for the realization for Decimeter-level positioning using BDS Wide-area SBAS corrections are developed, and a large number of

measurements are test. The performance of kinematic positioning of both single-frequency and dual-frequency is verified by the developed user program, and the results are compared with those of standard positioning with system correction parameters unused. As a result, the convergence time and precision are analyzed.

Key Words: Beidou system, SBAS, cycle slip detection, user program

目录

第 1 章 引言	1
1.1 概述	1
1.2 研究现状及发展趋势	2
1.3 研究内容及意义	3
第 2 章 定位数学模型与误差分析	5
2.1 北斗系统的特性	5
2.1.1 时间系统	5
2.1.2 坐标系统	5
2.1.3 信号特征	5
2.1.4 星座架构	6
2.2 观测模型	6
2.3 误差项分析与处理	7
2.3.1 与卫星有关的误差	7
2.3.2 与信号传播有关的误差	11
2.3.3 与接收机有关的误差	13
2.4 差分增强改正信息	14
2.4.1 等效钟差及轨道改正	15
2.4.2 分区综合改正数	15
2.4.3 电离层延迟改正	15
2.5 本章小结	17
第 3 章 周跳探测与处理	18
3.1 双频周跳探测	18
3.1.1 无几何组合 (Geometry-free)	18
3.1.1 M-W 组合 (Geometry-free)	20
3.2 单频周跳探测	22
3.2.1 多项式拟合法	22
3.2.2 伪距/相位组合法	23
3.3 周跳探测阈值设置	25
3.4 周跳处理与算例分析	26
3.5 本章小结	31
第 4 章 动态定位的参数估计方法	32
4.1 序贯最小二乘法	32
4.2 Kalman 滤波	34
4.2.1 Kalman 滤波初值解算	35

4.2.2 Kalman 滤波的更新	37
4.3 算例分析	38
4.3.1. 最小二乘法和 Kalman 滤波法	38
4.3.2. Kalman 滤波故障检测	39
4.4 本章小结	41
第 5 章 程序实现和算例分析	43
5.1 用户端程序设计	43
5.2 基于广域增强信息的精密定位算例	45
5.2.1 参考站数据验证	45
5.2.2 非参考站数据验证	55
5.3 精度评定	61
5.4 本章小结	64
第 6 章 结论与展望	65
6.1 结论	65
6.2 进一步工作的方向	65
致谢	67
参考文献	68
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果	70

第 1 章 引言

1.1 概述

从 GPS 自 1978 年投入运行以来, 卫星定位技术发展至今已经有近 40 年时间^[1]。目前已建成或在建的全球卫星导航系统包括美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 Galileo 以及中国的北斗卫星导航系统 (BDS), 统称为 GNSS^[2]。传统的高精度定位应用通常采用差分相对定位的方法, 利用两台或两台以上接收机进行同步观测, 构成固定或移动基线, 通过观测值之间做单差或双差消除基站和流动站之间的一些公共误差, 达到提高定位精度的目的^[3]。

差分定位分为局域差分 and 广域差分^[4]。局域差分覆盖范围较小, 基站之间的距离较近, 它是通过位置差分或距离差分, 将观测值中的各种误差合并在一起形成差分改正数发送给流动站接收机进行定位解算。局域差分存在明显的空间局限, 当距离增大时, 与空间相关的一些误差, 如电离层、对流层影响, 将会出现较大差异, 距离越大差异越显著, 此时差分对这些误差的削弱作用就会大大降低。为了提高服务效果, 必须增加基站的数量, 这会给系统成本带来极大考验, 且在我国很多地区不具备密集布设基站的条件, 系统的可用性就会受到限制。广域差分采用了不同的差分思路^[5], 它是通过将覆盖区域内的误差进行分类, 例如星历误差、卫星钟差、电离层误差等等, 形成差分改正信息, 再将这些改正信息发送给用户接收机进行高精度定位。广域差分系统只需要布设相对少量的基站即能达到较高的定位精度, 用户定位精度随着与基站距离的增加不会显著下降, 因此作用的距离可以很远, 特别是针对偏远地区应用。在这种情况下, 广域差分系统的局限性主要是数据通信传输, 远距离通信需要有相应的软硬件支持, 为解决这一问题, 广域差分星基增强系统 (SBAS) 逐渐发展起来^[6]。

广域差分星基增强系统主要由地面参考基站、主控站、注入站和地球同步轨道卫星 (GEO) 组成^[7, 8]。参考站将原始观测数据传送至主控站, 后者据此计算出模型化的差分改正信息, 通过注入站上传至轨道上的 GEO 卫星, 再由 GEO 卫星播发给用户使用。由于该系统具有信号覆盖范围广、对用户端要求低 (差分信息采用的信号与 GNSS 卫星信号相同, 无需增加硬件负担) 等优点^[9], 如今越来越受到人们的重视。目前国际上广域差分增强系统主要包括美国联邦航空局 (FAA) 的广域增强系统 (WAAS)、欧洲卫星服务提供商 (ESSP) 的欧洲地球同步轨道卫星导航覆盖服务 (EGNOS)、日本民航局 (JCAB) 的多功能卫星增强系统 (MSAS) 和准天顶卫星导航系统 (QZSS)、印度的 GPS 辅助地球同步轨道卫星增强导航

(GAGAN)、俄罗斯的 GLONASS 差分改正与监测系统 (SDCM) 等, 这些增强系统使用的原理基本类似, 如图 1.1。

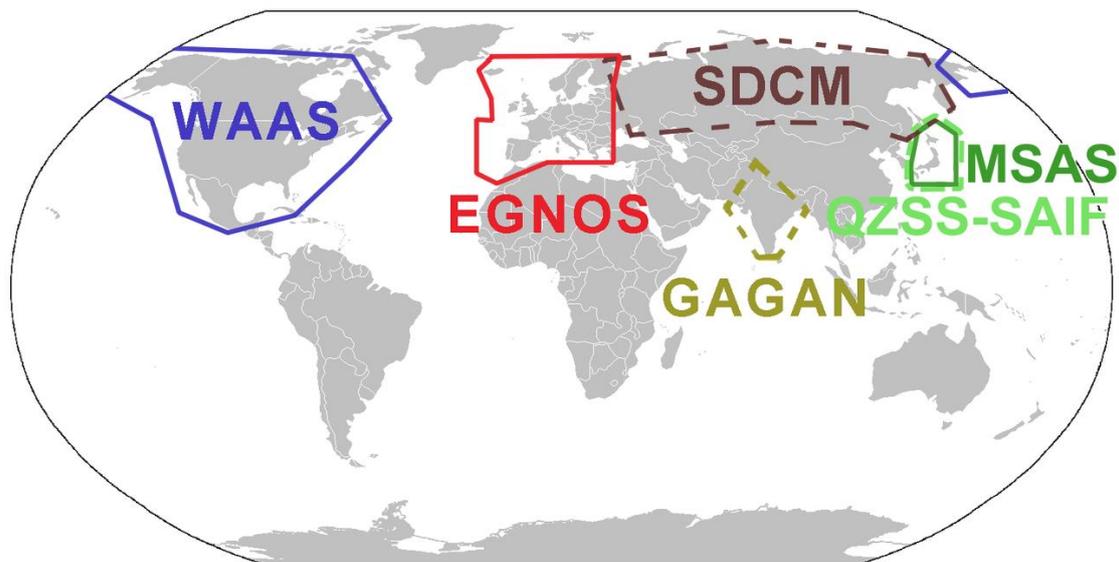


图 1.1 全球主要的星基增强系统

1.2 研究现状及发展趋势

自 1994 年开始, 美国联邦航空局联合美国交通运输部 (DOT) 开始了广域增强系统 (WAAS) 的研制^[8], 旨在提升 GPS 系统的精度、完好性和可用性, 为 I 类仪表着陆系统 (ILS) 提供导航服务 (Federal Aviation Administration (FAA) FAQ for WAAS)。至 2007 年 10 月, 该系统由 38 个地面站, 3 个主控站, 2 个上行注入站, 3 颗商业卫星以及地面通讯网络组成。WAAS 主控站会根据参考站传来的数据计算生成两种不同的改正数, 一种是快速改正数, 更新率较高, 主要包含 GPS 卫星的瞬时位置和钟差; 另一种是所谓的慢速改正数, 包括了长时间估计的星历和钟差, 以及电离层信息。用户先使用快速改正数固定粗略位置, 然后再使用慢速改正数去获得精确的坐标解。由于播发增强改正信息的地球同步轨道卫星使用的信号与 GPS 信号相同, 所以这些信号也可以被用来作为观测数据, 相当于增加了卫星数, 这样就提高了系统的可用性。在精密近进应用中, WAAS 提供的最低精度为水平方向 7.6m, 高程方向 7.6m; 系统实测最优精度为水平方向 0.9m, 高程方向 1.3m。

欧洲地球同步轨道卫星导航覆盖服务 (EGNOS) 是由欧空局、欧洲委员会以及欧洲空中导航安全组织联合开发的, 同时针对 GPS、GLONASS 和 Galileo 三个卫星导航系统的星基增强系统。该系统包含 40 个以上地面站和 3 颗地球同步轨道卫星。2005 年 7 月, EGNOS 正式开始初始运行, 定位精度优于 2m, 可用性高

于 99%。该系统主要也是面向航空领域的用户。

多功能卫星增强系统 (MSAS) 是由日本民航局组织开发的一个针对 GPS 系统的区域增强系统, 旨在提高 GPS 信号的可靠性和精度, 航空领域应用已于 2007 年 9 月 27 日开始实施。该系统将 GPS 定位精度从大约 20m 提高到 2m 以内。

由印度政府开发的 GPS 辅助地球同步轨道卫星增强导航 (GAGAN) 是一个区域星基增强系统。该系统包含了 15 个参考站, 3 个主控站, 3 个上行注入站以及 3 颗地球同步轨道卫星。GAGAN 的主要目的也是为了帮助飞行员在印度空域进行导航, 使得飞行器在恶劣天气或者机场条件较差的情况下能够安全进场着陆。该系统的定位精度在 3m 左右。

北斗卫星导航系统 (BDS) 是我国自行研制的全球卫星导航系统^[10], 2000 年开始发射试验卫星进行验证, 2007 年开始发射正式的北斗导航卫星, 到 2012 年底, 正式开始提供服务, 系统由 14 颗卫星组成, 包括 5 颗地球静止轨道卫星 (GEO)、5 颗倾斜地球同步轨道卫星 (IGSO) 和 4 颗中圆地球轨道卫星 (MEO)^[11]。由于北斗卫星导航系统采用的是复合星座, 其中包含了 GEO 卫星, 为后续开展广域差分增强系统的研究建设预留了条件, 而不用像其他卫星导航系统那样使用额外的 GEO 卫星。

1.3 研究内容及意义

本文基于北斗分米级广域差分增强试验系统, 利用该系统播发的高精度差分改正信息进行单站定位验证, 对周跳探测、抗差迭代以及滤波参数设置等问题进行了分析和研究。具体章节安排如下:

第一章为引言部分, 介绍了广域差分增强系统的发展背景及研究现状。

第二章介绍了利用相位进行精密单点定位的基本原理, 对定位过程中涉及到的各种误差项进行了分析, 介绍了北斗广域差分增强的差分改正信息, 对误差项进行了处理。

第三章介绍了几种周跳探测方法, 包括双频无几何组合法、MW 组合法以及单频多项式拟合法、伪距/相位组合法。分析了不同方法的优劣, 通过配合使用提高探测效率。提出使用动态的阈值设置策略, 通过滑动窗口动态调整阈值, 可以更好地适应不同情况下的观测数据, 提高了周跳的可探测性。

第四章介绍了常用的动态 PPP 参数估计方法, 包括序贯最小二乘法和 Kalman 滤波。重点介绍了 Kalman 滤波算法, 对滤波初值计算进行了讨论, 使用基于最小二乘残差的故障探测方法, 可以有效剔除伪距粗差, 提高解算的可靠性。

第五章介绍了作者编写的基于北斗分米级广域差分增强系统的用户端算法,

给出了算法的运行流程，对定位的精度和收敛时间进行了分析。实验结果表明，利用该系统播发的差分改正数，采用本算法进行动态 PPP 解算，双频可以实现分米级精度，单频可以实现亚米级精度。

第六章对本文的主要工作进行了总结，给出了今后需要进一步研究的工作。

第 2 章 定位数学模型与误差分析

本章主要阐述了基于北斗分米级广域差分增强改正信息进行定位的基本知识，包括：北斗系统的特性，定位采用的数学模型，随后将分析定位中涉及的各项误差源及相应的处理措施。

2.1 北斗系统的特性

卫星导航定位的基本任务是通过卫星测距信号来获取待定点位的位置信息。目前关于导航定位的理论知识多数来源于 GPS 系统，本文涉及的北斗系统在定位原理上与之基本相同，但也存在一些区别，下面主要从时间系统、坐标系统、信号特征以及星座特征几个方面简单介绍北斗系统的相关特性。

2.1.1 时间系统

北斗卫星导航系统采用的时间系统为北斗时，它是一种连续的时间系统，不存在跳秒。北斗时的起点为协调世界时（UTC）时间 2006 年 1 月 1 日零时整。北斗时与 UTC 时间的偏差控制在 100ns 以内，此外，北斗导航电文中可以查询到北斗时与 UTC 时间之间更精确的偏差。北斗观测文件使用的时间系统就是北斗时。

2.1.2 坐标系统

北斗系统采用的坐标系为 2000 国家大地坐标系（CGCS2000），它是通过我国 GPS 连续运行基准站、空间大地控制网以及天文大地网与空间大地网联合平差建立的地心大地坐标系^[12]。2000 国家大地坐标系以 ITRF97 参考框架为基准，参考框架历元为 J2000.0。与之相关的一些主要参数如下：

长半轴 $a = 6378137\text{m}$;

地球引力常数 $GM = 3.986004418 \times 10^{14} \text{m}^3/\text{s}^2$;

地球自转角速度 $\omega = 7.292115 \times 10^{-5} \text{rad/s}$;

扁率 $f = 1/298.257222101$ 。

2.1.3 信号特征

北斗卫星导航系统采用了三个波段的频率，分别为 E2（B1）、E5B（B2）以及 E6（B3），在每种频率下又包含两个正交的子信号，分别称为“I”支路和“Q”支路。“I”支路测距码较短，被用作公开服务；“Q”支路测距码较长，因此抗干

扰能力更强，被用作限制用户服务。北斗系统信号特征如表 2.1。

表 2.1 北斗系统信号特征

参数	E2-I	E2-Q	E5B-I	E5B-Q	E6-I	E6-Q
一般标识	B1	B1	B2	B2	B3	B3
载波频率 Mhz	1561.098	1561.098	1207.14	1207.14	1268.52	1268.52

2.1.4 星座架构

不同于 GPS 系统所有卫星处在相同高度（约 20200km）的轨道，北斗系统采用了独特的复合星座系统^[13]，包括了静止地球轨道（GEO，约 36000km）、倾斜同步轨道卫星（IGSO，约 36000km）以及中地球轨道卫星（MEO，约 22000km）。在计算卫星坐标的时候，IGSO 和 MEO 卫星的坐标计算方法与 GPS 类似，GEO 卫星的坐标计算方法相对复杂一点，主要表现在将卫星轨道面内坐标转换到 CGCS2000 坐标的过程。

GEO 卫星的轨道倾角为零度，因此，它的升交点赤经和近地点角距无法确定。为此专门定义了一个坐标系作为过渡，过渡坐标系的定义是将星历参考时刻 t_{oe} 时的 CGCS2000 坐标系统 X 轴逆时针旋转 5° ，这样 xy 平面就不再与赤道平面重合。将 GEO 卫星的星历参数表达在这个过渡坐标系中，然后再将卫星坐标从过渡坐标系中转换到 CGCS2000 坐标系下^[5]。

2.2 观测模型

由于相位观测值拥有更高的精度，精密单点定位通常同时采用伪距观测值和相位观测值。相位和伪距的基本观测方程为^[14]

$$\Phi_r^s = \rho_r^s + (dt_r(t_r) - dt^s(t^s)) \cdot c - I_r^s + T_r^s + A_r^s + \xi + \phi_\oplus + b_\oplus + \varepsilon_\oplus \quad (2.1)$$

$$P_r^s = \rho_r^s + (dt_r(t_r) - dt^s(t^s)) \cdot c + I_r^s + T_r^s + \xi + b_p + \varepsilon_p \quad (2.2)$$

双频一般采用无电离层组合观测值，该组合最显著的特征是消除了电离层延迟的影响，其基本模型为

$$\begin{aligned} \Phi_{r,IF}^s &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_{r,1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_{r,2}^s \\ &= \rho_r^s + (dt_r(t_r) - dt^s(t^s)) \cdot c + T_r^s + A_{r,IF}^s + \xi + \phi_\oplus + b_\oplus + \varepsilon_\oplus \quad (2.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{r,IF}^s &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{r,1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{r,2}^s \\
 &= \rho_r^s + (dt_r(t_r) - dt^s(t^s)) \cdot c + T_r^s + \xi + b_p + \varepsilon_p
 \end{aligned} \quad (2.4)$$

单频则采用了半和组合观测值，也是出于消除电离层延迟考虑，但同时会放大观测噪声，使得相位观测噪声增大为约伪距噪声的 0.5 倍，公式表示为^[15]

$$\Phi_{r,LC}^s = \frac{\Phi_r^s + P_r^s}{2} = \rho_r^s + (dt_r(t_r) - dt^s(t^s)) \cdot c + T_r^s + A_{r,LC}^s + \xi + \phi_{LC} + b_{LC} + \varepsilon_{\Phi} \quad (2.5)$$

式中， Φ 表示按距离表达的相位观测值， P 表示伪距观测值，上标 s 为卫星标识，下标 r 为接收机标识，下标 IF 表示组合观测值为无电离层组合 (Ionosphere-Free)，下标 LC 表示相位伪距组合观测值， f 表示载波频率， ρ 表示卫星与接收机之间的几何距离， $dt_r(t_r)$ 表示接收机钟面时刻 t_r 时的接收机钟差， $dt^s(t^s)$ 表示卫星钟面时刻 t^s 时的卫星钟差， c 表示真空状态下的光速， I 表示电离层延迟， T 表示对流层延迟， A 为按距离表达的非整数的模糊度， ξ 表示固体潮、相对论效应、天线相位中心等引起的一类误差， ϕ 表示天线相位缠绕， b_{Φ} 表示硬件延迟， b_p 表示差分码偏差 (DCB)， ε_{Φ} 和 ε_p 分别表示相位和伪距观测噪声。

2.3 误差项分析与处理

精密单点定位有别于差分相对定位的最大特点就是仅需要单台接收机即可进行较为精确的定位服务，因此需要对定位过程中涉及到的各种误差逐一考虑，通过模型化或者参数估计等方式进行处理。

2.3.1 与卫星有关的误差

1). 星历误差

或者称为轨道误差，是指根据卫星星历求解的卫星轨道与真实卫星轨道之间的偏差^[16]。由导航电文提供的星历称为广播星历，在实时定位应用中，它是必不可少的。卫星星历误差的大小取决于轨道计算的数学模型、定轨软件、地面跟踪网的规模、地面跟踪站的分布及跟踪站数据观测时间的长度等因素^[17]。北斗广播星历目前的精度大约是 2.5m。为消除星历误差，一方面可以采用精密星历。国内外一些机构都提供相关的产品，常见的由 IGS 发布的精密星历，包括超快速星

历、快速星历和最终星历。这几类星历的时延和精度各不相同，一般时延越长，精度越高^[18]。另一种方法是利用区域跟踪站，运用差分技术解算卫星轨道改正信息，并对广播星历进行改正。本文即属于后者，这种方法更适合实时定位应用。

2). 卫星钟差

卫星上搭载的原子钟控制着卫星上所有与时间相关的活动运行。尽管原子钟非常稳定，但卫星钟的钟面时与 GNSS 时之间仍然存在偏差，这种偏差最多可达 1ms（相当于约 300km 的等效距离偏差），因此必须对其进行处理。单用户站对卫星钟的改正可以通过广播星历或采用精密钟差来实现。

广播星历中包含了卫星钟差改正参数，用户接收机通常采用一个二阶多项式来计算卫星钟差：

$$\delta t_{clk} = a_{f0} + a_{f1}(t - t_{oc}) + a_{f2}(t - t_{oc})^2 + \Delta t_r \quad (2.6)$$

式中：

- a_{f0} 为钟偏(s)，
- a_{f1} 为钟漂(s/s)，
- a_{f2} 为频漂s/s²，
- t_{oc} 为参考时刻(s)，
- t 为当前历元(s)，
- Δt_r 为相对论效应改正。

这些参数是采用曲线拟合预报钟差计算出来的，因此还残留一些误差。当前的 GPS 广播星历钟差残差约为 2~3 ns（相对于 IGS 快速产品，2016），等效距离误差约为 0.6~0.9 m。北斗 GEO 卫星广播星历钟差精度优于 6 ns，IGSO 和 MEO 卫星广播星历钟差优于 4 ns^[19]。广播星历钟差残差与卫星类型和星历数据的龄期有关。由钟差残差引起的距离误差在主控站刚将参数上载至卫星时最小，随后逐渐增大直至下一次数据上载^[20]。使用广播星历对卫星钟差进行改正的优点是实时性好，缺点是精度稍差。

为提高钟差改正精度，一方面可以采用精密钟差产品对卫星钟差进行改正，针对 GPS 系统，目前有 IGS 提供的卫星钟差，其技术指标见表 2.2。

表 2.2 IGS 卫星钟差技术指标

星历类型	精度	时延	更新率	采样间隔	
广播星历	RMS	~5 ns	实时	——	每天
	SDev	~2.5 ns			
超快星历（预测）	RMS	~3 ns	实时	每天 3、9、15、21 时（UTC）	15 min
	SDev	~1.5 ns			
超快星历（观测）	RMS	~150 ps	3 - 9 小时	每天 3、9、15、21 时（UTC）	15 min
	SDev	~50 ps			
快速星历	RMS	~75 ps	17 - 41 小时	每天 17 时（UTC）	5 min
	SDev	~25 ps			
最终星历	RMS	~75 ps	12 - 18 天	每周四	30 s
	SDev	~20 ps			

一般采用线性插值可以得到需要时刻的钟差改正。

本文北斗系统定位采用的是广域差分计算得到的等效钟差改正，可以有效提高卫星钟差的准确性，由于更新率很短，适合于实时定位应用。

3). 卫星天线相位中心误差

卫星天线相位中心到卫星质心的偏差称为卫星天线相位中心误差^[21]。天线相位中心是观测值实际量测的点，但天线相位中心并不是一个真实存在的点，且位置不固定，实际计算中会引入一个有确定几何位置关系的点，称为天线参考点，在卫星端即质心。因此需要将天线相位中心归算到天线参考点上。天线相位中心的位置与高度角、方位角、信号频率等因素有关，为此定义了一个平均天线相位中心，平均天线相位中心与卫星质心之间的偏差称为相位中心偏差（PCO），天线相位中心与平均天线相位中心之间的偏差称为相位中心变化（PCV）。如图 2.1 所示：

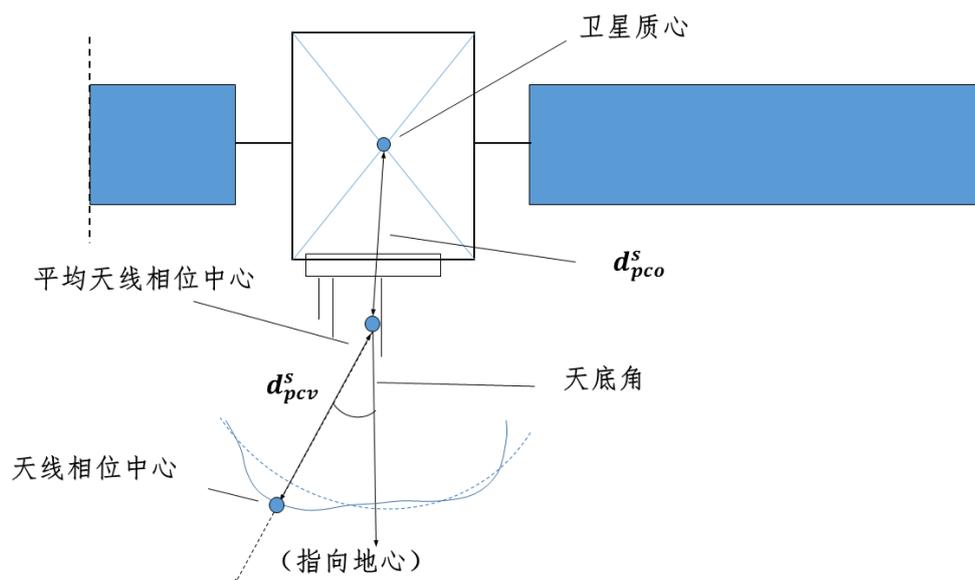


图 2.1 卫星天线相位误差示意图

IGS 提供的 ANTEX 文件给出了卫星 PCO 和 PCV 的改正参数，其中也包含了可供北斗卫星使用的参数，可据此对其进行改正。

4). 相对论效应

凡是系统的信号发射源和信号接收端处于选定的时间惯性坐标框架（如地心惯性系）中，该系统就会受到狭义相对论效应的影响；凡是系统的信号发射源和信号接收端处在不同的重力势，该系统就会受到广义相对论效应的影响。卫星钟同时受到狭义相对论效应和广义相对论效应的影响。为此，卫星钟的频率（以 GPS 卫星为例）在卫星发射前被预先调整到 10.22999999543MHz，则在海平面附近的用户观测到的频率为 10.23MHz，这样用户就不必再改正此影响带来的误差。

5). 卫星硬件延迟

由卫星硬件引起的延迟称为硬件延迟，又称为差分码偏差（DCB）。具体来说，位于不同载波频率上的卫星信号存在不同的信号通道，因而信号传播过程不能严格保持同步。广播星历中提供了绝对改正量给用户进行硬件延迟的改正，这个改正量称为群延迟（ T_{gd} , group delay）。GPS 广播星历中给出了 $L_1 - L_2$ 之间的群延迟。由于其广播星历给出的钟差预先考虑了无电离层组合情况下的硬件延迟，因此使用双频无电离层组合观测值的用户无需再考虑作此改正，其它情况下（如使用单频进行定位）则需要作相应改正。北斗广播星历中的群延迟参数有两个，记为 T_{gd, B_1-B_3} 、 T_{gd, B_2-B_3} ，分别对应 B_1 和 B_2 频点的改正，因此只有在用 B_3 频点单频定位时无需考虑此项改正，其它情况下均需要考虑作相应的改正。

