



沈阳航空航天大学

硕士学位论文

论文题目 基于安卓 GNSS 原始观测数据的高精度定位理论与方法研究

研究 生 王 璇

专 业 信息与通信工程

研究 方 向 卫星导航定位技术

指 导 教 师 雷 虹 研究员

二零二四年六月

基于安卓 GNSS 原始观测数据的高精度定位理论与方法研究

沈阳航空航天大学

分类号_____

密级_____公开_____

U D C _____

学 位 论 文

基于安卓 GNSS 原始观测数据的高精度定位 理论与方法研究

研 究 生 姓 名 : 王 琦

学 科 专 业 名 称 : 信 息 与 通 信 工 程

研 究 方 向 : 卫 星 导 航 定 位 技 术

论 文 类 型 : 基 础 研 究

申 请 学 位 : 工 学 硕 士

指 导 教 师 姓 名 : 雷 虹

指 导 教 师 职 称 : 研 究 员

指 导 教 师 单 位 : 沈 阳 飞 机 设 计 研 究 所

论 文 提 交 期 间 : 2024 年 05 月 30 日

论 文 答 辩 期 间 : 2024 年 06 月 08 日

沈 阳 航 空 航 天 大 学

2024 年 06 月

SHENYANG AEROSPACE UNIVERSITY

THESIS FOR MASTER'S DEGREE

**RESEARCH ON HIGH-PRECISION
POSITIONING THEORY AND METHODS
BASED ON ANDROID GNSS RAW
OBSERVATION DATA**

Candidate: Heng Wang

Supervisor: Hong Lei

Specialty: Information and Communication
Engineering

Date: June, 2024

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的指导下独立完成的。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果，也不包含本人为获得其他学位而使用过的成果。对本文研究做出重要贡献的个人或集体均已在论文中进行了说明并表示谢意。本声明的法律后果由本人承担。

论文作者签名：

年 月 日

摘要

近年来，人们使用智能手机定位的需求不断增加，尤其在出行导航、位置共享等领域表现尤为显著。然而，智能手机中的应用定位精度只能达到米级，远远不能满足高精度定位的要求。因此本文针对安卓智能手机定位中存在的观测数据质量不足、定位精度低等问题展开研究。本文具体的工作和成果如下：

(1)针对智能手机 GNSS 原始观测数据质量的在实际环境中分析不足，首先研究如何获取智能手机伪距观测值，然后以智能手机小米 8 为例，设计静态开阔，静态遮挡、动态开阔和动态遮挡四组实验，并对其进行数据质量分析。实验结果表明：智能手机卫星可见数比天宝 R9 接收机少；在遮挡环境下，智能手机容易出现周跳现象；智能手机不同卫星系统伪距观测值噪声存在较大差异，而相位噪声的差异较小。

(2)针对智能手机 GNSS 观测数据伪距观测噪声大，分析智能手机 GNSS 数据质量，设计实现移动开窗平滑伪距算法。实验结果表明：智能手机小米 8 平滑后 N、E、U 定位精度提高了 26.3%、25%、29.7%；智能手机华为 P40 平滑