此外，硬件延迟还可以通过其它机构提供的高精度 DCB 产品进行改正，DCB 是做电离层分析的一个附属产品，目前像 CODE 等 IGS 的分析中心会提供基于全球电离层分析的 DCB 产品，国内也有很多单位通过类似的方式计算适合北斗系统的 DCB 产品。

2.3.2 与信号传播有关的误差

1). 电离层延迟

电离层是主要分布在地表以上 70~1000km 大气层中的弥散介质。在这一区域，来自太阳的紫外线电离了一部分气体分子并释放出自由电子。这部分自由电子影响了电磁波的传播，包括 GNSS 卫星信号传播。需要指出的是，伪距观测值和相位观测值受到的电离层影响大小相等，但符号相反。根据这一特性，在单频定位时，可以构造半和观测方程，消除电离层影响，但伪距观测方程仍然需要改正电离层延迟。电离层延迟的改正模型有很多，常用的有利用广播星历提供的八参数 Klobuchar 模型，单层格网模型^[22]。双频用户可以通过组成双频无电离层组合观测值消除电离层延迟的影响。

2). 对流层延迟

对流层分布在大气层中较低的区域，对频率在 15GHz 以下的电磁波是非弥散介质。在对流层中，不同频率上的相速度和群速度是相等的，都被同等幅度地延迟。对流层延迟与频率无关，而与气温、气压以及相对湿度有关。由对流层延迟引起的等效距离在天顶方向可以达到 2.4m，在高度角 5° 时则会达到 25m（当用户位于海平面高度时）。因此必须对对流层延迟进行改正。

对流层延迟可通过模型进行改正，常用模型包括 Hopfield 模型、Saastamonien 模型、Black 模型等^[23]，在高精度定位中通常对对流层静力学延迟部分用模型进行改正，而将天顶湿延迟或总延迟作为参数进行估计。本文采用 Saastamonien 模型估计静力学延迟部分，对天顶总延迟进行参数估计。

Saastamonien 模型表达如下：

$$T_r^s = \frac{0.002277}{\cos z} \left\{ p + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - \tan^2 z \right\} \quad (2.7)$$

式中，

$p = 1013.25 \times (1 - 2.2557 \times 10^{-5} h)^{5.2568}$ (mbar) 为测站大气压强；

$T = 18.0 - 6.5 \times 10^{-3} h + 273.15$ (K) 为测站绝对温度；

$$e = 6.108 \times \exp\left\{\frac{17.157 - 4684.0}{T - 38.45}\right\} \times \frac{humi}{100} \quad (\text{mbar}) \quad \text{为测站水汽分压;}$$

h 为测站大地高;

$humi$ 为相对湿度;

z 为天顶角。

计算天顶静力学延迟时令相对湿度 $humi = 0$, 天顶角 $h = 0$ 。估计天顶总延迟时选用的映射函数通常有 NMF 投影函数、VMF1 映射函数以及 GMF 投影函数^[24]。本文采用的是 NMF 映射模型, 它综合考虑了纬度变化、季节变化和测站高程变化, 计算时无需实测气象数据^[25], 适合实时定位应用。

3). 地球自转改正

GNSS 信号自发射到信号抵达接收机的传播过程中地球会发生自转, 当计算卫星在地心地固坐标系下的坐标时会产生一个误差, 该误差称为 Sagnac effect, 如图 2.2 所示, 对该误差进行的改正就称为地球自转改正。

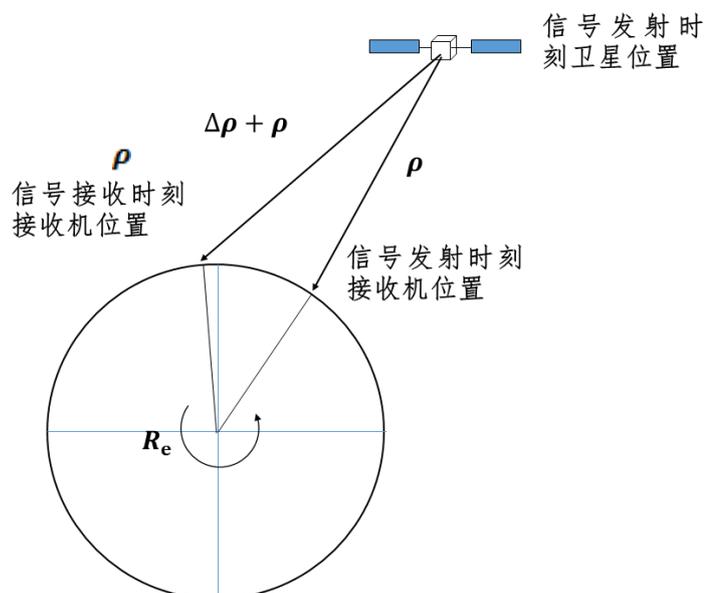


图 2.2 地球自转效应

如图 2.2 所示, 地球自转效应可能导致信号传播时间增加也可能导致信号传播时间减少, 取决于地球自转使得接收机到卫星间的距离变长还是变短, 由此引起最多 30m 的位置误差^[26]。地球自转改正的实现方法有很多, 精度也足够高, 本文采用式 2.8 进行改正:

$$\rho_r^s = \|r_r(t_r) - r^s(t^s)\| + \frac{\omega_g}{c} (x^s y_r - y^s x_r) \quad (2.8)$$

式中,

ρ_r^s 表示卫星天线相位中心到接收机天线相位中心的几何距离;

$r_r(t_r) = (x_r, y_r, z_r)^T$ 表示在信号接收时刻的接收机坐标 (地心地固坐标系下);

$r^s(t^s) = (x^s, y^s, z^s)^T$ 表示在信号发射时刻的卫星坐标 (地心地固坐标系下);

ω_g 为地球自转角速度, 其值为 $7.2921151467 \times 10^{-5}$ rad/s;

c 为真空中的光速, 其值为 299792458.0 m/s。

4). 多路径效应

理想情况下, 我们希望 GNSS 信号自卫星发射后沿一条最短路径 (大气折射考虑在内) 抵达接收机。但在实际环境中, 除了上述这部分直接信号, 还有一些信号经过复杂的反射会被接收机接收。这部分信号经过的路径通常都比直接路径更长, 相当于信号被延迟, 这种现象就被称为多路径效应^[5]。

多路径产生的环境通常非常复杂, 尤其是在动态定位条件下。因此多路径效应难以通过模型去模拟改正。一般通过以下几个方面来减弱多路径效应的影响:

i、选择合理的天线安置点^[27]。天线安置点尽量避开反射性能较强的物体; 在开放区域, 应尽量将天线位置贴近地面, 这样从地面反射过来的信号延迟时间会很短; 在近地面附近有反射体时, 将天线位置抬高则会减少天线接收到来自主要反射体的反射信号。

ii、选用对多路径效应有抑制作用的天线。在设置合理的卫星截至高度角的情况下, 直接信号的高度角一般都为正数, 尤其是当接收机位置接近地面时, 据此特点, 扼流圈天线通过抑制零高度角附近以及付高度角信号来达到减弱多路径效应的目的。

2.3.3 与接收机有关的误差

1). 接收机钟差

接收机的钟面时与 GNSS 时之间的偏差称为接收机钟差。由于接收机安装的一般为石英钟, 其稳定性比卫星上搭载的原子钟差很多, 因此产生的接收机钟差随机性更大, 数值也更大。对于接收机钟差, 惯常的处理方法是将其作为参数进

行估计，且认为不同历元间的接收机钟差是不相关的^[28]。

2). 接收机天线相位中心

接收机天线相位中心到接收机参考点的偏差称为接收机天线相位中心误差^[29]。与卫星天线相位中心误差类似，接收机天线相位中心误差也分为相位中心偏差（PCO）和相位中心变化（PCV）。前者表示平均天线相位中心与天线参考点之间的偏差，后者表示天线相位中心与平均天线相位中心之间的偏差，如图 2.3 所示：

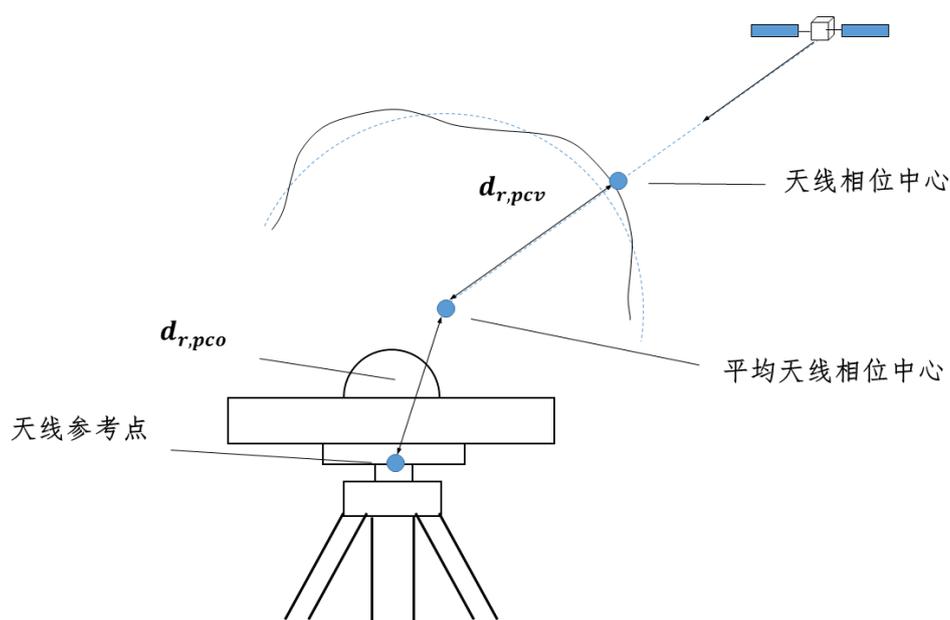


图 2.3 接收机天线相位误差示意图

接收机天线相位中心也可以根据 IGS 提供的 ANTEX 文件进行改正，其中给出了一部分型号接收机的改正参数。

3). 接收机硬件延迟

与卫星硬件延迟类似，信号在接收机内部传播过程中会因为硬件问题发生延迟，且同一频率不同通道上的信号（数字或模拟）或者不同频率上的信号延迟量不同。接收机硬件延迟相对不稳定，处理起来比较复杂，可以通过出厂标定进行改正，或者采用机构发布的 DCB 参数进行改正。

2.4 差分增强改正信息

广域差分增强系统是在广域差分系统的基础上发展出来的，其思路是对观测量中的误差源进行分类处理，并对各项误差进行模型化，将模型化的误差改正信

息发送给用户使用，以削弱用户定位误差。

广域差分增强系统一般仅针对卫星端误差以及信号传播过程中的大气延迟误差进行改正。大气延迟中，对流层延迟误差具有明显的区域性特征，因此也不便于处理。所以通常的广域差分增强信息中包含了卫星轨道改正、卫星钟差改正以及格网化的电离层延迟改正。北斗广域差分增强系统还提供一个分区综合改正数，进一步削弱观测值中不便于模型化的一类误差项。

2.4.1 等效钟差及轨道改正

用户在进行天线相位中心、相对论效应、潮汐影响等一系列公共误差的改正后，仍然受到剩余误差的影响^[30]。针对影响区域卫星导航系统基本服务精度的各种因素，北斗系统利用区域均匀分布的已知精确坐标的地面参考站，对各部分误差计算出服务区域内卫星星历及钟差的预报误差所引起的平均用户距离误差。由于卫星钟差与轨道误差强相关，同时求解轨道误差与卫星钟差误差会导致法方程严重病态。因此将钟差与轨道误差分步求解，分别得到卫星钟差误差，即等效钟差，以及轨道误差。

2.4.2 分区综合改正数

距离较近的两个站所包含的轨道误差、卫星钟差以及与信号传播有关的误差基本一致，在已知精确坐标的基准站上对每颗观测到的卫星分别计算其伪距和相位的 O-C（观测值减改正值）残差：

$$OMC_P_r^s = P_{IF} - \rho_r^s - trop_r^s - dt_r + dt^s + rela^s \quad (2.9)$$

$$OMC_L_r^s = L_{IF} - \rho_r^s - trop_r^s - dt_r + dt^s + rela^s + A_r^s \quad (2.10)$$

式中， P_{IF} 、 L_{IF} 分别表示伪距和相位的无电离层组合观测值， ρ_r^s 表示卫星与接收机之间的几何距离， $trop_r^s$ 表示对流层延迟， dt_r 为接收机钟差， dt^s 为卫星钟差， $rela^s$ 为相对论效应引起的误差， A_r^s 为按距离表达的非整数的模糊度。

由于基准站精确坐标已知，故卫星到接收机的几何距离可以计算出来，对流层延迟通过模型进行改正，接收机钟差利用伪距观测值事先计算出来，卫星钟差通过广播星历求得，相对论误差通过模型进行改正，因此该 O-C 残差中将包含模糊度（对相位而言）、对流层延迟残余误差、轨道误差、钟差残余误差以及其它公共误差，此即分区综合改正数。分区改正数考虑的误差基于距离相关性，因此才有对系统覆盖地区进行区域划分，即形成“分区”概念，以便控制用户到参考站的距离，用户根据自己所处的概略位置选择合适的分区获取改正信息。从而获得最佳改正效果。

2.4.3 电离层延迟改正

广域差分增强系统一般采用格网电离层模型对电离层延迟进行改正^[22]。格网电离层模型采用单层电离层模型，将研究区域的具有一定厚度的电离层压缩成一个没有厚度的薄层，将原本分布在整个电离层空间的电子集中到这个薄层上。这样处理后，卫星信号穿过电离层的过程将被简化为一个点，称为穿刺点。利用分布在研究区域的地面跟踪站跟踪获取 GNSS 观测资料，建立起区域的天顶电子总含量 VETC 模型，然后以一定的时间间隔以及经纬度间隔进行发布，用户接收机根据所处的位置计算出电离层延迟。

1). 计算穿刺点位置

$$\alpha_{pp} = \frac{\pi}{2} - Ele - \sin^{-1} \left(\frac{R}{R + h_{ion}} \cdot \cos Ele \right) \quad (2.11)$$

式中， Ele 表示卫星高度角， R 为地球半径，一般取 6378.14km， h_{ion} 表示电离层单层模型的高度。则穿刺点的大地坐标为

$$B_{pp} = \sin^{-1} (\sin B_r \cdot \cos \alpha_{pp} + \cos B_r \cdot \sin \alpha_{pp} \cdot \cos Azi) \quad (2.12)$$

$$L_{pp} = L_r + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_{pp} \sin Azi}{\cos B_{pp}} \right) \quad (2.13)$$

式中， B_{pp} 和 L_{pp} 分别为穿刺点的纬度和经度， B_r 和 L_r 分别为接收机的纬度和经度， Azi 表示卫星方位角。

2). 内插穿刺点垂直电离层延迟改正

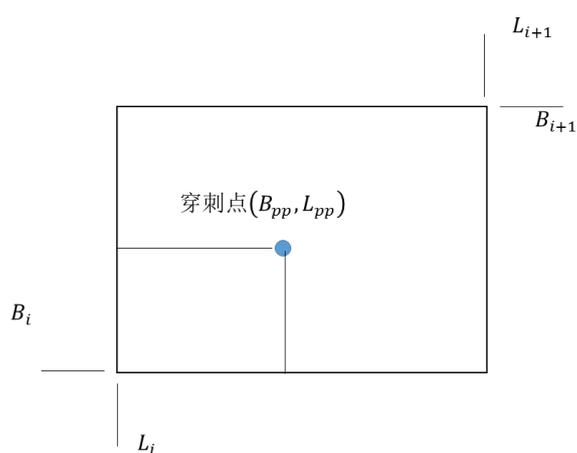


图 2.4 格网穿刺点示意图

如图 2.4 所示，根据测站的概略大地坐标可以确定测站所处的格网编号，然

后获取四个格网点延迟改正数记为 $I_i (i = 1, 2, 3, 4)$ ，则穿刺点垂直电离层延迟改正为

$$I_{pp} = \left(\sum_{i=1}^4 W_i I_i \right) / \sum_{i=1}^4 W_i \quad (2.14)$$

式中 W_i 为格网点电离层延迟权函数，其计算公式为

$$W_1 = x_{pp} \times y_{pp} \quad (2.15)$$

$$W_2 = (1 - x_{pp}) \times y_{pp} \quad (2.16)$$

$$W_3 = (1 - x_{pp}) \times (1 - y_{pp}) \quad (2.17)$$

$$W_4 = x_{pp} \times (1 - y_{pp}) \quad (2.18)$$

式中

$$x_{pp} = (B_{pp} - B_i) / (B_{i+1} - B_i) \quad (2.19)$$

$$y_{pp} = (L_{pp} - L_i) / (L_{i+1} - L_i) \quad (2.20)$$

内插穿刺点延迟改正至少需要搜索到三个格网点数据，否则该点将无法获取延迟改正。当只有三个格网点有数据时，式 2.14 令 $I_4 = 0$ ， $W_4 = 0$ ，即可求出此时的延迟改正。

2.5 本章小结

本章介绍了利用北斗观测数据进行精密单点定位的基本理论，包括北斗信号特征，单频和双频定位采用的数学模型，分析了定位过程中面临的主要误差影响，分别对这些误差处理方法进行了介绍。对北斗广域差分增强系统的差分增强改正信息及其使用方法进行了简要说明。

第3章 周跳探测与处理

相位观测数据具有更高的精度，相位观测噪声大约是伪距观测噪声的1/100左右。因此精密非差定位通常要采用相位观测数据，必须解决周跳问题^[31]。当接收机开机进行观测时，对于相位观测值，实际观测的是载波合拍相位的小数部分，整数部分伴随开机会进行初始化，然后进行整数计数。在某个历元，我们需要的相位观测值应当包含三个部分，分别是载波合拍相位的小数部分 $\Delta\varphi$ 、初始化后的整数计数部分 N 以及初始化前卫星与接收机之间载波相位的整周数 N_0 。这其中 N_0 是未知的，被定义为整周模糊度。接收机对每颗卫星都有一个整周模糊度，理想情况下，整周模糊度是一个常数，为此可作为一个固定的参数进行估计。实际上，当接收机跟踪信号发生失锁，整周计数 N 会随之中断。当重新锁定信号后，整周计数 N 显然不再准确而包含了若干整周数跳变（小数部分不会受到影响），随后的历元中，相位观测值都将包含该周数跳变。这部分相位周数跳变也是未知的，因此可归入整周模糊度中，所以整周模糊度不再是一个常数，必须进行相关处理。

周跳发生的原因有很多，常见的原因主要有：信号受到高楼、树木、或者其他障碍物遮挡而出现短暂中断；观测噪声过大导致信噪比低下；接收机或卫星软硬件故障，如钟跳等等^[32]。

首先要从相位观测值中发现周跳。周跳探测的思路一般有：构建具有特定性质的线性组合观测值；利用相位观测值的连续性；根据残差的特性进行判别。这其中，双频观测值和单频观测值使用的方法不尽相同。

3.1 双频周跳探测

双频周跳探测通常采用两个频率的观测值组成一些组合观测值，比如无电离层组合、M-W组合等等^[33]，利用这些组合观测值的特殊性质实现周跳的探测。这些方法各有优势，也存在各自的问题，下面对其中一些方法进行具体分析。

3.1.1 无几何组合 (Geometry-free)

无几何组合可以表达成以下形式：

$$\Phi_{GF} = \Phi_1 - \Phi_2 = -(I_r^s(f_1) - I_r^s(f_2)) + A_r^s(f_1) - A_r^s(f_2) + \varepsilon(f_1) - \varepsilon(f_2) \quad (3.1)$$

式中除了消去了卫星到接收机的几何距离项，还消除了接收机钟差、卫星钟差、对流层等与频率无关的误差项，留下的部分包含了电离层残差、两个频率的模糊

度组合以及噪声组合。可见该观测探测周跳的效率取决于给定历元前后电离层变化是否显著以及观测噪声水平。

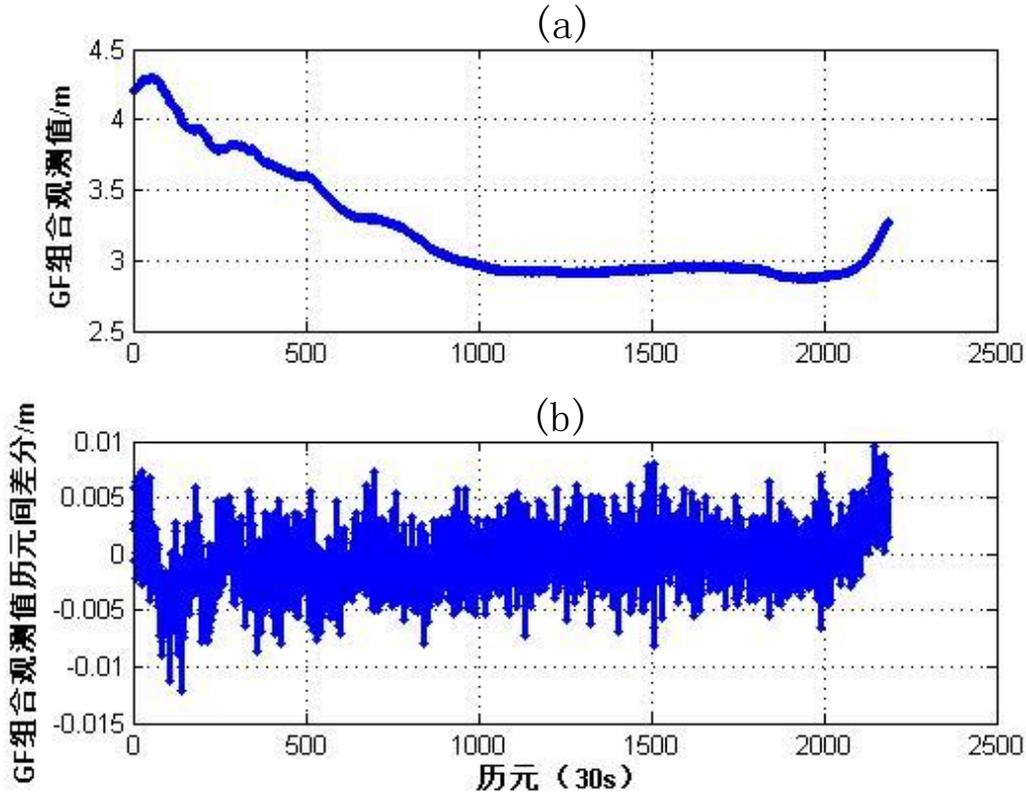


图 3.1 无几何组合序列 (a) 及无几何组合历元间差分序列 (b)

以北斗 B1 和 B3 频为例，采用 30s 采样率观测数据，如图 3.1 所示，当给定历元前后电离层变化较为平缓，观测噪声也较为合理时， Φ_{GF} 是一条相对平缓的曲线（图 3.1a）。对组合观测值序列做历元间差分，得到 GF 组合观测值历元间变化时间序列（图 3.1b）。虽然两个频率的电离层延迟和观测噪声不完全相同，但做差后会抵消一部分，所以 GF 组合观测值历元前后的变化量很小，如图 3.1b 所示，典型的变化范围基本上保持在 $(-0.01, 0.01)$ 之间。

GF 组合观测值对不同周跳组合的探测效果不同，将式 3.1 改写成如下形式

$$\Phi_{GF} = \Phi_1 - \Phi_2 = -(I_r^s(f_1) - I_r^s(f_2)) + A_r^s(f_1) - \frac{f_1}{f_2} A_r^s(f_1) + \varepsilon(f_1) - \varepsilon(f_2) \quad (3.2)$$

可以看出当两个频点上出现的周跳数等于频率比时，周跳对 GF 组合观测值的影响将会被抵消，而周跳数与频率比相差越大，周跳的影响越明显。

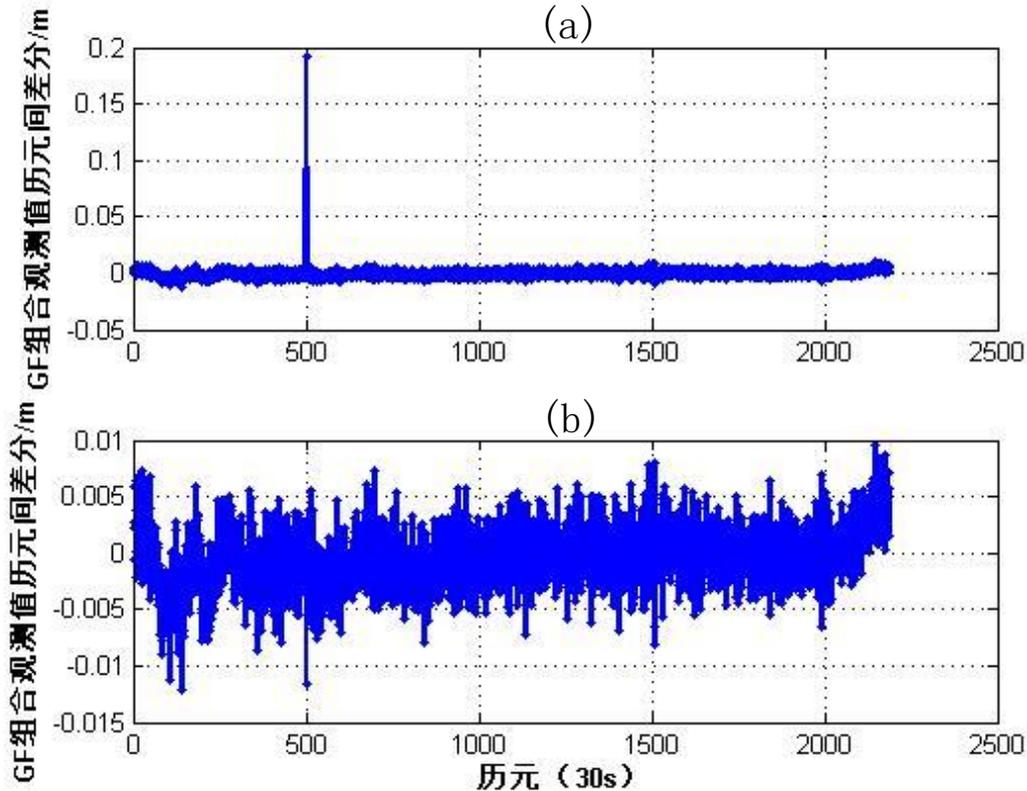


图 3.2 无几何组合加周跳历元间差分序列

图 3.2a 从第 500 历元开始对 B1 频点施加 1 周的周跳，下图从第 500 历元开始对 B1 频点施加 123 周周跳，同时对 B3 频点施加 100 周周跳。可以看出，上图在第 500 历元出现了一次明显的跳跃，数量大约为 0.2m，与 B1 频信号的波长 0.192m 十分接近，这与 B1 频施加 1 周周跳是对应的。图 3.2b 在两个频点施加的周跳数约等于频率比值（B1 加 123 周，B3 加 100 周），此时周跳对 GF 组合历元间差造成的影响几乎淹没在正常的噪声序列中，在这种情况下无法通过设定一个阈值将这次周跳探测出来，显然这样规模的周跳会对定位结果造成较大影响。

3.1.1 M-W 组合 (Geometry-free)

M-W 组合的数学形式可以表达为：

$$\Phi_{MW} = \Phi_1 - \Phi_2 - \left(\frac{f_1}{f_1 + f_2} P_1 + \frac{f_2}{f_1 + f_2} P_2 \right) + \varepsilon = \frac{c}{f_1 - f_2} (N_1 - N_2) + \varepsilon \quad (3.3)$$

从式中可以看到，MW 组合消除了电离层延迟、卫星钟差、接收机钟差以及卫星到接收机之间的几何距离，残留的误差项主要是观测噪声和多路径影响。理论上，没有周跳时 Φ_{MW} 应该是一个常数，但由于受到观测噪声和多路径的影响， Φ_{MW} 的实际值会在某个值附近上下波动，仍然以北斗 B1 和 B3 频为例，采用 30s 采样率观测数据，给出 MW 组合观测值的时间序列以及历元间差时间序列，如图

3.3 所示。

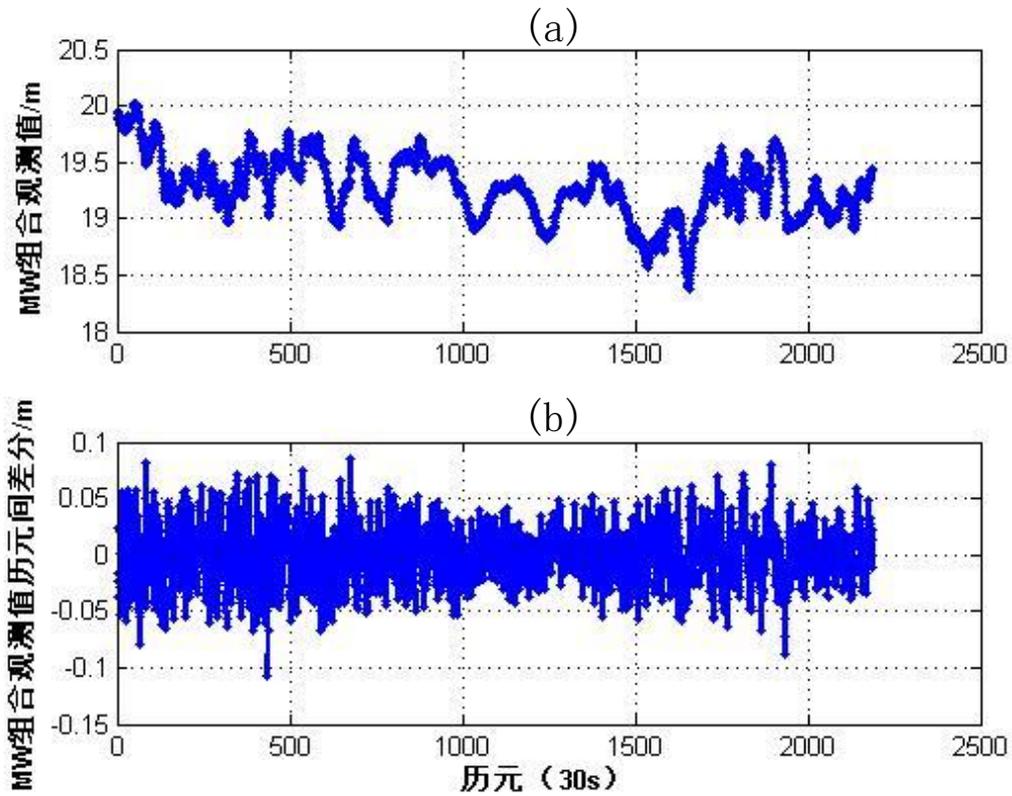


图 3.3 M-W 组合序列 (a) 及 M-W 组合历元间差分序列 (b)

当采用北斗 B1 和 B3 频时，式 3.3 可以改写成

$$\Phi_{MW} = 1.0247(N_1 - N_2) + \varepsilon \quad (3.4)$$

做历元间差分可得

$$\Delta\Phi_{MW} = 1.0247(\Delta N_1 - \Delta N_2) + \Delta\varepsilon \quad (3.5)$$

从式中可以看出，如果没有周跳发生，则有

$$\Delta\Phi_{MW} = \Delta\varepsilon \quad (3.6)$$

此时 MW 组合观测值历元前后变化量就等于历元间观测噪声差值，是一个较小的量，从图 3.3 可以看到，该值基本上保持在 $(-0.1, 0.1)$ 之间。从式 3.5 可知，当两个频点上出现相同规模的周跳，其影响将会被抵消。因此只要不发生相同周数的周跳，即最少相差一周，则 $\Delta\Phi_{MW} \approx 1 \gg \Delta\varepsilon$ ，周跳很容易就能被探测出来。图 3.4 模拟了不同周跳情况下 MW 组合观测历元间差时间序列

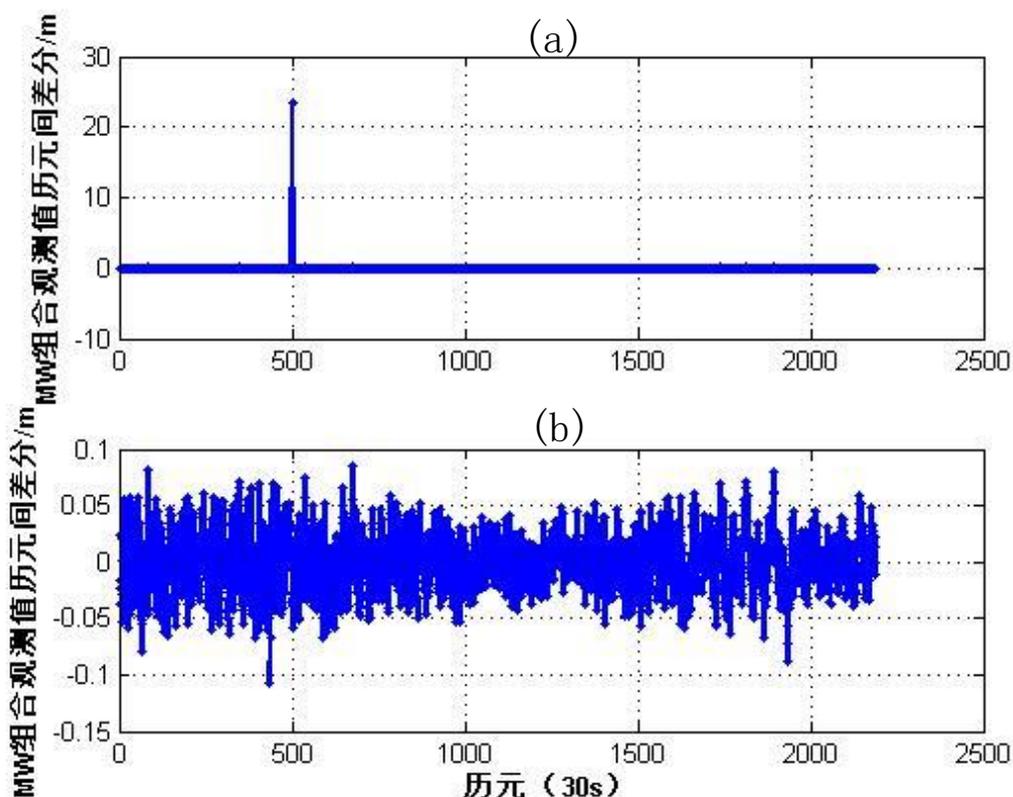


图 3.4 M-W 组合历元间差分序列

图 3.4 (a) 从第 500 历元开始对 B1 频点施加 123 周周跳，同时对 B3 频点施加 100 周周跳，即模拟了上一节中 GF 探测失效的情况。可以看到，此时时间序列上出现显著跳跃，这一周跳可以轻易被探测出来。图 3.4 (b) 则模拟了在两个频点同样施加了 1 周周跳，对比无周跳时间序列，可以看到两者完全一致，即说明此时 MW 组合观测值探测周跳是失效的。

3.2 单频周跳探测

单频周跳探测相较于双频更加困难，无法像双频那样组成多种频点间的组合观测值以尽可能多地消除误差项的干扰。本文采用了比较常用的多项式拟合法和伪距/相位组合法，便于进行实时周跳探测，算法也较容易实现^[34, 35]。

3.2.1 多项式拟合法

多项式拟合法是根据连续多个历元相位观测值变化相对平缓这一特点来进行周跳探测的^[36]。对连续多个历元干净的相位观测值，使用一个多项式去拟合对应的曲线，然后预测将要参与解算的当前历元的相位观测值，并与实际观测值进行比较，采用一个阈值进行评判实测相位观测值中是否含有周跳或粗差。多项式

的表达形式如下：

$$\Phi_i = a_0 + a_1(t_i - t_0) + a_2(t_i - t_0)^2 + \dots + a_n(t_i - t_0)^n \quad (i = 1, 2, \dots, m; m > n + 1) \quad (3.7)$$

式中， a_i 为多项式系数， t_i 采用的历元时刻， t_0 为参考时刻， n 为多项式阶数。

采用最小二乘法解算出多项式系数并对新历元相位观测值进行预测^[36]。注意到，拟合多项式所采用的连续多个历元的相位观测数据应当是干净无周跳或者周跳数很小，所以，实际应用中需要配合其它周跳探测手段进行预处理。多项式拟合法的探测效率依赖于相位观测值的精度以及变化率，如果相位观测值所含噪声较大或者采样时间间隔较大，拟合曲线与实测数据偏差过大，探测效果就会大打折扣，所以，多项式拟合一般只能发现规模较大的周跳。此外，遇到连续周跳或者周跳很靠近(小于拟合窗口长度)，多项式拟合就不再能发挥作用。本文采用4阶多项式进行拟合，拟合窗口为14个历元。

3.2.2 伪距/相位组合法

伪距/相位组合法利用伪距观测值和相位观测值构成组合观测值，消除了一部分误差项的影响，使得新的观测值具有相对变化平缓的特性^[37]。组合观测值的表达如下：

$$LC = P_r^s - \Phi_r^s = 2I_r^s - A_r^s + b_p - b_\phi - \phi_\phi + \varepsilon_{LC} \quad (3.8)$$

式中， I_r^s 为电离层延迟，组合后扩大为原来的两倍； A_r^s 为非整数的模糊度； b_p 和 b_ϕ 分别表示差分码偏差(DCB)和相位硬件延迟，可以认为它们在较短时间内是稳定的； ϕ_ϕ 为相位缠绕，可以通过模型较准确地改正； ε_{LC} 为组合后的观测噪声。这一组合消除了几何距离、接收机钟差、对流层延迟等，剩余对组合观测值影响较大的主要是电离层延迟以及伪距观测噪声。图3.5分别为伪距相位组合观测值序列(上图)和组合观测值历元间差分序列(下图)，采用北斗B3频观测数据，采样率为30s。

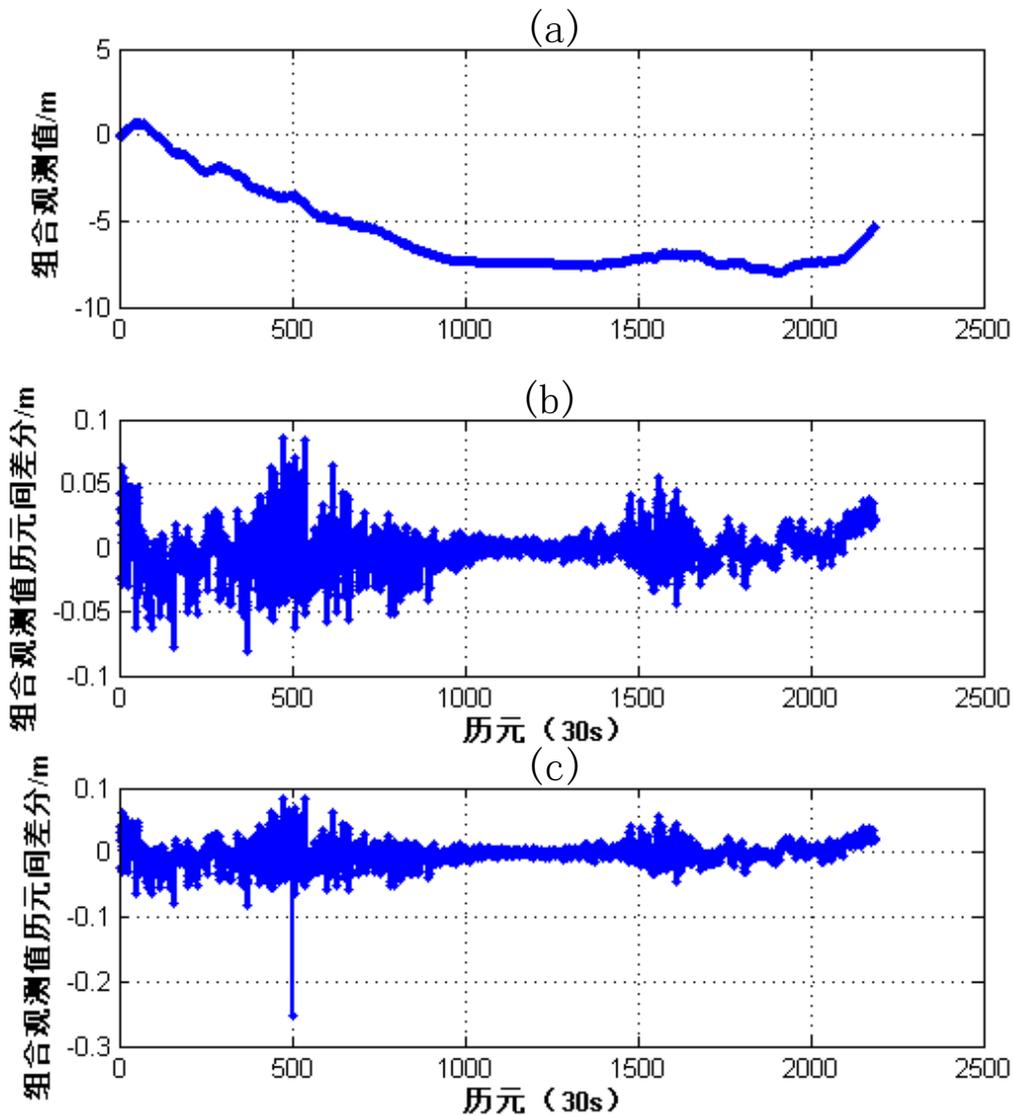


图 3.5 单频伪距/相位组合序列 (a)、伪距/相位组合历元间差分序列 (b) 及伪距/相位组合加周跳历元间差分序列 (c)

如图所示, 没有发生周跳的组合观测值是一条相对平滑的曲线, 对其进行历元间差分, 可以看出历元间差分序列基本上是一条零均值的曲线, 但不同时间段波动起伏较大。由公式 3.8 知, 该组合主要包含电离层延迟和观测噪声, 如果数据采样率较高, 则历元间差分结果会有较大波动在第 500 个历元加入 1 周周跳, 从序列中看到一次大约 0.25m 的跳跃, 这与 B3 频点信号的波长 0.236m 相对应。由于此次周跳从序列中突出, 因此容易被探测出来。然而, 同样规模的周跳发生在另一颗卫星, 如下图

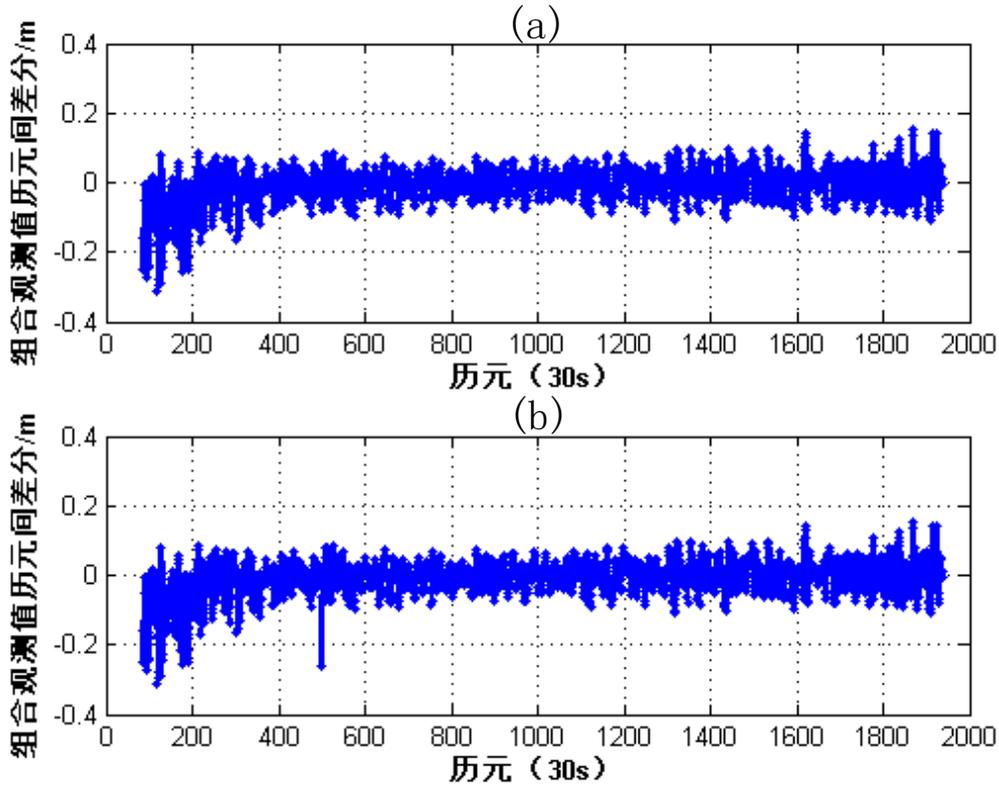


图 3.5 单频伪距/相位组合历元间差分序列(a)及伪距/相位组合加周跳历元间差分序列(b)

同样在第 500 个历元加入 1 周周跳。从图中可以看出，虽然在发生周跳的历元附近，周跳引起的跳跃是明显的，但整个序列的最大波动幅度超过了周跳，因此在使用该观测数据进行定位的过程中，设置一个固定的阈值或者无法探测出该周跳，或者因为阈值太小，误探测很多周跳。目前缺乏对单频数据质量进行实时评估的有效手段，所以，针对单频定位，小规模周跳难以很好地探测出来。

3.3 周跳探测阈值设置

GF 组合法、MW 组合法以及单频的伪距/相位组合法都属于同一类周跳探测方法，通过组合观测值消除大部分误差项，尽可能保留随时间变化均匀的误差，以免对周跳探测产生干扰。这种情况下对周跳的探测通常需要设定阈值，当构造的组合观测值序列超出阈值，即认为发生了周跳，反之则认为没有发生周跳。设定相对宽松的阈值可能会导致一些小规模周跳无法被探测出来，而阈值设置过于严格，则会导致误探测，造成模糊度参数频繁初始化，也会给定位精度带来严重影响。

从前述可以看到，组合观测值历元间差分时间序列总体上是稳定的，很少出现野值，但会存在有些时间段值域范围较宽，有些时间段值域范围较窄，如上述

MW 组合观测值历元间差，这与组合观测值中所包含的误差性质有关，也可能与接收机所处观测环境有关，且在同一历元下不同卫星间的情况也有区别。对于用户端实时应用，如果只是设定一个固定的阈值，显然不能适应各种复杂的情况，因此考虑以滑动窗口设置动态的阈值。

以 MW 组合为例，动态阈值的设定步骤为，首先，按照经验给定一个较为宽松的初值，获取观测数据后组成 MW 组合观测值 Φ_{MW} ，从第二个历元开始计算历元间 MW 组合观测值之差 $\Delta\Phi_{MW}$ ，规定连续累积 15 个 $\Delta\Phi_{MW}$ 序列后求解其均值，以五倍均值设置阈值，对下一个历元求解的 $\Delta\Phi_{MW}$ 进行判断，如果不超限，则用该 $\Delta\Phi_{MW}$ 替换序列中第一个，继续求解新序列的均值，设置新的阈值，以此类推。即对每一颗卫星都有动态的阈值，探测准确率因此可以得到有效提高。该方法也适用于 GF 组合和单频伪距/相位组合。

3.4 周跳处理与算例分析

当探测到周跳时，相当于观测值中引入了粗差，必须要对其进行处理。非差定位中周跳的修复相对困难，一般地，在某个历元探测到相位观测值存在周跳，此时可以对发生周跳的观测值所对应的模糊度参数进行重新初始化，并降低其权重^[38, 50]。随后该模糊度参数将会重新进行收敛直到再次趋于真值。

观测过程中，周跳发生的频次和规模无法预测，现分别对双频和单频周跳进行模拟，以验证探测效率。表 3.1 给出了双频周跳模拟情况。

表 3.1 双频周跳模拟情况

频点	B1	B3	B1	B3	B1	B3	B1	B3
周跳	10:00:00		14:00:00		18:00:00		22:00:00	
	1	1	0	3	6	5	0	7

对单颗卫星每相隔 4 小时设置一次周跳，周跳规模不相同。定位结果如图 3.6 所示。

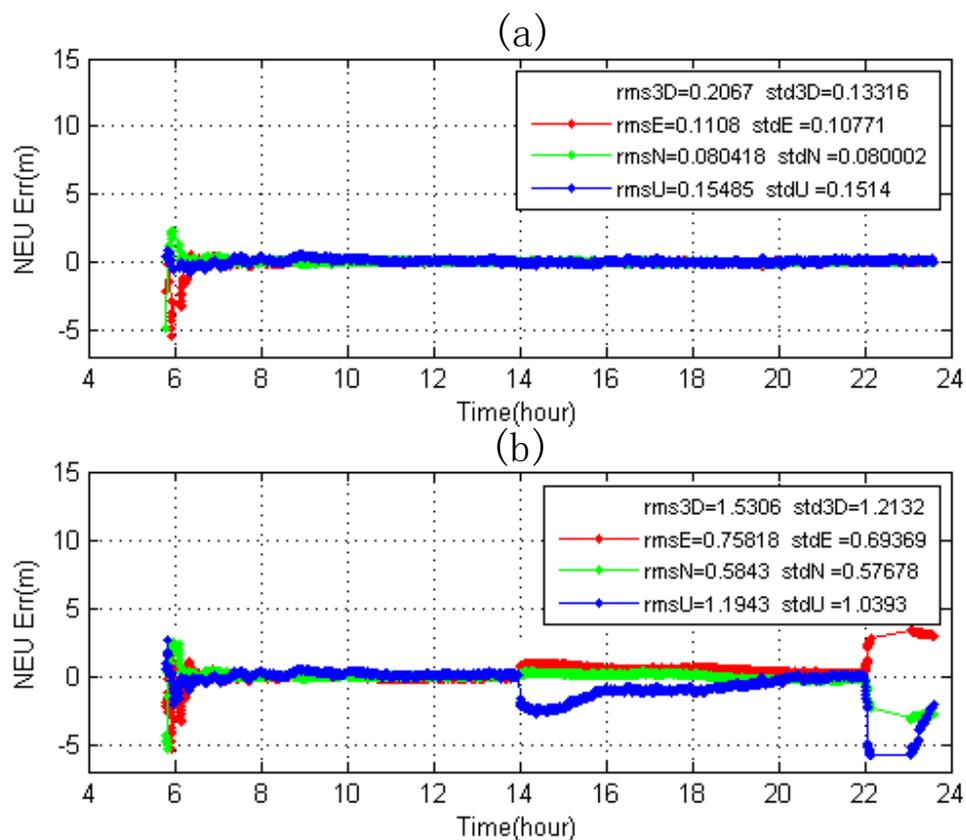


图 3.6 未加入周跳双频定位结果 (a) 及加入不同大小单个周跳双频定位结果 (b)

如图所示，上图为没有加入周跳的双频定位结果，下图为模拟加入单一周跳不做任何处理的定位结果。可以看出，周跳对定位结果产生了严重影响，且周跳规模越大，对定位产生的影响越大。现分别采用了固定阈值和动态阈值两种方法对周跳进行探测，并对探测出的周跳做模糊度初始化处理。结果见图 3.7：

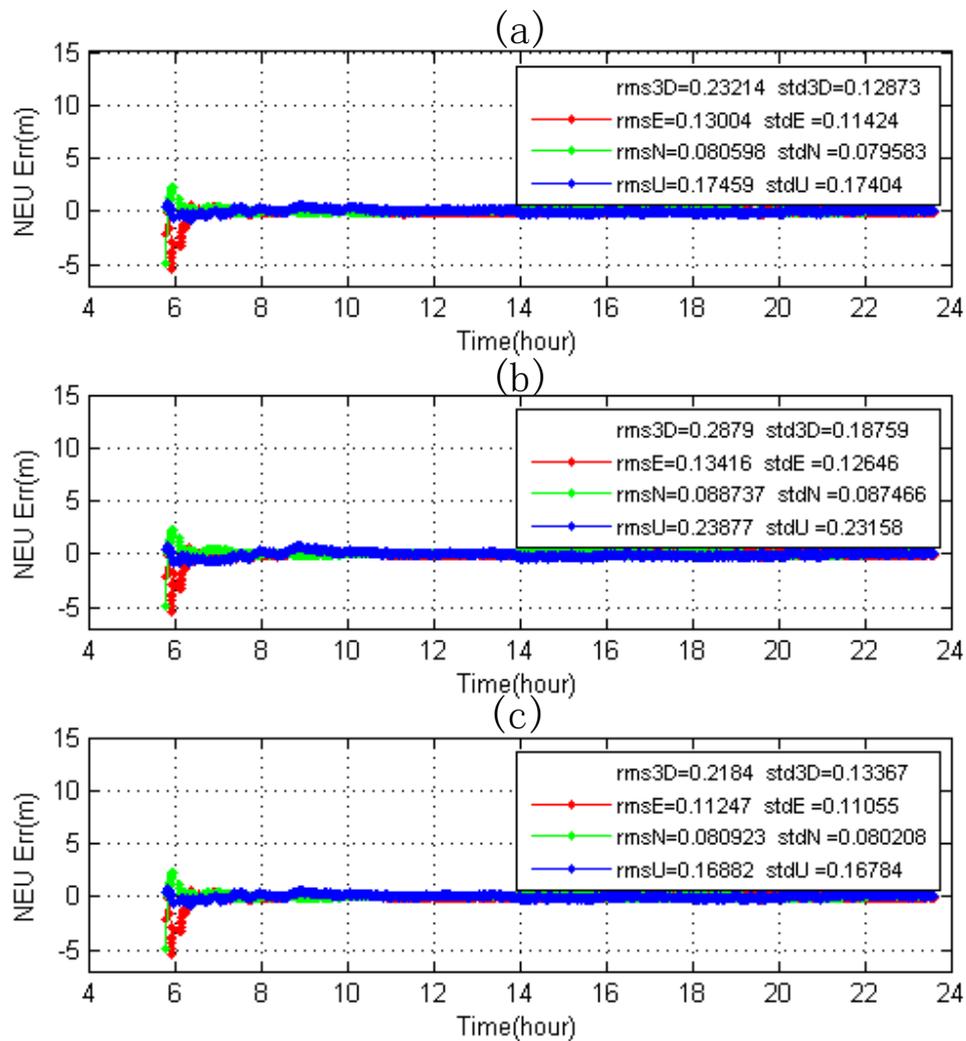


图 3.7 采用不同阈值双频定位结果：宽松阈值 (a)、严格阈值 (b) 以及动态阈值 (c)

如图所示，当采用固定阈值进行周跳探测时，规模较大的周跳被成功探测出来，而在 10 点整模拟的周跳，即 B1 频点和 B3 频点各加入一周周跳，则未能被探测出来。这是由于两个频点加入的周跳数相等，因此 MW 组合法对该周跳失效。又因为两个频点的周跳数比较接近频率比值 (1.23:1)，因此 GF 组合对此反映不够显著，当阈值设置得较为宽松时，这种周跳容易被忽略，但阈值也不能设置得过小，否则会出现误探测，尤其是在定位开始阶段，这会对定位结果造成不良影响。采用动态阈值时，阈值会根据组合观测值历元差的实际大小进行动态调整，这样设置阈值更适应复杂的变化，包括卫星高度角、大气影响、多路径效应、观测噪声等等，因此更为合理。需要指出的是，本例为了验证动态阈值的可靠性模拟了较小的周跳，因此即使采用普通固定阈值未能探测出这一周跳，其对结果的影响也很小，实际应用中可能遇到观测噪声较大的情况，此时更大规模的周跳可

能也会被淹没在序列中。

对 B3 单频进行周跳模拟，模拟情况如表 3.2 所示

表 3.2 单频周跳模拟情况

频点	B3	B3	B3	B3
周跳	10:00:00	14:00:00	18:00:00	22:00:00
	1	2	3	4

对单颗卫星每相隔 4 小时设置一次周跳，周跳规模不相同。定位结果如图 3.8 所示

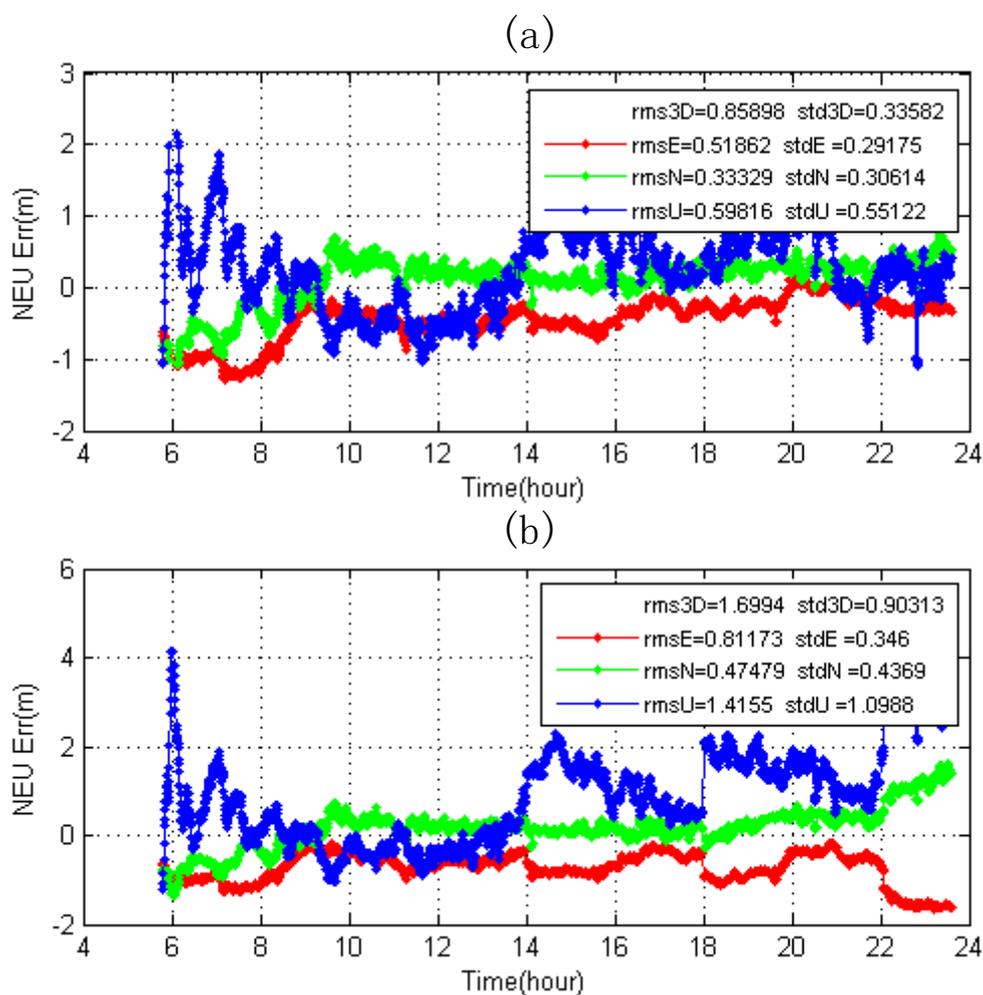


图 3.8 未加入周跳单频定位结果 (a) 及加入不同大小单个周跳单频定位结果 (b)

从图中可以看出，加入周跳后定位结果受到明显影响，周跳规模越大，对结果影响越严重。同双频类似，采用不同的方式对周跳进行探测并进行相关处理，得到定位结果如图 3.9 所示。

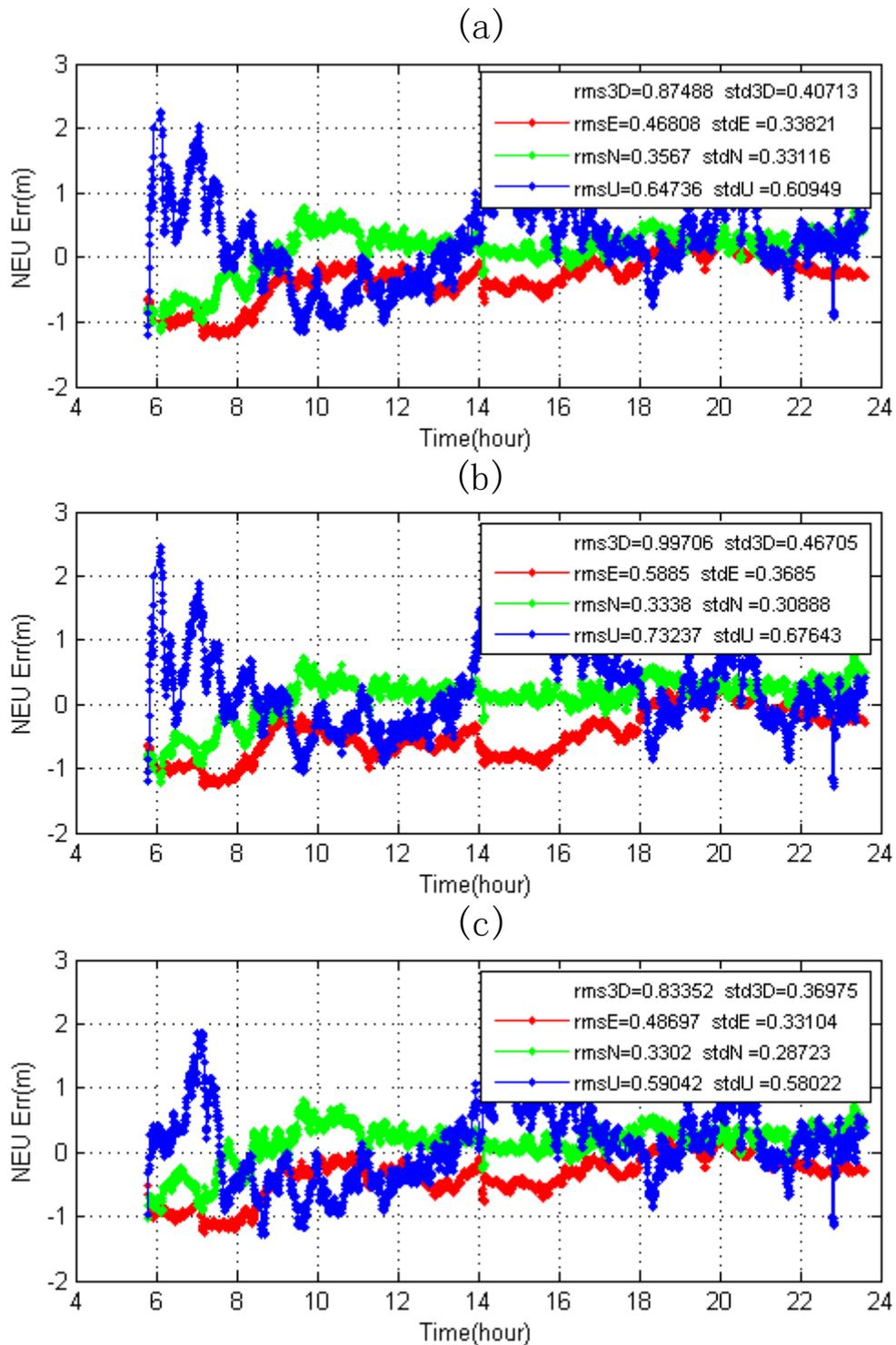


图 3.7 采用不同阈值单频定位结果：严格阈值 (a)、宽松阈值 (b) 以及动态阈值 (c)

如图所示，采用动态阈值的定位结果要优于采用固定阈值的定位结果。多项式拟合法在观测噪声较大的情况下对小周跳的探测效率较低，对于模拟的小周跳

只能依赖伪距/相位组合法进行探测,周跳越小,要探测出来就需要越小的阈值,对于一周周跳,阈值基本上需要设为 0.2m 左右,这样往往带来过多误探测,如图(上)所示,虽然能够探测到全部四个模拟的周跳,但由于存在误探测,使得定位精度也有所降低。如果阈值设置偏大,如图(中)所示,漏过了两个小周跳,也造成了定位结果的恶化。采用动态阈值后,可以在给定一个非常宽松的初值的情况下,准确地探测出全部的模拟周跳,减少了误探测。需要注意的是,图(上)给出的未加周跳的结果并不是严格不含周跳,作为实测数据难免混有周跳和其它一些野值点,所以在用动态阈值处理后,得到的结果甚至优于未加模拟周跳的结果,说明动态阈值对检测量的处理更加合理有效。

3.5 本章小结

本章主要对数据预处理部分进行了研究,介绍了几种常用周跳探测方法,包括适用于双频周跳探测的无几何组合法和 MW 组合法,以及适用于单频周跳探测的多项式拟合法和伪距/相位组合法。分析了这些方法的优缺点,并综合使用多种方法进行更有效的周跳探测。分析了周跳探测阈值设置问题,传统的固定阈值不能很好地兼顾复杂观测条件对探测量的影响,设置宽松的阈值容易忽略小规模周跳,使用较严格的阈值则容易误探测周跳,造成模糊度参数频繁初始化,反而使定位精度恶化。提出使用滑动窗口进行动态阈值设置,利用前面连续若干个实际探测值对阈值进行调整,此法更有利于探测出周跳和野值,也降低了误探测几率。

第4章 动态定位的参数估计方法

实时动态定位应用采用的参数估计方法主要有序贯最小二乘法和 Kalman 滤波法^[39]，两者都可以避免由于观测历元的增加给计算带来的负荷问题。

4.1 序贯最小二乘法

在实时定位应用中，随着观测历元的增加，如果一直积累观测方程，计算机承受的负荷会越来越大，直至崩溃。序贯最小二乘可以有效地将这类随时间累积的大型系统小型化处理，它不需要保留之前的观测数据，而只需要在每次更新观测数据时对前次的估计值进行修正，从而得到更新后的最小二乘估计^[40]。

假设有如下参数数学模型：

$$f(\bar{X}) - \bar{L} = 0 \quad (4.1)$$

对其进行线性化得到

$$AX - V + W = 0 \quad (4.2)$$

由最小二乘准则可得法方程

$$\begin{bmatrix} P & -I & 0 \\ -I & 0 & A \\ 0 & A^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V} \\ \hat{K} \\ \hat{X} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ W \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (4.3)$$

现假设有两期观测数据，分别用下标 k 和 $k-1$ 表示，则联合两期的法方程表达如下

$$\begin{bmatrix} P_{k-1} & 0 & -I & 0 & 0 \\ 0 & P_k & 0 & -I & 0 \\ -I & 0 & 0 & 0 & A_{k-1} \\ 0 & -I & 0 & 0 & A_k \\ 0 & 0 & A_{k-1}^T & A_k^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_{k-1} \\ \hat{V}_k \\ \hat{K}_{k-1} \\ \hat{K}_k \\ \hat{X} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W_{k-1} \\ W_k \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (4.4)$$

令方程 4.3 下标为 $k-1$ ，即表示前期法方程，则可以得到

$$\hat{X}_{k-1} = -N_{k-1}^{-1} U_{k-1} \quad (4.5)$$

$$\hat{K}_{k-1} = P_{k-1} (A_{k-1} \hat{X}_{k-1} + W_{k-1}) \quad (4.6)$$

$$\hat{V}_{k-1} = A_{k-1} \hat{X}_{k-1} + W_{k-1} \quad (4.7)$$

其中

$$N_{k-1}^{-1} = (A_{k-1}^T \hat{X}_{k-1} A_{k-1})^{-1} \quad (4.8)$$

$$U_{k-1} = A_{k-1}^T P_{k-1} W_{k-1} \quad (4.9)$$

将方程 4.4 的矩阵表达形式做等价变形，得

$$\begin{bmatrix} P_{k-1} & 0 & -I & 0 & 0 \\ 0 & P_k & 0 & 0 & -I \\ -I & 0 & 0 & A_{k-1} & 0 \\ 0 & 0 & A_{k-1}^T & 0 & A_k^T \\ 0 & -I & 0 & A_k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_{k-1} \\ \hat{V}_k \\ \hat{K}_{k-1} \\ \hat{X}_k \\ \hat{K}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W_{k-1} \\ 0 \\ W_k \end{bmatrix} = 0 \quad (4.10)$$

将 \hat{V}_{k-1} 和 \hat{V}_k 消去可得

$$\begin{bmatrix} -P_{k-1}^{-1} & A_{k-1} & 0 \\ A_{k-1}^T & 0 & A_k^T \\ 0 & A_k & -P_k^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{K}_{k-1} \\ \hat{X}_k \\ \hat{K}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{k-1} \\ 0 \\ W_k \end{bmatrix} = 0 \quad (4.11)$$

将 \hat{K}_{k-1} 从式中消去得到

$$\begin{bmatrix} N_{k-1} & A_k^T \\ A_k & -P_k^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{X}_k \\ \hat{K}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{k-1} \\ W_k \end{bmatrix} = 0 \quad (4.12)$$

再将 \hat{X}_k 从式中消除可得

$$-(P_k^{-1} + A_k N_{k-1}^{-1} A_k^T) \hat{K}_k + W_k - A_k N_{k-1}^{-1} U_{k-1} = 0 \quad (4.13)$$

由于

$$\hat{X}_{k-1} = -N_{k-1}^{-1} U_{k-1} \quad (4.14)$$

所以

$$\hat{K}_k = (P_k^{-1} + A_k N_{k-1}^{-1} A_k^T)^{-1} (A_k \hat{X}_{k-1} + W_k) \quad (4.15)$$

由方程组 4.12 中第一个方程可得

$$\hat{X}_k = -N_{k-1}^{-1} U_{k-1} - N_{k-1}^{-1} A_k^T \hat{K}_k = \hat{X}_{k-1} - N_{k-1}^{-1} A_k^T \hat{K}_k \quad (4.16)$$

令

$$C_1 = I - N_{k-1}^{-1} A_k^T (P_k^{-1} + A_k N_{k-1}^{-1} A_k^T)^{-1} A_k \quad (4.17)$$

$$C_2 = -N_{k-1}^{-1}A_k^T(R_k^{-1} + A_k N_{k-1}^{-1}A_k^T)^{-1} \quad (4.18)$$

则公式 4.16 可以表达成

$$\hat{X}_k = [C_1 \quad C_2] \begin{bmatrix} \hat{X}_{k-1} \\ W_k \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

根据协方差传播率可得

$$\begin{aligned} N_k^{-1} &= [C_1 \quad C_2] \begin{bmatrix} N_{k-1}^{-1} & 0 \\ 0 & R_k^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1^T \\ C_2^T \end{bmatrix} \\ &= C_1 N_{k-1}^{-1} C_1^T + C_2 R_k^{-1} C_2^T \end{aligned} \quad (4.20)$$

展开可得

$$N_k^{-1} = N_{k-1}^{-1} - N_{k-1}^{-1}A_k^T(R_k^{-1} + A_k N_{k-1}^{-1}A_k^T)^{-1}A_k N_{k-1}^{-1} \quad (4.21)$$

4.2 Kalman 滤波

滤波，就是将信号中噪声过滤从而提取出有用信号的过程。Kalman 滤波，也叫作线性二次估计 (LQS)，是针对随时间积累的观测序列的一种最优估计算法^[41]。该算法分为两个处理步骤，第一步预测，得到当前状态变量以及它们的方差（不确定度），第二步更新，新的观测加入进来后，前一步的估计值会使用加权平均的改正量进行更新，然后不断重复上述过程，因此可以实时运行。可知，Kalman 滤波的一个显著优势是只使用当前系统输入的观测信息和前一期计算出的状态及其方差阵，而不需要保留更早时候的信息，非常适合实时动态系统，因此在导航定位等领域有广泛应用^[42]。

Kalman 滤波同时考虑系统的动力学模型和观测模型，动态精密单点定位所采用的 Kalman 滤波模型表示如下：

$$x_k = F_k x_{k-1} + w_k \quad (4.22)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (4.23)$$

式中，

x_k 表示状态向量；

z_k 表示观测向量；

F_k 表示从 x_{k-1} 到 x_k 的状态转移矩阵；

w_k 表示过程噪声，且服从零均值，即 $w_k \sim N(0, Q_k)$ ；

H_k 表示状态空间与观测空间的函数关系；

v_k 表示观测噪声，假设为高斯白噪声，方差为 R_k ，即 $v_k \sim N(0, R_k)$ 。

4.2.1 Kalman 滤波初值解算

动态精密单点定位的待估参数包括了 3 个接收机坐标参数，1 个接收机钟差参数，1 个对流层天顶总延迟参数，以及分别对每颗可视卫星的模糊度参数。这些参数中，接收机坐标和钟差每个历元都需要重新初始化。对流层参数随时间变化比较缓慢，参数初值通过美国航空无线电技术委员会（RTCA）推荐的 mops 模型进行计算^[43]，之后的历元都以上一个历元的估值作为初值。模糊度参数的处理方法在第三章进行了详细介绍。

接收机坐标和钟差通过伪距单点定位来解算，解算过程中将同时进行卫星故障检测，并对粗差进行探测。

1). 故障检测

程序中主要利用伪距单点定位残差来进行故障检测^[44]。伪距单点定位观测方程是一个非线性方程组，可以表示为

$$y = f(x) + \varepsilon \quad (4.24)$$

对其线性化并取一阶项可得

$$y \approx f(x_0) + F(x - x_0) + \varepsilon \quad (4.25)$$

则参数解表示为

$$\hat{x} = x_0 + (F^T P F)^{-1} F^T P (y - f(x_0)) \quad (4.26)$$

式中， y 表示观测向量， $f(x)$ 表示参数 x 的非线性函数关系， ε 表示观测噪声向量， F 表示 $f(x)$ 线性化后的一阶项系数阵， P 为观测向量的权阵。

得到参数估值后，代入观测方程，可得验后残差为

$$v = P_r^s - (\hat{\rho}_r^s + c \hat{d}t_r - c dt^s + I_r^s + T_r^s) \quad (4.27)$$

残差中误差为

$$\hat{\sigma}_v = \sqrt{\frac{v^T P v}{n - 4}} \quad (4.28)$$

式中， P_r^s 为伪距观测值， $\hat{\rho}_r^s$ 为以坐标估值代入计算的几何距离， $\hat{d}t_r$ 为接收机钟差估值， dt^s 为卫星钟差， I_r^s 为电离层延迟改正， T_r^s 为对流层延迟改正。在假定伪距观测值包含的观测噪声服从零均值正态分布，且同一历元中各观测值之间相互独立的情况下，对验后残差做卡方分布检验^[45]。统计量为 $(v^T P v / \sigma_0^2)$ ，则有

$$v^T P v / \sigma_0^2 \sim \chi^2(n-4) \quad (4.29)$$

σ_0 为伪距观测噪声，显著性水平 α 设置为0.001。

假设 $H_0: E(\varepsilon) = 0$; $H_1: E(\varepsilon) \neq 0$ ，当检验量 $v^T P v / \sigma_0^2 < \chi^2(n-4)$ 时，则以0.1%的弃真概率拒绝原假设，即认为伪距观测噪声期望不为零，也就是伪距中含有粗差。

验后残差未检出异常不一定代表数据是有效可靠的，当卫星的几何构型不良时，验后残差可能反映不出问题，但此时会对定位精度产生较大的影响^[46]，因此还需要对卫星几何构型进行评判。卫星几何构型可以用几何精度衰减因子(GDOP)来衡量

$$Q_X = (F^T P F)^{-1} = \begin{bmatrix} q_{XX} & q_{XY} & q_{XZ} & q_{Xt} \\ q_{XY} & q_{YY} & q_{YZ} & q_{Yt} \\ q_{XZ} & q_{YZ} & q_{ZZ} & q_{Zt} \\ q_{Xt} & q_{Yt} & q_{Zt} & q_{tt} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$GDOP = \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ} + q_{tt}} \quad (4.31)$$

程序中简单地对GDOP设置一个接受区间，超出该值域则认为卫星几何构型不理想。

2). 故障检测流程

故障检测主要是针对伪距观测值进行的。

1、新的观测值加入进来首先对可用伪距观测值进行搜索，搜索到少于必要的5颗卫星即给出警告。当可用卫星多于5颗时，对该历元进行伪距单点定位；

2、使用线性化的最小二乘迭代至参数改正数收敛，然后对残差进行卡方分布检验，同时对GDOP值进行检查，以此综合判断结果是否有效；

3、当第二步检验通过时，直接输出接收机坐标和钟差；当第二步检验不通过时，程序将按次序剔除可视卫星，并重新组成观测方程组重复第二步中的步骤。

4、算法中设置了最多剔除4颗卫星，并且剩余卫星数不能少于5颗，如果在最多剔除4颗卫星或者剩余卫星数仅有5颗的情况下仍然没有找到有效的结果，则给出数据不可用警告。

5、前述步骤获得通过后就能得到接收机坐标和钟差的概略值，然后提供给后续的Kalman滤波作为初值。此外，在过程中剔除的卫星会被标记，之后的数据处理中将不再使用。

故障检测处理流程图表示如下：

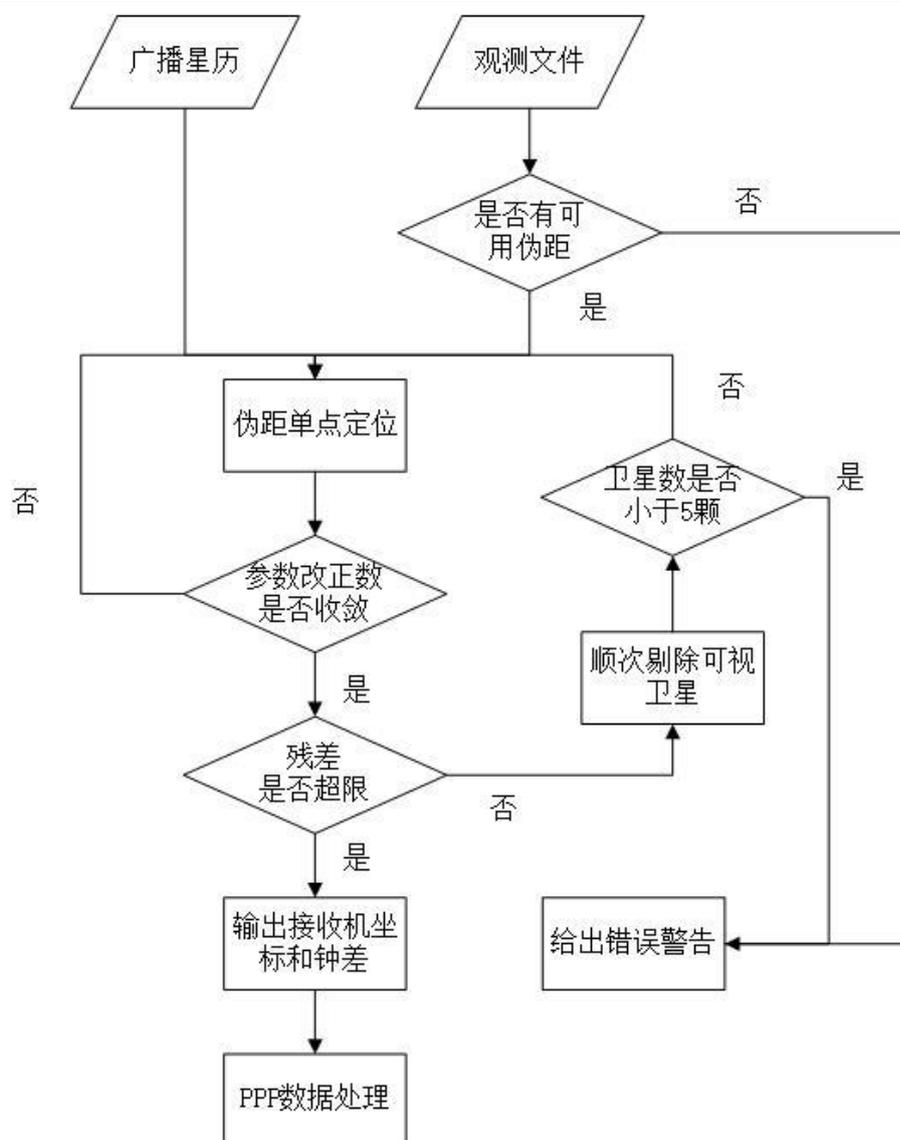


图 4.1 Kalman 滤波初值故障检测流程图

4.2.2 Kalman 滤波的更新

在获取状态向量初值后，Kalman 滤波会对状态向量以及它的协方差阵进行更新，更新过程可以用如下公式来表示

$$y_k = z_k - h(\hat{x}_{k|k-1}) \quad (4.32)$$

$$S_k = H_k P_{k-1} H_k^T + R_k \quad (4.33)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (4.34)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k y_k \quad (4.35)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (4.36)$$

式中,

$\hat{x}_{k|k-1}$ 表示当前状态向量估值;

$P_{k|k-1}$ 表示当前状态向量估值的协方差阵;

z_k 为观测向量;

y_k 为测量残差;

R_k 为观测误差协方差阵;

S_k 为残差协方差阵;

K_k 为滤波增益矩阵;

$\hat{x}_{k|k}$ 表示更新后的状态向量;

$P_{k|k}$ 表示更新后状态向量的协方差阵。

可以看出, Kalman 滤波是利用对当前状态向量估值添加修正来更新当前状态向量的, 添加的修正量则是对观测信息扣除了以当前状态向量估值计算的观测值值得到的残差进行的加权平均。因此, 对残差进行的加权平均决定了对状态向量估值进行修正的幅度。

4.3 算例分析

4.3.1. 最小二乘法和 Kalman 滤波法

分别采用最小二乘法和 Kalman 滤波法进行双频动态定位测试, 测试数据采用了某参考站一天 24h 观测数据, 数据采样间隔为 30s。结果见下图所示。

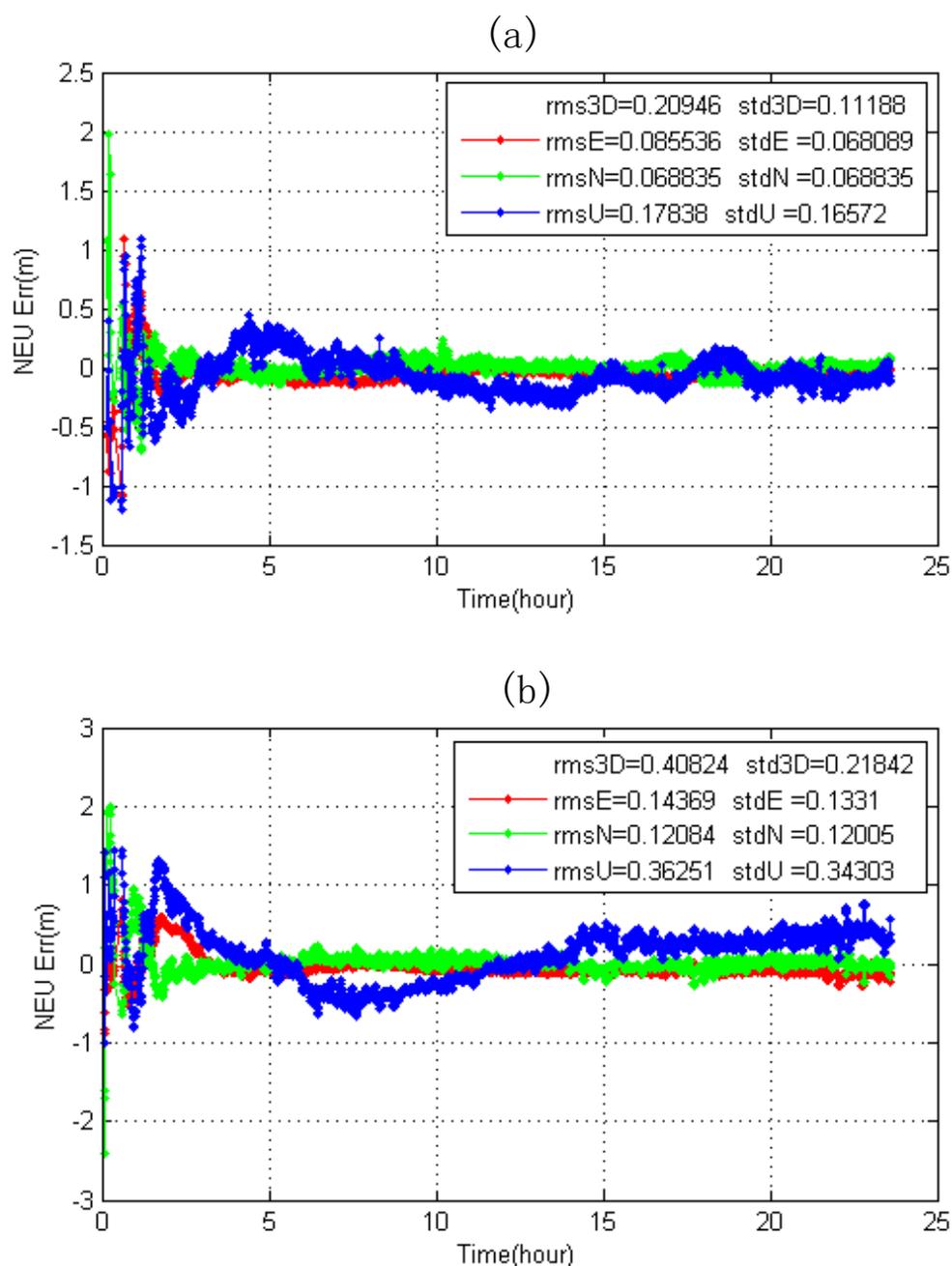


图 4.2 序贯最小二乘法(a)和 Kalman 滤波(b)双频动态定位结果对比

从图中可以看出，采用 Kalman 滤波进行定位的结果和采用序贯最小二乘法的结果大体上是相当的，Kalman 滤波略好一些，但不能因此得出 Kalman 滤波更优的结论，还需要进行大量数据测试比对。

4.3.2. Kalman 滤波故障检测

采集了某测试站点北斗 B1/B3 双频观测数据，数据时间段为当天 0h 至 17h

共 17 个小时，采样间隔为 30s。为了便于观察结果差异，采用了本程序最高精度模式，即双频加差分改正定位模式进行定位。分别对采用了故障检测程序和未采用故障检测程序进行了定位验证，并分析是否进行故障检测对定位结果的影响。定位结果如下图所示。

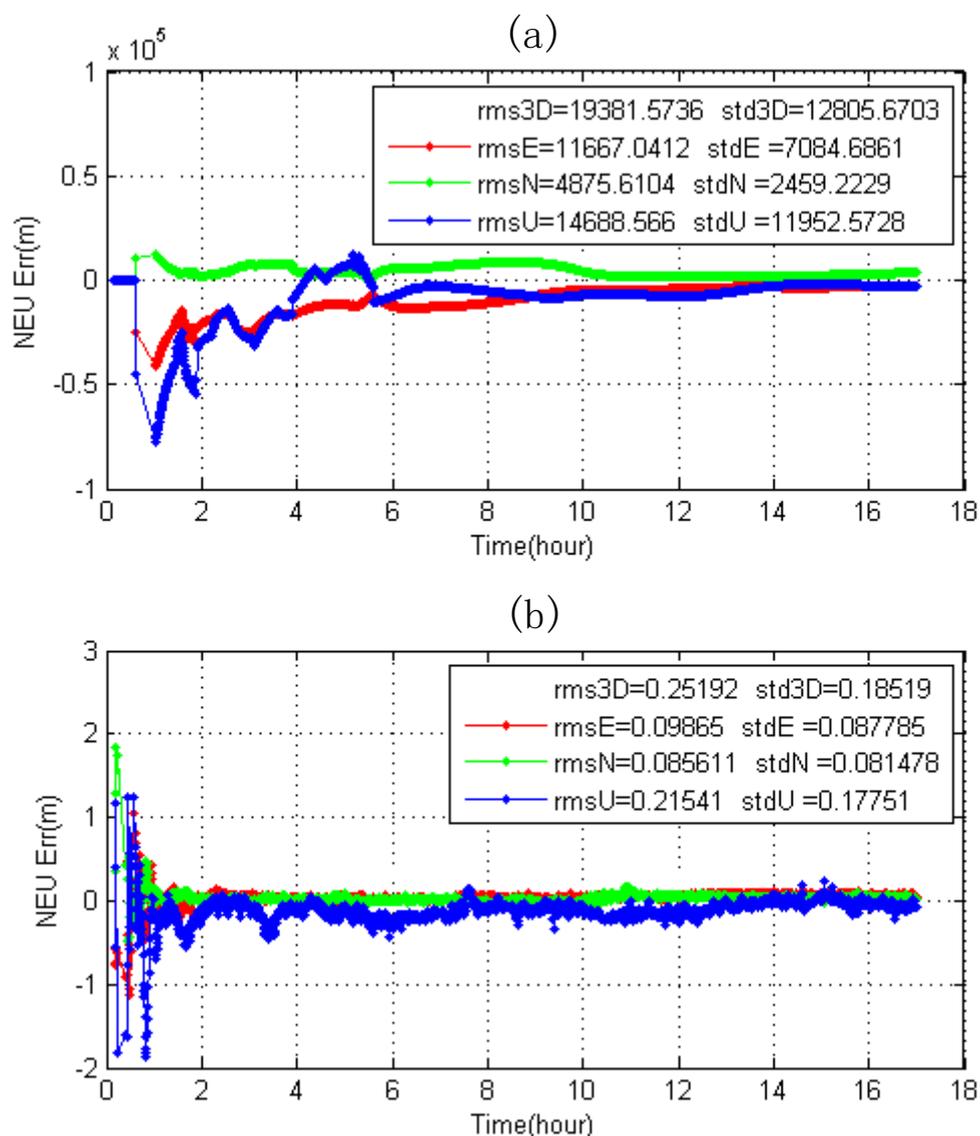


图 4.3 未做故障检测 (a) 和进行故障检测 (b) 双频动态定位结果对比

上图为未进行故障检测的定位结果，与测站已知坐标进行作差，可以看出，定位结果已经严重偏离了已知坐标，这样的精度是不能接受的。当伪距观测值因为卫星健康状况、恶劣的观测条件或者接收机出现故障等问题而引入粗差，在进行伪距单点定位时通过最小二乘迭代的结果可能会与真实坐标严重偏离。一方面，以错误的坐标作为 Kalman 滤波初值会引起滤波发散，另一方面，混入粗差

的伪距观测值如果在后续环节（如使用伪距观测值的周跳探测）中未被检出，也会对滤波造成干扰。下图展示的定位结果在初值解算过程中使用了前述介绍的故障检测方法，对最小二乘残差进行假设检验，采用逐次剔除卫星的方式排查伪距观测值中的粗差，保证了最小二乘迭代可以基本收敛至测站坐标附近，或者检索结束后仍未获得可靠的解则会给出故障警告。下图给出了两种模式下卫星利用情况。

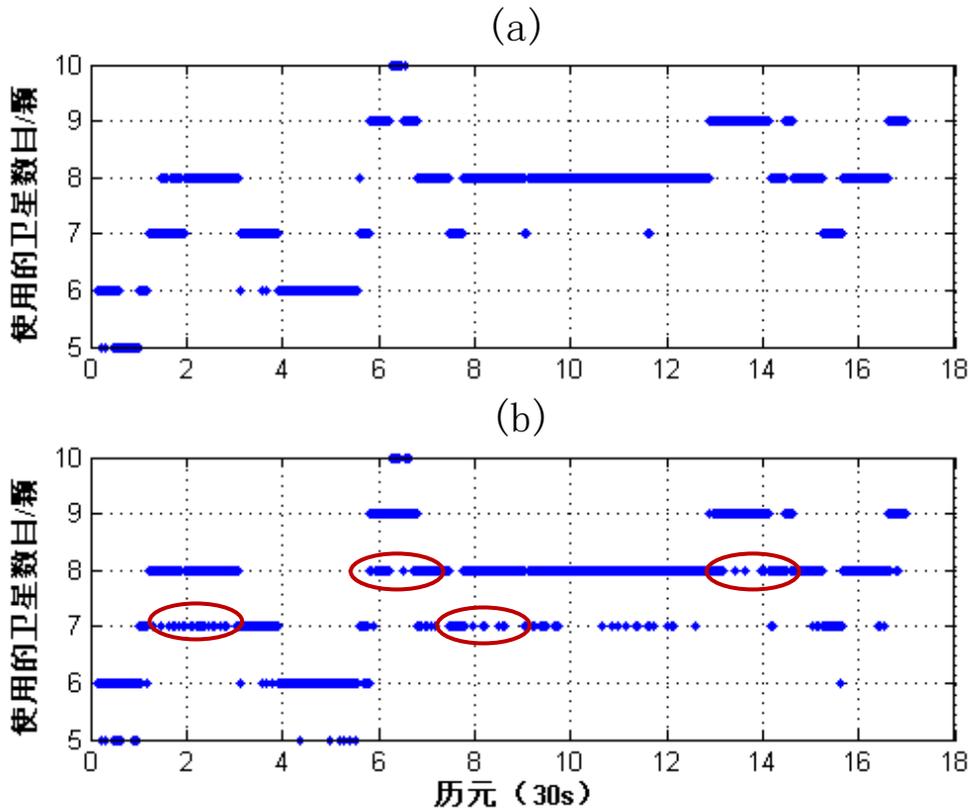


图 4.4 未做故障检测(a)和进行故障检测(b)双频动态定位使用卫星数目对比

如图所示，使用故障检测的情况下，更多卫星被剔除出来，图中红圈标记了几处明显的位置。经过故障检测处理之后，可以看到，定位精度得到了明显改善，可靠性得到了很大提高，更能适应更为复杂的观测条件。需要指出的是，程序对一个历元通过循环剔除的最大卫星数做了限制，设置为最多剔除 4 颗卫星。因为每尝试一种情况需要重新进行一轮最小二乘迭代，检索的卫星数越多计算负荷越大，这对于接收机的芯片处理能力来说是很大的考验，甚至不可接受。而且一般情况下很少会出现单历元多个粗差，否则也会因为可用卫星数太少而得不到合适的精度。

4.4 本章小结

本章介绍了常用的实时动态定位参数估计方法，包括序贯最小二乘法和 Kalman 滤波法，对两种方法的定位结果进行了比较，在双频动态定位试验中，序贯最小二乘法和 Kalman 滤波法估计的结果精度基本一致。重点介绍了 Kalman 滤波算法初值估计策略，使用非线性最小二乘法迭代对初值进行估计，利用残差进行故障探测，剔除伪距粗差，以获得稳定可靠的初值。

第 5 章 程序实现和算例分析

本文的最终目的是编写一套基于差分增强改正信息的运行可靠的用户端程序，采用了便于移植到接收机开发环境的 C 语言进行编程，使用 PC 端编译器进行调试和数据测试。

5.1 用户端程序设计

用户端程序在算法上参考了 GPS 精密单点定位的相关理论，使用相似的数学原理和误差改正模型^[47]，在此基础上加入差分增强信息的改正模块以改善用户定位精度。以下是程序的基本运行流程：

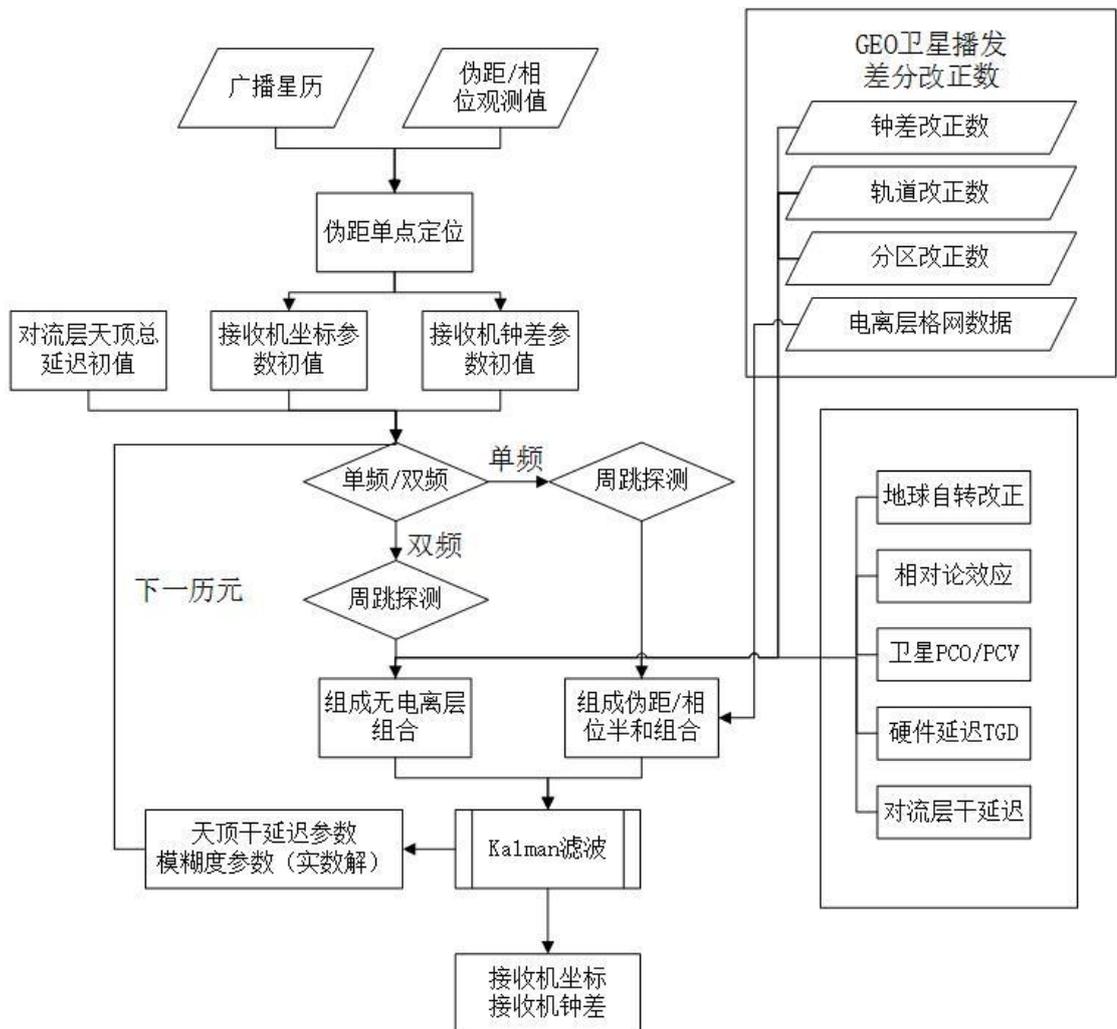


图 5.1 基于差分增强改正信息的用户定位程序运行流程

程序使用的数据文件分为实时数据和非实时参数文件，实时数据包括卫星电

文（广播星历）、观测文件、北斗 GEO 卫星播发的差分增强信息（钟差改正数、轨道改正数、分区综合改正数以及电离层格网数据），非实时参数文件主要包括卫星天线相位中心改正参数文件等。

用户接收机从卫星端实时接收数据，得到观测数据后首先搜索可用的伪距观测值，然后配合广播星历进行伪距单点定位。标准伪距单点定位的作用是获取后续精密定位的参数初值，包括接收机概略坐标和接收机钟差^[48]。如果伪距观测值中含有粗差，参数迭代可能不会收敛，因此在迭代过程中需要采取合适的粗差剔除策略，将粗差剔除并尽可能保留最多的有效数据参与后续精密定位解算。

从 GEO 卫星获取的实时差分增强信息按照既定的时间匹配策略与观测数据进行匹配，以获得最佳改正效果，数据时间匹配是算法的一个关键点。精密定位分为单频和双频两个模块。区别主要在于，两种模式采用的周跳探测策略不同，第三章给出详细的处理策略；此外，在第二章介绍定位的数学方法中，单频采用了半和组合联列伪距观测方程，伪距观测方程中仍然要考虑电离层改正^[15, 49]，而双频则采用了无电离层组合观测值组成观测方程消去了电离层延迟影响^[50]。两种模式中其它误差项的改正策略基本相同。

程序采用了 Kalman 滤波算法进行参数估计，待估的参数包括了接收机坐标、接收机钟差、对流层天顶总延迟参数以及对每颗卫星的模糊度实数解。定位采用的误差改正模型和数据处理策略见表 5.1 所示：

表 5.1 误差改正模型和数据处理策略

项目	误差模型与处理策略	
	单频	双频
星历	广播星历	
观测值	伪距相位半和组合+伪距观测值	伪距相位无电离层组合
卫星轨道和钟差	差分增强信息中的轨道改正数及钟差改正数	
电离层延迟	差分增强信息中的电离层格网数据	通过无电离层组合消除
对流层延迟	Saastamoinen 模型改正天顶干延迟部分,映射函数采用 NMF (Niell, 1996), 天顶总延迟作为参数进行估计	
测站坐标位移	未进行固体潮、极潮、海洋负荷等改正	
天线相位中心改正 (PCV/PCO)	卫星天线相位中心改正采用 IGS 提供的 ANTEX 文件进行改正改正	
硬件延迟	使用广播星历中的 TGD 参数进行改正	

续表 5.1 误差改正模型和数据处理策略

其它误差项	地球自转效应、相对论效应等等可以通过已有的规范模型进行改正
剩余不能模型化的误差	通过差分增强信息中的分区综合改正进行补偿
参数估计方法	Kalman 滤波

5.2 基于广域增强信息的精密定位算例

现阶段的工作以系统验证为目的，验证过程选取了若干参考站（参与差分改正信息的解算）以及非参考站（未参与差分改正信息的解算）观测数据，分单频和双频进行模拟实时动态精密单点定位。“模拟实时动态”的含义有两点，首先是实时性，用户端程序验证采用的差分增强信息来自于数据处理中心的服务器，而非经由 GEO 卫星转发，所以这里的实时性是理论上的；其次是动态性，验证使用的观测数据都是由天线位置固定的接收机采集的，按照动态模式每历元解算一组结果，而不是真实的动态环境。

5.2.1 参考站数据验证

程序首先对参考站数据进行了测试，选取了位于北京、汕头、南京、武汉以及上海五个参考站，采集了三天数据，采样率为 30s，分单频（B3）和双频进行加差分改正和不加差分改正的模拟实时动态定位，定位结果见图 5.2 所示（限于篇幅，每个站只展示了一天的结果图）：

1). 单频

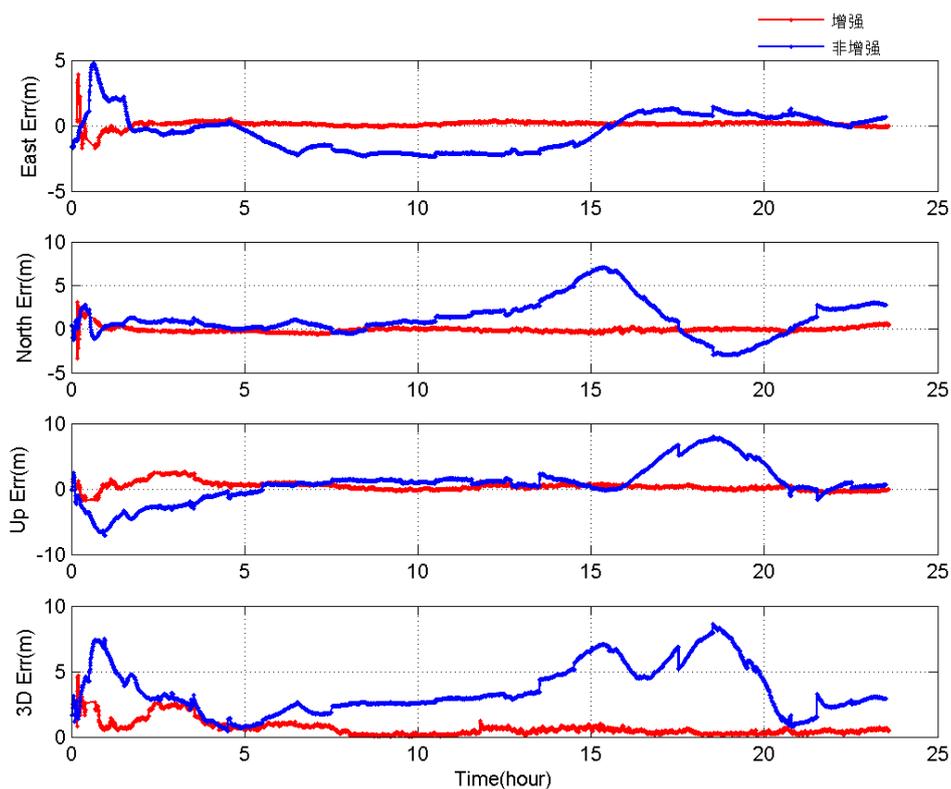


图 5.2 (a) 北京站单频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

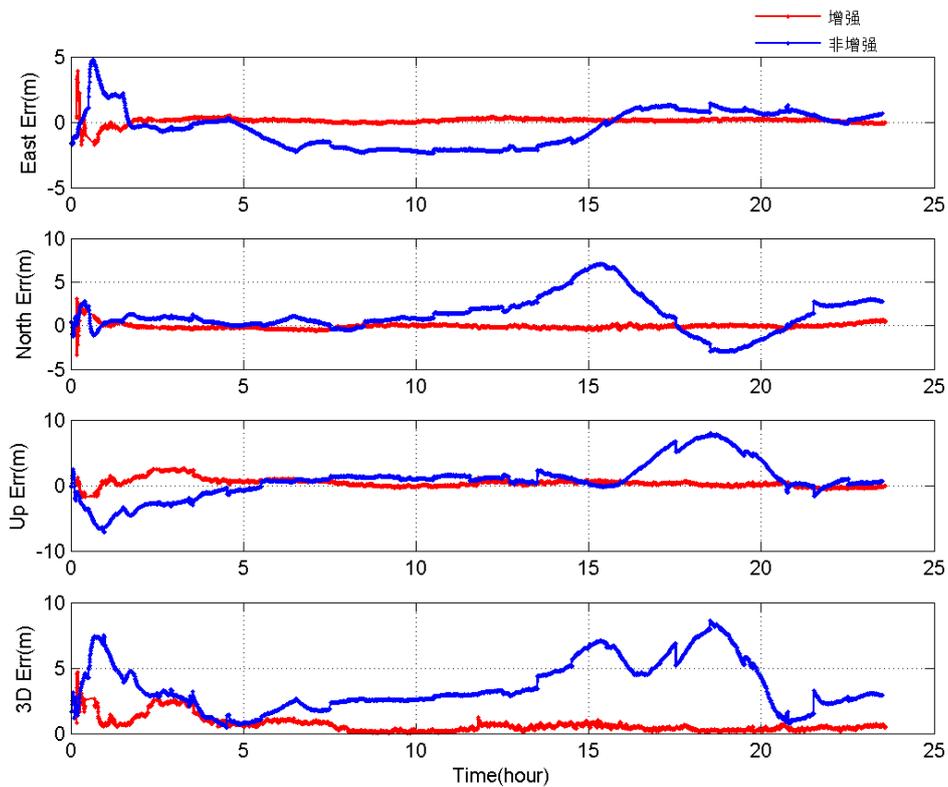


图 5.2 (b) 汕头站单频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

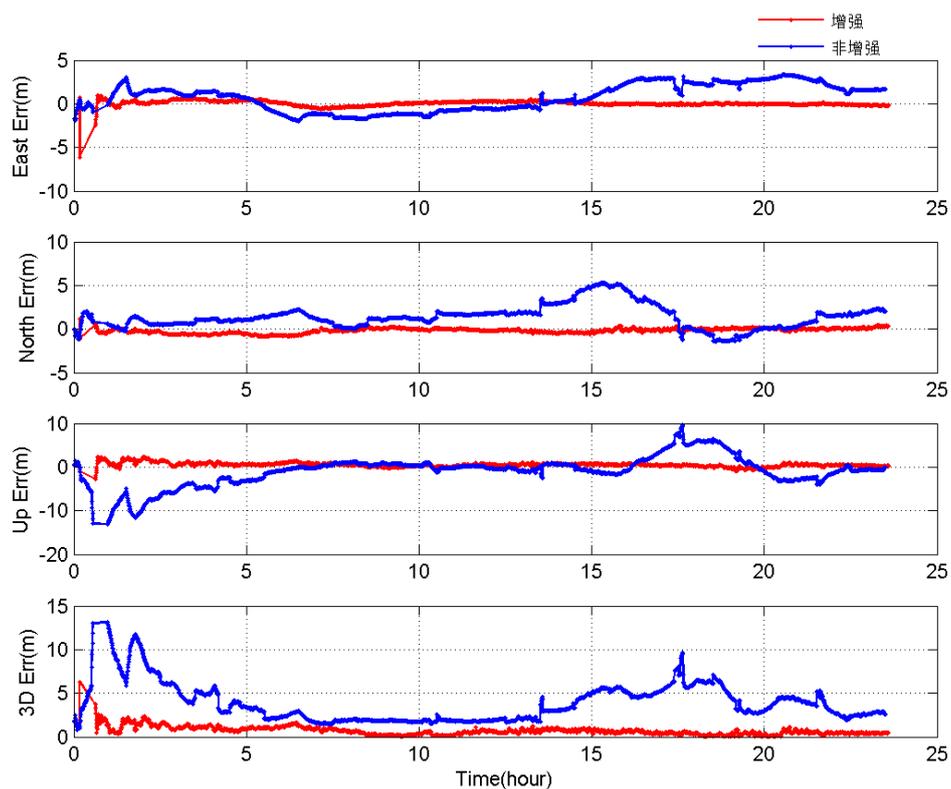


图 5.2(c) 南京站单频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

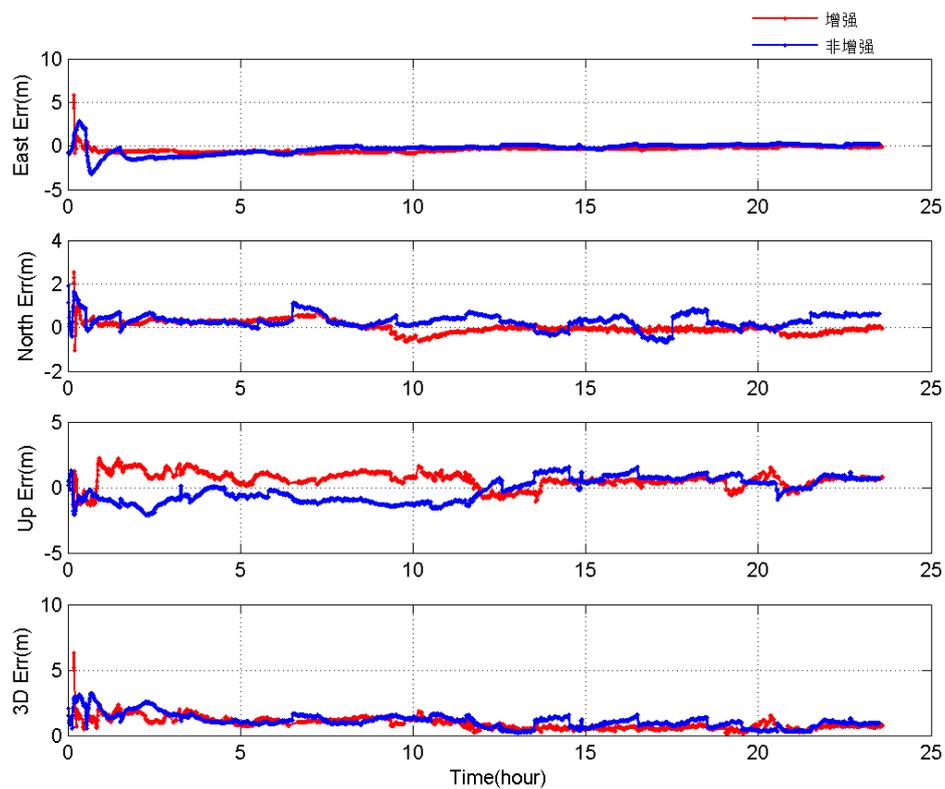


图 5.2(d) 武汉站单频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

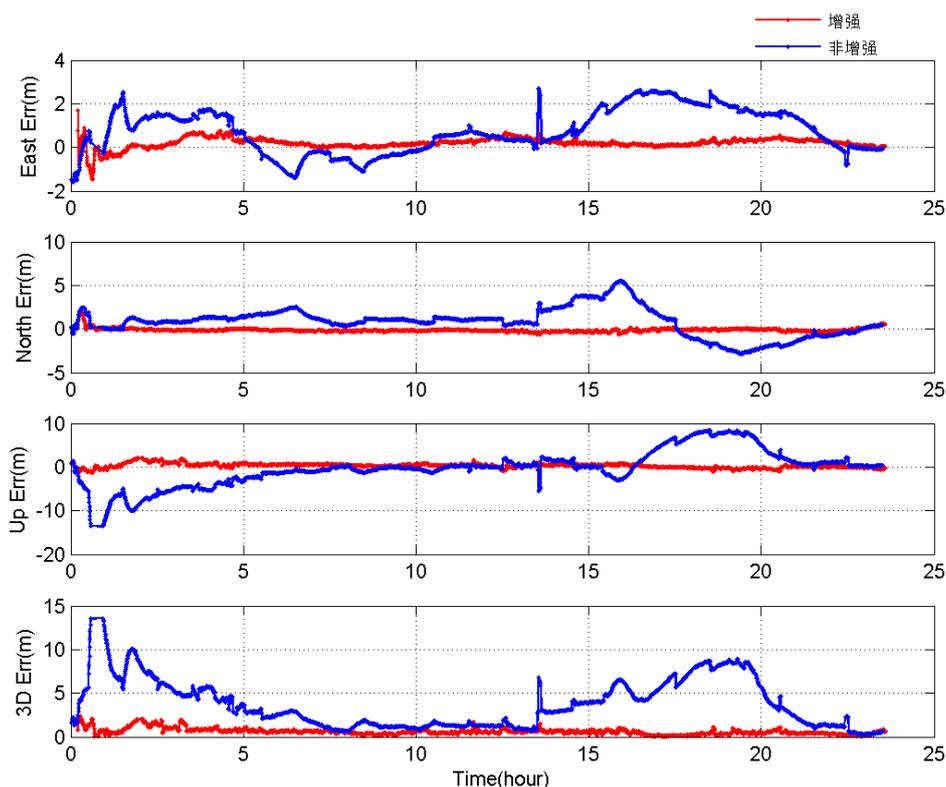


图 5.2(e) 上海站单频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

图 5.2 反映了分别采用 5 个观测站数据进行单频测试的结果，图中红色线条表示加入差分增强信息后的定位结果，蓝色线条表示未加入差分增强信息的定位结果。对定位结果分 ENU 三个方向进行了 RMS 值统计，统计结果见表 5.2 所示。

表 5.2 5 个参考站三天数据进行加差分改正与不加差分改正单频动态定位结果 RMS 统计

		RMS/m	Day1	Day2	Day3
北京	E 方向	不加差分改正	1.478	0.735	0.802
		加差分改正	0.278	0.407	0.454
	N 方向	不加差分改正	2.414	1.475	1.229
		加差分改正	0.300	0.184	0.246
	U 方向	不加差分改正	2.891	2.048	1.646
		加差分改正	0.732	0.570	0.529
	3D	不加差分改正	4.046	2.629	2.206
		加差分改正	0.839	0.724	0.739

续表 5.2 5 个参考站三天数据进行加差分改正与不加差分改正单频动态定位结果 RMS 统计

汕头	E 方向	不加差分改正	1.578	0.807	1.165
		加差分改正	0.282	0.369	0.407
	N 方向	不加差分改正	1.966	0.879	0.995
		加差分改正	0.295	0.112	0.183
	U 方向	不加差分改正	4.055	1.833	2.821
		加差分改正	0.996	0.623	0.812
	3D	不加差分改正	4.774	2.187	3.210
		加差分改正	1.077	0.733	0.927
南京	E 方向	不加差分改正	1.713	1.018	0.872
		加差分改正	0.288	0.384	0.885
	N 方向	不加差分改正	1.957	1.178	1.042
		加差分改正	0.326	0.191	0.223
	U 方向	不加差分改正	3.492	1.853	1.381
		加差分改正	0.700	0.803	0.625
	3D	不加差分改正	4.354	2.420	1.937
		加差分改正	0.824	0.911	1.107
武汉	E 方向	不加差分改正	0.700	0.831	0.766
		加差分改正	0.503	0.572	0.683
	N 方向	不加差分改正	0.435	1.067	0.971
		加差分改正	0.262	0.167	0.240
	U 方向	不加差分改正	0.915	1.690	1.422
		加差分改正	0.835	0.477	0.417
	3D	不加差分改正	1.231	2.165	1.885
		加差分改正	1.010	0.755	0.836
上海	E 方向	不加差分改正	1.273	0.881	0.501
		加差分改正	0.309	0.389	0.621
	N 方向	不加差分改正	1.825	1.072	1.162
		加差分改正	0.234	0.255	0.242
	U 方向	不加差分改正	3.926	1.924	1.951
		加差分改正	0.575	0.605	0.798
	3D	不加差分改正	4.513	2.373	2.325
		加差分改正	0.693	0.763	1.040

计算使用差分改正后的定位结果相对不使用差分改正的定位结果在精度上的改善幅度，定位精度采用表 5.2 中的 RMS 值来衡量，结果见表 5.3。

表 5.3 5 个参考站三天数据进行加差分改正后单频动态定位精度提高比例

百分比		Day1	Day2	Day3
北京	E 方向	81.19%	44.63%	43.39%
	N 方向	87.57%	87.53%	79.98%
	U 方向	74.68%	72.17%	67.86%
	3D	79.26%	72.46%	66.50%
汕头	E 方向	82.13%	54.28%	65.06%
	N 方向	84.99%	87.26%	81.61%
	U 方向	75.44%	66.01%	71.22%
	3D	77.44%	66.48%	71.12%
南京	E 方向	83.19%	62.28%	-1.49%
	N 方向	83.34%	83.79%	78.60%
	U 方向	79.95%	56.66%	54.74%
	3D	81.07%	62.36%	42.85%
武汉	E 方向	28.14%	31.17%	10.84%
	N 方向	39.77%	84.35%	75.28%
	U 方向	8.74%	71.78%	70.68%
	3D	17.95%	65.13%	55.65%
上海	E 方向	75.73%	55.85%	-23.95%
	N 方向	87.18%	76.21%	79.17%
	U 方向	85.35%	68.56%	59.10%
	3D	84.64%	67.85%	55.27%

从图 5.2、表 5.2 以及表 5.3 可以看出，加入差分改正信息后的单频动态定位精度在三维方向上都有改善，且大部分情况下改善幅度都超过 50%。个别情况下，比如南京站第三天的 E 方向上以及上海站第三天的 E 方向上加差分改正信息的精度反而比不加差分改正信息的差一些，首先应注意到其精度并不低，其次单频情况下观测值中的一些误差改正效果不会很好，收敛后仍然会出现波动起伏，但整体三维精度是改善的。另外可以看到，加差分改正后的定位结果收敛时间明显更短，收敛后整体上更为平稳。

2). 双频

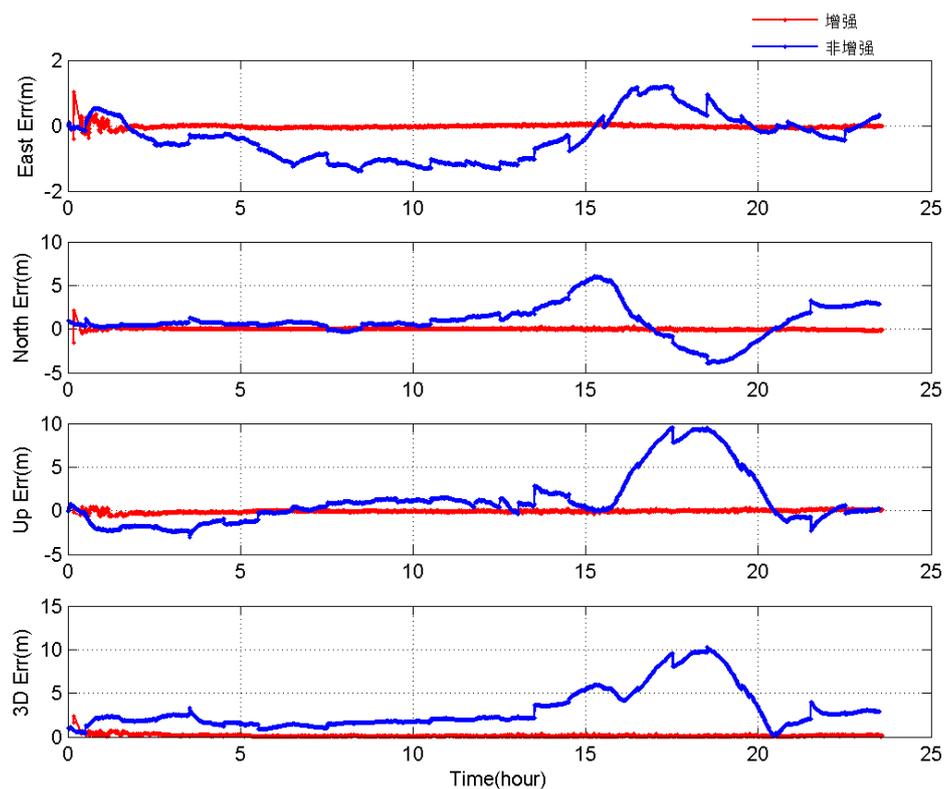


图 5.3 (a) 北京站双频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

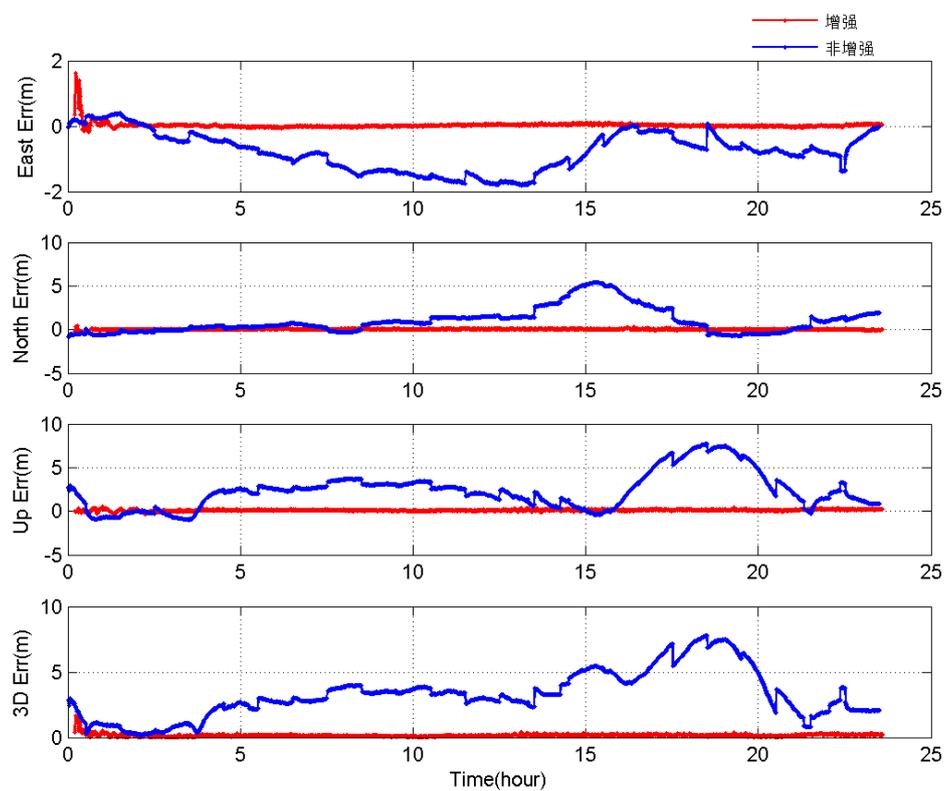


图 5.3 (b) 汕头站双频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

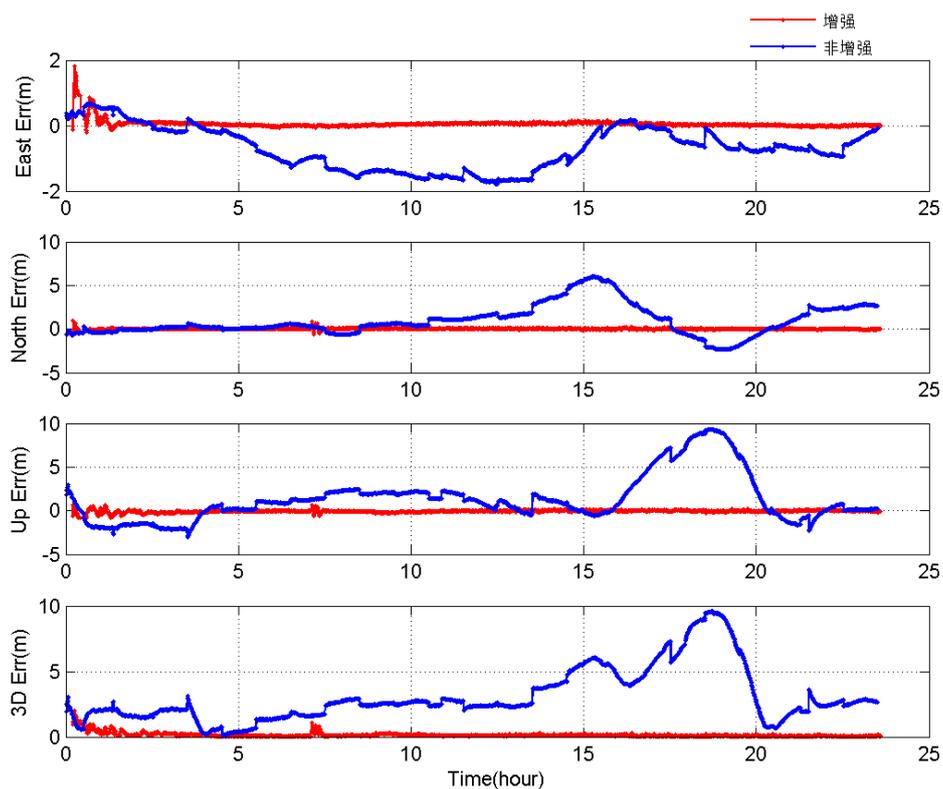


图 5.3(c) 南京站双频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

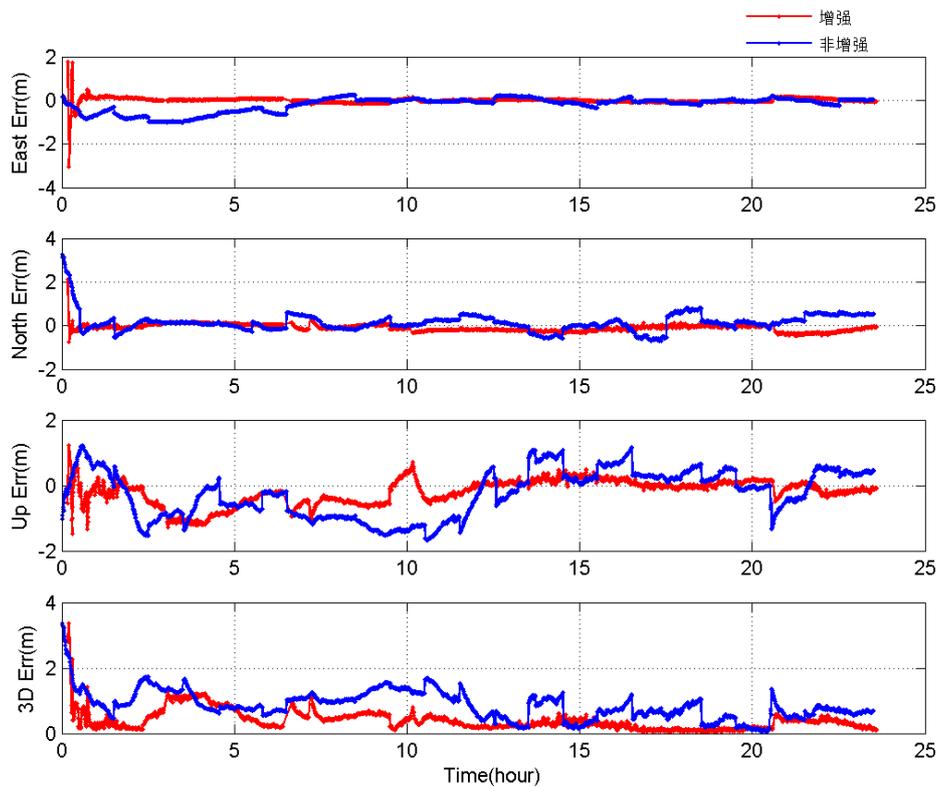


图 5.3(d) 武汉站双频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

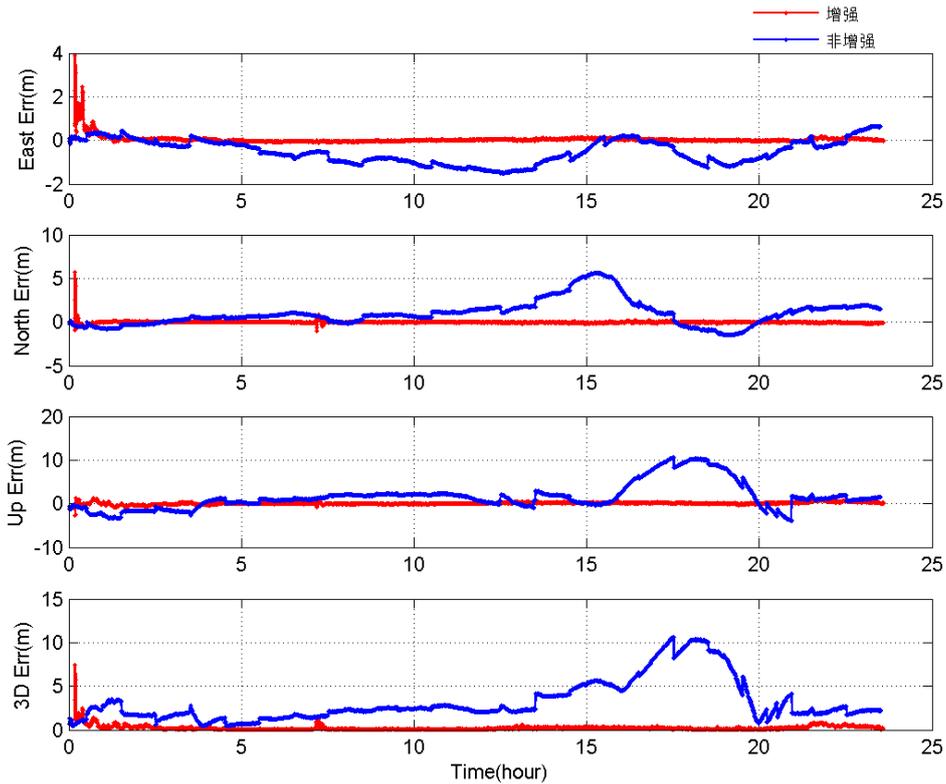


图 5.3 (e) 北京站双频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

同图 5.2 单频情况，图 5.3 反映了分别采用 5 个观测站数据进行的双频测试的结果，图中红色线条表示加入差分增强信息后的定位结果，蓝色线条表示未加入差分增强信息的定位结果。同样对定位结果分 ENU 三个方向进行了 RMS 值统计，统计结果见表 5.4。

表 5.4 5 个参考站三天数据进行加差分改正与不加差分改正双频动态定位结果 RMS 统计

		RMS/m	Day1	Day2	Day3
北京	E 方向	不加差分改正	0.773	0.371	0.391
		加差分改正	0.056	0.195	0.178
	N 方向	不加差分改正	2.076	1.070	0.870
		加差分改正	0.087	0.080	0.068
	U 方向	不加差分改正	3.212	1.605	1.351
		加差分改正	0.148	0.205	0.166
	3D	不加差分改正	3.902	1.964	1.654
		加差分改正	0.180	0.294	0.252

续表 5.4 5 个参考站三天数据进行加差分改正与不加差分改正双频动态定位结果 RMS 统计

汕头	E 方向	不加差分改正	0.963	0.395	0.420
		加差分改正	0.078	0.164	0.101
	N 方向	不加差分改正	1.768	0.635	0.565
		加差分改正	0.068	0.066	0.095
	U 方向	不加差分改正	3.137	1.123	1.036
		加差分改正	0.153	0.143	0.159
	3D	不加差分改正	3.727	1.349	1.252
		加差分改正	0.185	0.227	0.211
南京	E 方向	不加差分改正	0.947	0.455	0.548
		加差分改正	0.130	0.274	0.165
	N 方向	不加差分改正	1.989	0.915	0.699
		加差分改正	0.079	0.113	0.067
	U 方向	不加差分改正	2.985	1.601	1.088
		加差分改正	0.147	0.264	0.130
	3D	不加差分改正	3.71	1.899	1.404
		加差分改正	0.211	0.397	0.220
武汉	E 方向	不加差分改正	0.382	0.263	0.283
		加差分改正	0.122	0.176	0.254
	N 方向	不加差分改正	0.439	0.793	0.586
		加差分改正	0.180	0.097	0.099
	U 方向	不加差分改正	0.761	1.394	1.034
		加差分改正	0.425	0.151	0.279
	3D	不加差分改正	0.958	1.625	1.222
		加差分改正	0.477	0.251	0.390
上海	E 方向	不加差分改正	0.743	0.480	0.575
		加差分改正	0.198	0.193	0.126
	N 方向	不加差分改正	1.760	0.706	0.503
		加差分改正	0.170	0.082	0.134
	U 方向	不加差分改正	3.516	1.150	1.110
		加差分改正	0.263	0.164	0.314
	3D	不加差分改正	4.002	1.432	1.348
		加差分改正	0.371	0.267	0.364

同表 5.3 单频情况, 计算了双频时使用差分改正后的定位结果相对于不使用差分改正的定位结果在精度上的改善幅度, 结果见表 5.5。

表 5.5 5 个参考站三天数据进行加差分改正后双频动态定位精度提高比例

百分比		Day1	Day2	Day3
北京	E 方向	92.76%	47.44%	54.48%
	N 方向	95.81%	92.52%	92.18%
	U 方向	95.39%	87.23%	87.71%
	3D	95.39%	85.03%	84.76%
汕头	E 方向	91.90%	58.48%	75.95%
	N 方向	96.15%	89.61%	83.19%
	U 方向	95.12%	87.27%	84.65%
	3D	95.04%	83.17%	83.15%
南京	E 方向	86.27%	39.78%	69.89%
	N 方向	96.03%	87.65%	90.41%
	U 方向	95.08%	83.51%	88.05%
	3D	94.31%	79.09%	84.33%
武汉	E 方向	68.06%	33.08%	10.25%
	N 方向	59.00%	87.77%	83.11%
	U 方向	44.15%	89.17%	73.02%
	3D	50.21%	84.55%	68.09%
上海	E 方向	73.35%	59.79%	78.09%
	N 方向	90.34%	88.39%	73.36%
	U 方向	92.52%	85.74%	71.71%
	3D	90.73%	81.35%	73.00%

结合图 5.3、表 5.4 和表 5.5，在双频情况下，加入差分后的动态定位精度显著好于不加差分的定位精度，三维精度提高均超过 50%，大多数超过 70%，收敛时间也大幅缩短。为了进一步验证系统播发的差分增强改正数的性能以及程序对不同观测数据的适应性，又对非参考站观测数据进行了测试。

5.2.2 非参考站数据验证

对位于成都地区的某用户站进行了连续 4 天数据采集，数据采集率同参考站一样也是 30s。随后使用该观测数据进行了模拟实时动态定位测试，单频（B3 频）和双频的测试结果如下。

1). 单频

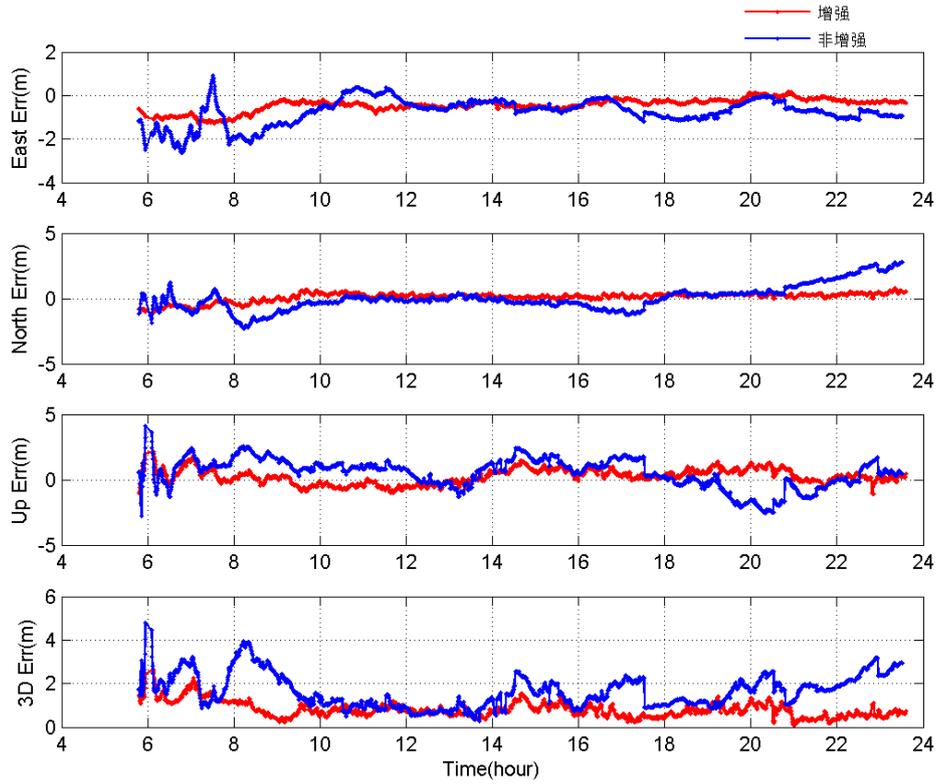


图 5.4(a) 12月20日非参考站单频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

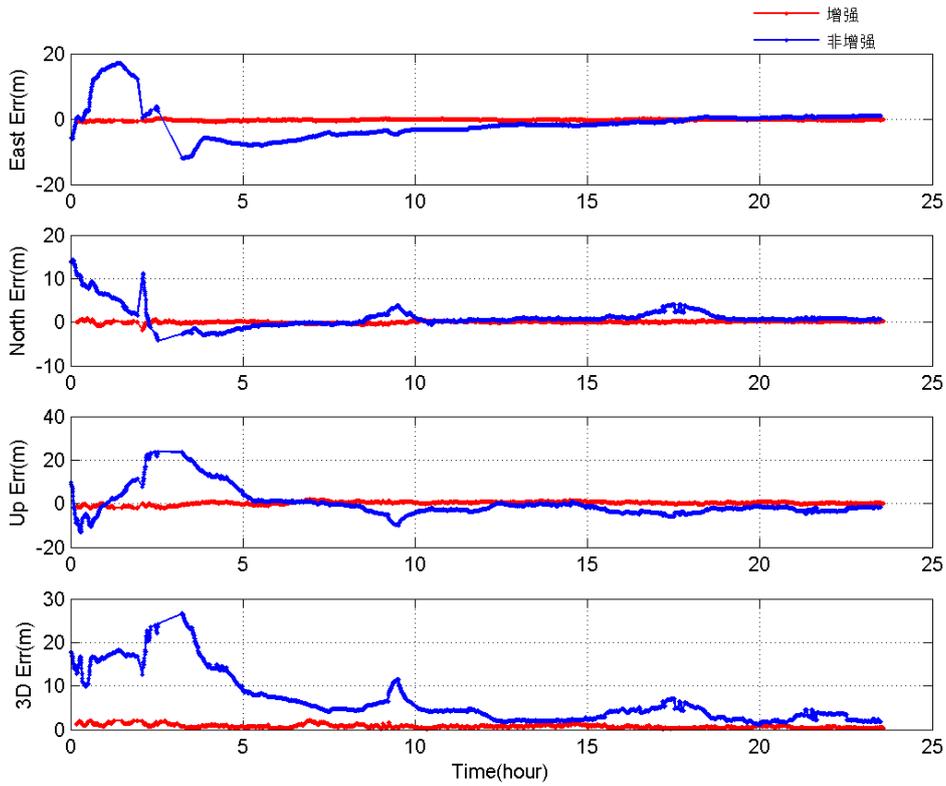


图 5.4(b) 12月21日非参考站单频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

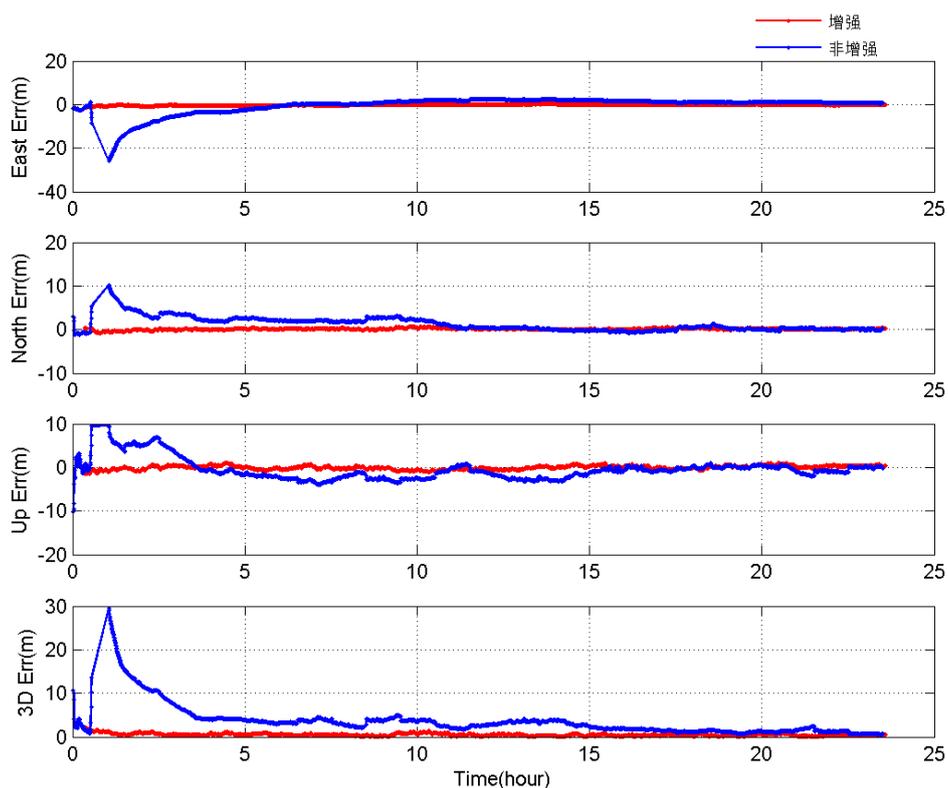


图 5.4(c) 12月22日非参考站单频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

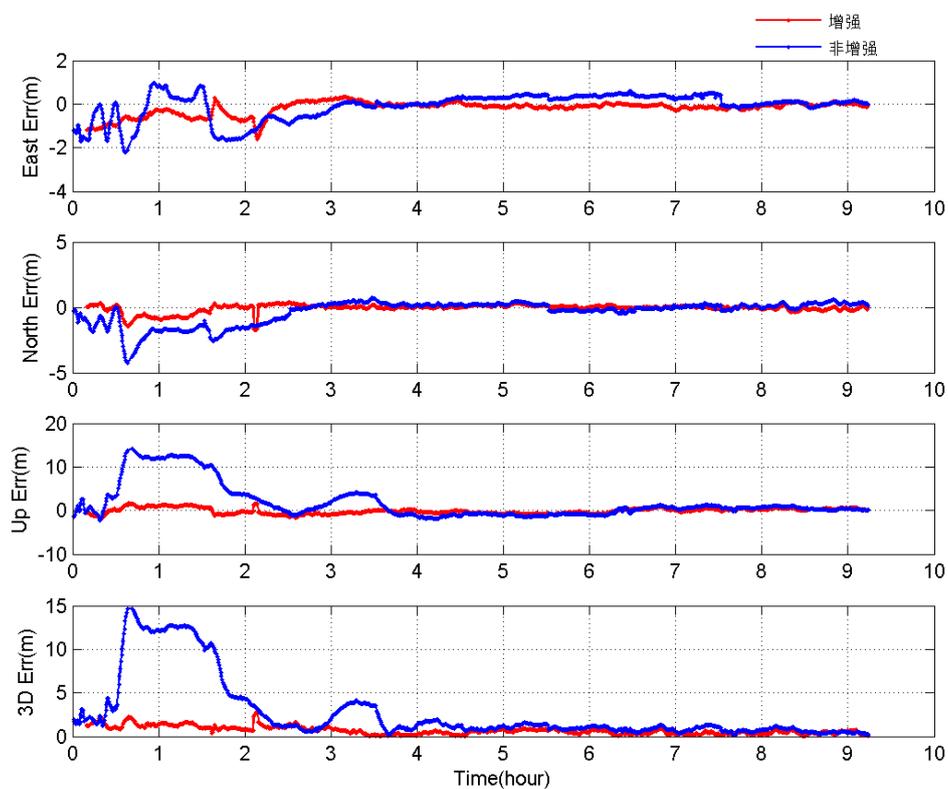


图 5.4(d) 12月23日非参考站单频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

图 5.4 反映了非参考站分别采用 4 天观测数据进行单频测试的结果, 图中红色线条表示加入差分增强信息后的定位结果, 蓝色线条表示未加入差分增强信息的定位结果。对定位结果分 ENU 三个方向进行了 RMS 值统计, 统计结果见表 5.6。

表 5.6 非参考站四天数据进行加差分改正与不加差分改正单频动态定位结果 RMS 统计

RMS/m		16-12-20	16-12-21	16-12-22	16-12-23
E 方向	不加差分改正	0.945	5.214	3.962	0.609
	加差分改正	0.525	0.343	0.301	0.370
N 方向	不加差分改正	0.951	2.640	1.978	0.928
	加差分改正	0.347	0.233	0.238	0.314
U 方向	不加差分改正	1.217	5.749	2.338	4.377
	加差分改正	0.611	0.745	0.443	0.668
3D	不加差分改正	1.810	8.198	5.008	4.516
	加差分改正	0.877	0.853	0.586	0.826

计算了单频时使用差分改正后的定位结果相对于不使用差分改正的定位结果在精度上的改善幅度, 结果见表 5.7。

表 5.7 非参考站四天数据进行加差分改正后单频动态定位精度提高比例

百分比	16-12-20	16-12-21	16-12-22	16-12-23
E 方向	44.44%	93.42%	92.40%	39.24%
N 方向	63.51%	91.17%	87.97%	66.16%
U 方向	49.79%	87.04%	81.05%	84.74%
3D	51.55%	89.60%	88.30%	81.71%

结合图 5.4、表 5.6 以及表 5.7 可以看出, 加入增强信息后在定位精度和收敛时间两方面都比不加增强信息有很大改善。在不加增强信息的情况下, 使用相位观测数据进行定位往往会出现收敛时间长、收敛期间及收敛之后的精度都不太理想的情况。加入增强改正信息之后, 定位中涉及的很多误差得到有效削弱, 尤其是分区改正数对相位观测值的改正, 使得定位精度得到有效提高, 三维精度提高均在 50%以上。

2). 双频

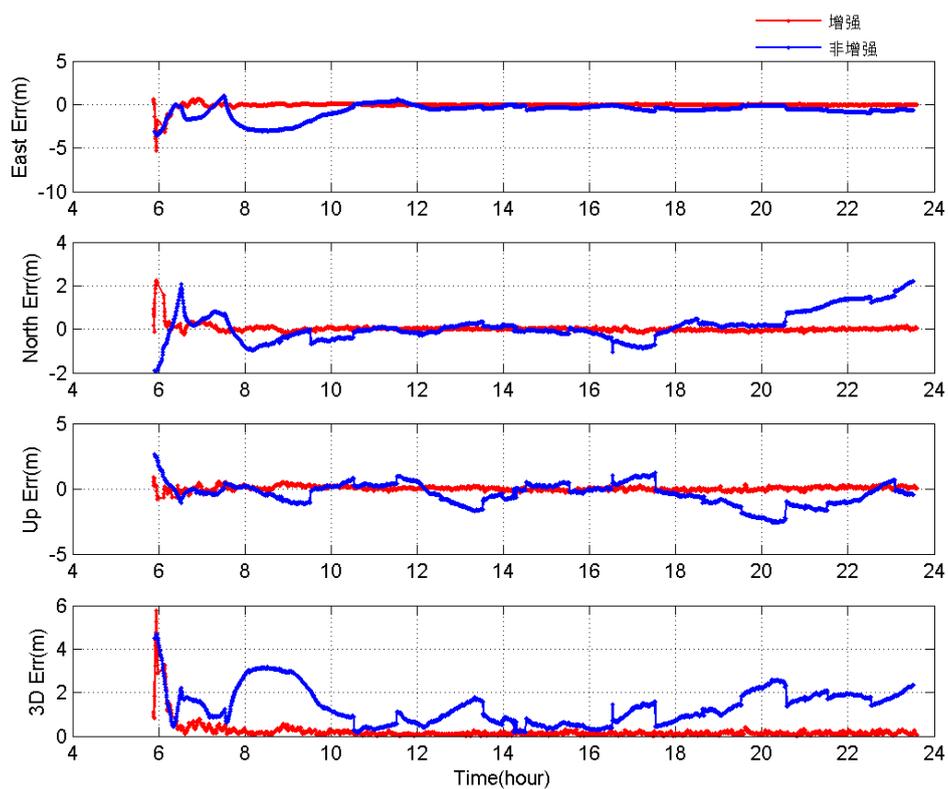


图 5.5(a) 12月20日非参考站双频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

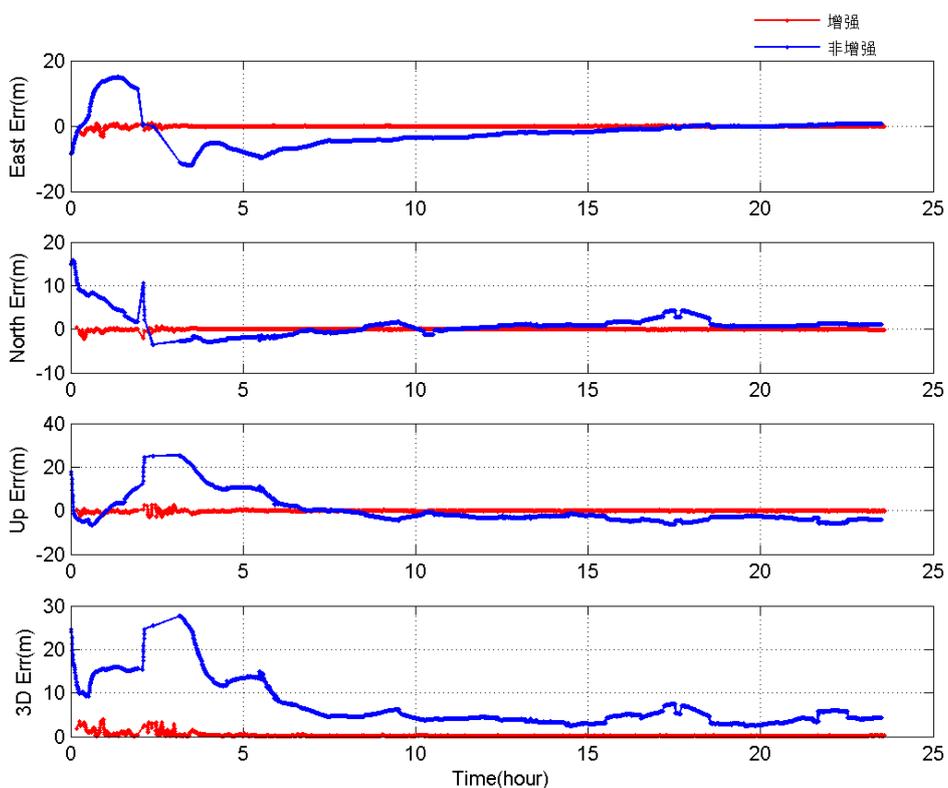


图 5.5(b) 12月21日非参考站双频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

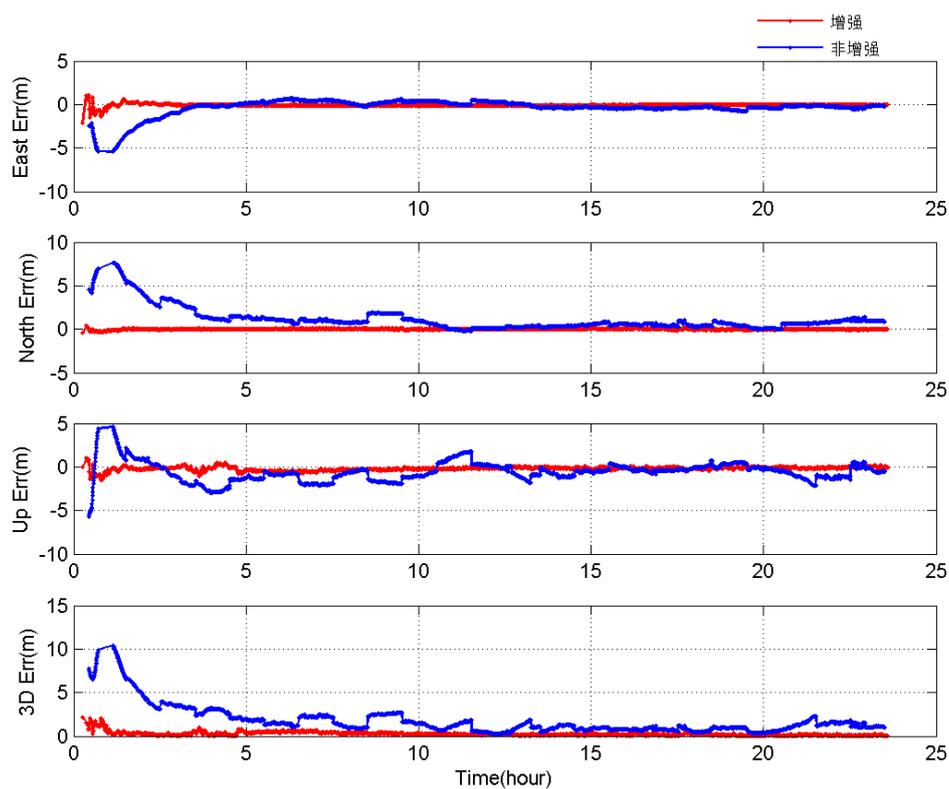


图 5.5(c) 12月22日非参考站双频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

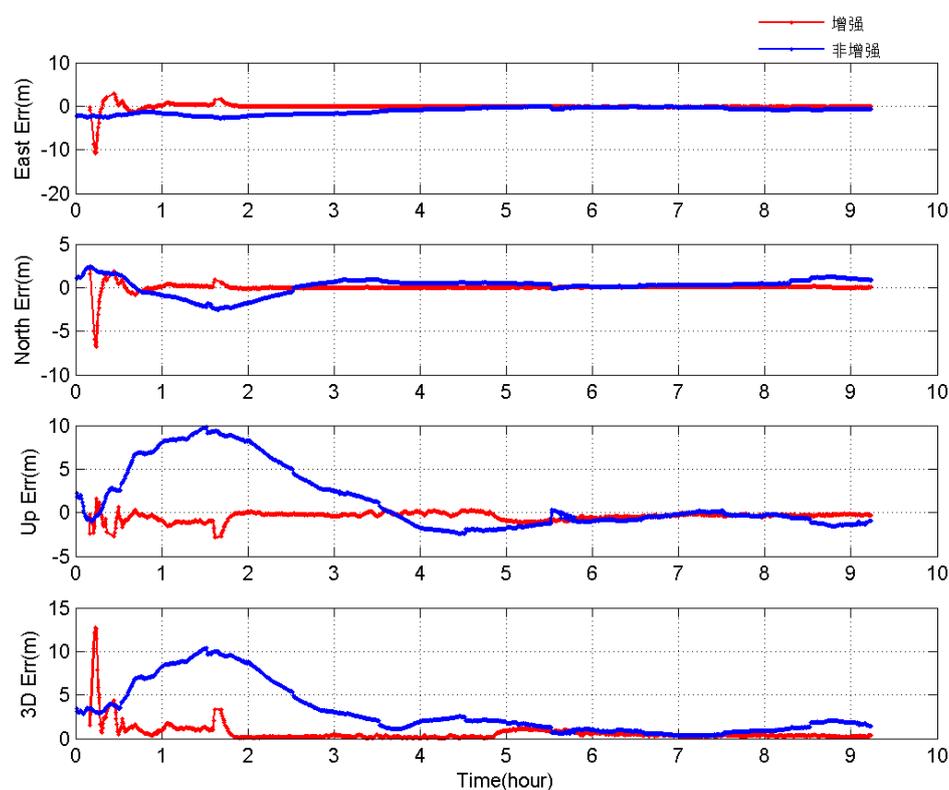


图 5.5(d) 12月23日非参考站双频加差分改正与不加差分改正动态定位结果对比

同图 5.4 单频情况, 图 5.5 反映了分别采用 4 天观测数据进行双频测试的结果, 图中红色线条表示加入差分增强信息后的定位结果, 蓝色线条表示未加入差分增强信息的定位结果。对定位结果分 ENU 三个方向进行了 RMS 值统计, 统计结果见表 5.8。

表 5.8 非参考站四天数据进行加差分改正与不加差分改正单频动态定位结果 RMS 统计

RMS/m		16-12-20	16-12-21	16-12-22	16-12-23
E 方向	不加差分改正	1.1104	5.135	0.946	1.300
	加差分改正	0.329	0.332	0.163	0.813
N 方向	不加差分改正	0.693	2.675	1.729	0.945
	加差分改正	0.163	0.161	0.063	0.503
U 方向	不加差分改正	0.919	6.082	1.228	3.841
	加差分改正	0.154	0.379	0.97	0.596
3D	不加差分改正	1.600	8.397	2.322	4.164
	加差分改正	0.398	0.529	0.345	1.126

同表 5.7 单频情况, 计算了双频时使用差分改正后的定位结果相对于不使用差分改正的定位结果在精度上的改善幅度, 结果见表 5.9。

表 5.9 非参考站四天数据进行加差分改正后双频动态定位精度提高比例

百分比	16-12-20	16-12-21	16-12-22	16-12-23
E 方向	70.37%	93.53%	82.77%	37.46%
N 方向	76.48%	93.98%	96.36%	46.77%
U 方向	83.24%	93.77%	21.01%	84.48%
3D	75.13%	93.70%	85.14%	72.96%

从图 5.5、表 5.8 以及表 5.9 可以看出, 同单频情况类似, 双频加差分改正后的定位结果在三维精度上比不加差分改正的普遍提高 50%以上。注意到第四天双频定位结果精度较差, 甚至比单频结果更差, 这是由于统计结果包含了当天整个数据段, 从图 5.5(d)中可以看到, 第四天双频定位结果收敛阶段偏差很大, 收敛之后很平稳, 统计结果被收敛阶段的值拉高了。

5.3 精度评定

利用差分改正信息可以对仅使用广播星历的用户定位精度进行改善, 以实现更为便捷的高精度定位服务。本节基于前文的算例, 分别对参考站以及非参考站观测数据使用差分增强改正信息的动态定位精度进行了评定, 作为应用时的参考。

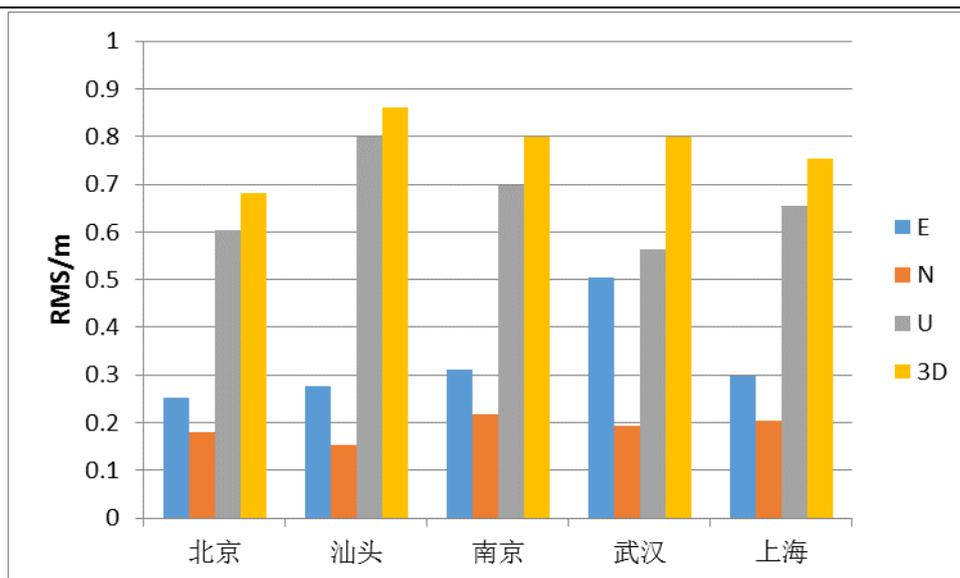


图 5.6 参考站单频加差分改正动态定位结果 RMS 统计

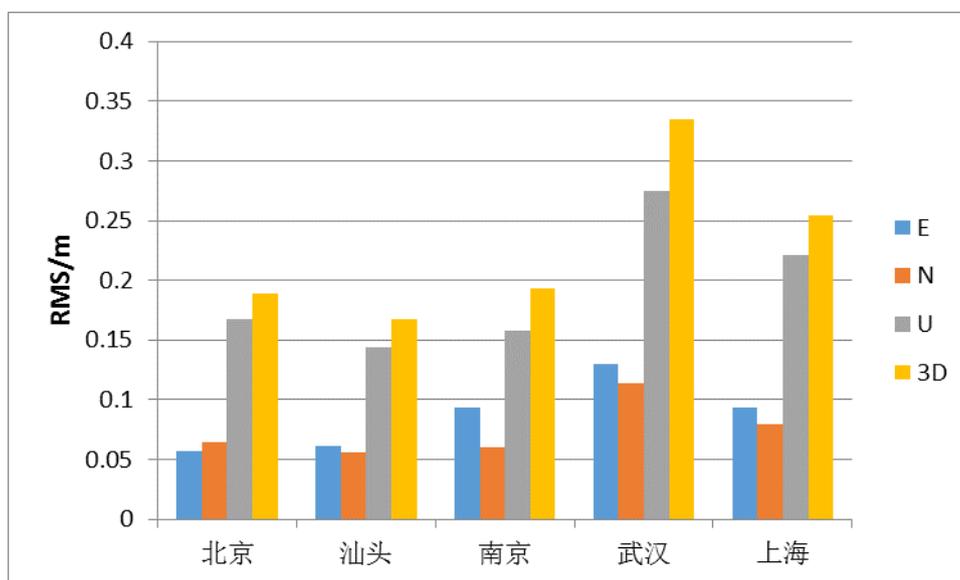


图 5.7 参考站双频加差分改正动态定位结果 RMS 统计

图 5.6 和图 5.7 分别给出了使用参考站数据进行加差分改正的实时动态定位的单频和双频定位结果 RMS 值统计情况，统计时扣除了起始阶段 15 分钟的收敛时间。可以看到，单频的水平精度优于 0.5m，高程精度在 0.5~0.8m 之间，三维精度优于 1m。双频水平精度则在 0.05~0.15m 之间，高程精度在 0.15~0.3m 之间，三维精度则优于 0.35m。可以看到基准站数据的测试结果显示，加差分改正后的单频精度达到了亚米级，双频精度则达到了分米级。

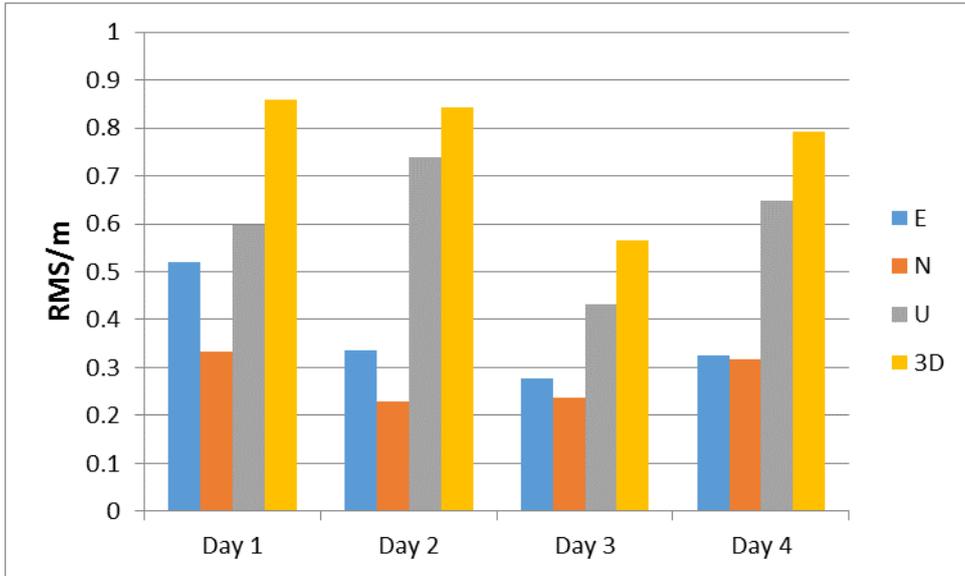


图 5.8 非参考站单频加差分改正动态定位结果 RMS 统计

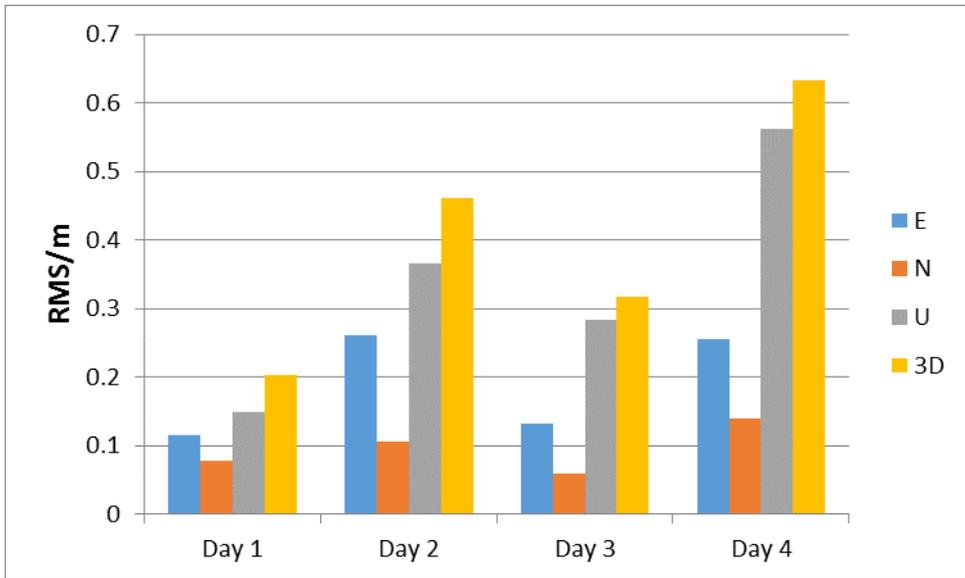


图 5.9 非参考站双频加差分改正动态定位结果 RMS 统计

图 5.8 和图 5.9 分别给出了使用非参考站数据进行加差分改正的实时动态定位的单频和双频定位结果 RMS 值统计情况，统计也扣除了前 15 分钟收敛时间。可以看到，对于单频，水平精度在 $0.2 \sim 0.6$ m 之间，高程精度在 $0.4 \sim 0.8$ m 之间，三维精度优于 1m；双频水平精度为 $0.05 \sim 0.3$ m，高程精度在 $0.1 \sim 0.6$ m 之间，三维精度则在 $0.2 \sim 0.65$ m 之间。整体上也实现了单频亚米级和双频分米级的精度。可以看到，非基准站测试结果比基准站略差，且精度波动幅度较大，这是由于基准站参与了差分改正的计算，可以更好地削弱误差项，且基准站观测环境相对更稳定，因此测试结果也更加稳定，精度更高。

5.4 本章小结

本章的主要工作是介绍了北斗分米级广域差分增强的用户端程序,包括程序的运行流程,采用的主要误差改正模型和数据处理策略。然后使用该程序对参考站和非参考站观测数据分单频和双频进行了模拟实时动态定位测试,测试对比了加差分改正和不加差分改正的定位精度,对比结果表明使用差分改正信息绝大多数情况下可以显著提升定位精度,个别情况下在单个方向上会有不同呈现。同时对使用差分改正信息的定位结果进行了精度和收敛时间评定,评定结果显示,在使用差分改正信息的情况下,扣除15分钟收敛时间,模拟的动态实时定位参考站单频水平方向可以达到 $0.15\sim 0.5\text{m}$,高程方向可以达到 $0.5\sim 0.8\text{m}$,而双频水平方向可以达到 $0.05\sim 0.15\text{m}$,高程方向可以达到 $0.15\sim 0.3\text{m}$ 。而非参考站单频水平方向可以达到 $0.2\sim 0.6\text{m}$,高程方向可以达到 $0.4\sim 0.8\text{m}$,双频水平方向可以达到 $0.05\sim 0.3\text{m}$,高程方向可以达到 $0.1\sim 0.6\text{m}$ 。总体实现了单频亚米级定位精度以及双频分米级定位精度。

第 6 章 结论与展望

6.1 结论

在世界各国纷纷建立起各自的星基增强系统以及我国北斗卫星导航系统进入新的发展阶段这样的背景下,建立我国自己的广域星基增强系统越来越受到关注。建立该系统将会拓展北斗卫星导航系统的应用范围,提升系统的服务性能,为广大用户提供更简单廉价的高精度定位导航服务。北斗广域差分增强能够为中国区域提供分米级(双频)导航定位服务,本文基于该系统播发的差分改正信息,编制了用户端定位程序,评定了定位精度和收敛时间,对系统性能进行了验证。本文的主要工作如下:

- 1、介绍了星基增强的概况,对差分信息及其使用方法进行了说明。

- 2、给出了利用伪距和相位观测值进行单站精密定位的基本原理,分析了定位过程中涉及到的各种误差源,并给出了相应的处理方法。

- 3、分单频和双频详细论述了实时动态单点定位过程中的周跳处理方法,比较了几种方法的优缺点。提出了使用动态阈值对周跳探测量进行判断,有效提高了周跳探测效率,减少了误探测。

- 4、介绍了最小二乘法和滤波法等参数估计方法,重点介绍了 Kalman 滤波在动态参数估计中的应用。利用最小二乘残差进行故障探测,提高了初值解算的可靠性,同时能够对伪距观测值中的粗差进行剔除。

- 5、编写了北斗广域差分增强的用户端程序,介绍了程序的算法流程及数据处理策略,并利用该程序分别采用系统参考站(参与差分改正信息的解算)以及非参考站(未参与差分改正信息的解算)观测数据进行了实时动态定位验证。解算结果与未使用差分信息定位结果进行对比,定位精度和收敛时间明显都有改善,基本实现了实时动态定位双频分米级精度赫尔单频亚米级精度。

6.2 进一步工作的方向

本文采用北斗广域差分增强系统提供的差分信息编写了用户端定位程序,基本实现了实时动态定位双频分米级精度和单频亚米级精度,今后还将继续进行的工作包括:

- 1)、在进行周跳探测时,本文考虑使用动态阈值。目前只是针对组合探测量简单取前面若干历元进行平均的方法来确定动态阈值,这样做确实可以提高周跳

探测的适应性，但遇到观测噪声变化非常剧烈时，取平均的方式不能很好地反映序列整体的趋势，应考虑更合理的计算方法获得动态阈值。

2)、本文采用 Kalman 滤波进行参数估计，实际应用中观测噪声的设置对定位结果是有影响的，它体现在对增益矩阵的影响中，即对残差进行加权平均的过程。一般情况下，对于同一型接收机，观测值的噪声水平基本上保持在一个稳定的水平，但有时候观测条件恶劣造成观测噪声较大，如果仍然维持固定的观测噪声设置，滤波结果可能会偏离期望值，考虑对观测数据质量进行动态评价以获得更合理的噪声权阵设置。

3)、本文对于模糊度参数没有进行固定，只估计了实数解，非差模糊度固定技术现在越来越成为研究热点，这对进一步提高 PPP 定位精度，缩短收敛时间会有较大帮助，后续将尝试对此进行研究。

4)、完好性也是广域差分增强系统的一个重要的性能指标，是指系统能在发生故障或者误差超越限值时能够及时给出警告的能力，这对很多应用，尤其是飞机精密近进导航至关重要。本程序仅在滤波初值计算过程中对其进行了简单讨论，提供了基本的完好性算法，更完善的处理策略还需进一步研究。

致谢

到此处论文即将结束，回忆起度过的两年多研究生阶段学习生活，我特别感谢伍吉仓教授和陈俊平研究员两位老师对我的帮助，他们对我的论文选题，问题研究，程序编写以及最后的论文撰写都给予了极大的关心和充分的指导。伍老师从我刚入学开始就经常在学习上耐心与我沟通，对我将要开始的学习生活提出了很多建议，让我少走了很多弯路。最初伍老师让我研究平差软件，每每遇到困难都会得到他的解惑，在这个过程中，我的编程能力得到了很大提高。恩师平和谦逊、严谨踏实的学习工作态度必将使我终生受益。上海天文台的陈俊平研究员对我论文中的一些关键问题提供了很多宝贵的意见，在跟他的讨论中我的学术水平不知不觉得到了提高，陈老师在学术上体现的充沛精力和坚韧耐心给我留下了深刻印象，展现了一个年轻学者的优秀品质，一定会对我今后的学习工作产生长久的积极影响。

与此同时也感谢学院的其他老师，如教授平差课程的王穗辉老师、教授精密定轨定位的王解先老师以及教授现代大地测量数据处理的沈云中和李博峰老师等等，他们的课程不仅丰富了我的理论知识，也提高了我的学术研究水平。

感谢两年多来在一起学习过的师兄师姐师弟师妹们，包括段兵兵、张益泽、王明华、徐克科、郑二龙、李茂、吴伟伟、张泽峰、陈猛、王君刚师兄，张丽娜、郭林英、赵婧文师姐，同届的卢娟、胡凤鸣、杨飞、胡一帆以及王岩、张丽、朱聪聪、严宇、王阿昊、丁阳、李乃一等师弟师妹们。感谢你们的陪伴，在生活上的照顾以及学习上的帮助，这一切让我的研究生生涯变得快乐而充实。

感谢上海天文台的杨赛男、章洁君师姐以及陈倩同学，感谢你们这一年多来对我的帮助和支持。也感谢在天文台学习期间结识的王彬博士和河海大学的房成贺同学，与你们一起在北京度过的几个月艰苦而充实，感谢你们的陪伴。

最后要感谢我的父母和姐姐，虽然上海到南京距离很短，但我仍然很少有时间回家陪伴你们，你们的默默支持让我感到安慰，是我人生路上最坚强的动力，愿不辜负。

2017年3月

参考文献

- [1] Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E. GNSS - Global Navigation Satellite Systems[M]. Springer, 2008.
- [2] 聂建亮. GPS 精密单点定位算法及故障诊断研究[D]. 长安大学, 2010.
- [3] 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型[M]. 测绘出版社, 1998.
- [4] 李征航. 全球定位系统(GPS)技术新进展——第二讲差分 GPS[J]. 测绘地理信息, 1996(1):41-48.
- [5] 黄丁发. 卫星导航定位原理[M]. 武汉大学出版社, 2015.
- [6] 高为广, 楼益栋, 刘杨, 等. 卫星导航系统差分增强技术发展研究[J]. 测绘科学, 2013,38(1):51-53.
- [7] Wide Area Augmentation System (WAAS) [EB/OL]. <http://www.gps.gov/systems/augmentations/>.
- [8] 宋炜琳, 谭述森. WAAS 技术现状与发展[J]. 无线电工程, 2007,37(6):50-52.
- [9] 周儒欣, 王宇飞. GPS 广域增强系统的研究与实现[J]. 全球定位系统, 2000(4):25-28.
- [10] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010,39(1):1-6.
- [11] 杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估[J]. 中国科学:地球科学, 2014(1):72-81.
- [12] 魏子卿. 2000 中国大地坐标系及其与 WGS84 的比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2008,28(5):1-5.
- [13] 杨鑫春, 徐必礼, 胡杨. 北斗卫星导航系统的星座性能分析 [J]. 测绘科学, 2013,38(2):68-72.
- [14] 刘经南, 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位技术探讨[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2002,27(3):234-240.
- [15] 张小红, 李星星, 郭斐, 等. GPS 单频精密单点定位软件实现与精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008,33(8):783-787.
- [16] 李辉, 李建文, 朱建华, 等. 星历精度对动态 GPS 精密单点定位的精度影响分析[J]. 测绘科学, 2012,37(3):186-187.
- [17] 李征航, 张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉大学出版社, 2009.
- [18] 楼益栋, 刘万科, 张小红. GPS 卫星星历的精度分析[J]. 测绘地理信息, 2003,28(6):4-6.
- [19] 曾琪, 吴多, 刘万科. 基于长期数据的北斗广播星历精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2016,36(11):958-962.
- [20] Kaplan E D, Hegarty C. Understanding GPS : principles and applications[M]. Artech House, 2005.
- [21] 张小红, 李盼, 李星星, 等. 天线相位中心改正模型对 PPP 参数估计的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011,36(12):1470-1473.
- [22] 王刚, 魏子卿. 格网电离层延迟模型的建立方法与试算结果[J]. 测绘通报, 2000(9):1-2.
- [23] 曲伟菁, 朱文耀, 宋淑丽, 等. 三种对流层延迟改正模型精度评估[J]. 天文学报, 2008,49(1):113-122.
- [24] 徐杰, 孟黎, 任超, 等. 对流层延迟改正中投影函数的研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2008,28(5):120-124.

- [25] Niell A E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1996,101(B2):3227-3246.
- [26] Weiss M, Ashby N. GLOBAL POSITIONING SYSTEM RECEIVERS AND RELATIVITY[J]. 1990.
- [27] 胡洪. GNSS 精密单点定位算法研究与实现[D]. 中国矿业大学, 2014.
- [28] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1997,102(B3):5005-5017.
- [29] 马德强. GNSS 接收机天线相位中心误差改正方法研究[D]. 长安大学, 2014.
- [30] 曹月玲, 胡小工, 周善石, 等. 基于星间链路的 BDS 导航系统实时星历和钟差分离修正[J]. *天文学进展*, 2015(1):122-133.
- [31] 王维, 王解先, 高俊强. GPS 周跳探测的方法研究[J]. *武汉大学学报信息科学版*, 2010,35(6):687-690.
- [32] 龙嘉露. GNSS 实时动态周跳探测与修复方法研究[D]. 西南交通大学, 2014.
- [33] 易重海. 实时精密单点定位理论与应用研究[D]. 中南大学, 2011.
- [34] 贾沛璋, 吴连大. 单频 GPS 周跳检测与估计算法[J]. *天文学报*, 2001,42(2):192-197.
- [35] 汪平, 郝金明, 沈国康, 等. 单频精密单点定位中周跳的处理方法[J]. *测绘科学技术学报*, 2009,26(5):337-339.
- [36] 李明, 高星伟, 徐爱功. 一种改进的周跳多项式拟合方法[J]. *测绘科学*, 2008,33(4):82-83.
- [37] 高书亮, 黄智刚, 李锐. 适用于单频 GPS 用户的周跳探测方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011,37(8):1021-1025.
- [38] 徐园. GPS 实时精密单点定位相关技术研究[D]. 中国人民解放军信息工程大学 解放军信息工程大学, 2012.
- [39] 王爱兵. 广域差分 GPS 用户端算法研究[D]. 解放军信息工程大学, 2007.
- [40] Hall A. *The Method of Least Squares*[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [41] 刘大杰, 于正林. 动态测量系统与卡尔曼滤波[J]. *测绘学报*, 1988(4):16-24.
- [42] 祁芳. 卡尔曼滤波算法在 GPS 非差相位精密单点定位中的应用研究[D]. 武汉大学, 2003.
- [43] Storm V L S, Marel H V D, Tossaint M M M, et al. Validation of SBAS MOPS Troposphere Model over the EGNOS Service Area[J]. 2004.
- [44] Young R S Y, Mcgraw G A. Fault Detection and Exclusion Using Normalized Solution Separation and Residual Monitoring Methods[J]. *Navigation*, 2003,50(3):151-169.
- [45] 张书毕. 测量平差[M]. 中国矿业大学出版社, 2013.
- [46] Hewitson S, Wang J. GNSS receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) performance analysis[J]. *GPS Solutions*, 2006,10(3):155-170.
- [47] 王解先. GPS 精密定轨定位[M]. 同济大学出版社, 1997.
- [48] 王解先, 季善标. GPS 伪距动态定位计算模型[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 1999(5):530-535.
- [49] 韦克. 单频 GPS 精密单点定位研究[D]. 长安大学, 2010.
- [50] 张小红. 动态精度单点定位(PPP)的精度分析[J]. *全球定位系统*, 2006,31(1):7-11.

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

王恒, 男, 1989 年 6 月生。

2012 年 7 月毕业于南京工业大学 测绘工程专业 获学士学位。

2014 年 9 月入同济大学读硕士研究生。

待发表论文:

[1] 王恒, 伍吉仓, 吴伟伟. 参考框架选取对连续 GPS 网测站坐标时间序列分析结果的影响. 大地测量与地球动力学 (已接收)

[2] 王恒, 陈俊平, 张益泽. 北斗亚米级单频单点定位系统实现. 第八届卫星导航学术年会 (已接收)

参与的项目:

[1] 973 计划项目课题: 对地观测、形变与地震波数据联合反演活动断层参数 (2013CB733304) .

[2] 国家自然科学基金项目: 基于实时电离层估计的单频单站实时精密定位理论与方法研究 (41174024) .

[3] 国家自然科学基金项目: 区域 GNSS 地壳形变检测网测站坐标时间序列精化研究 (41674003) .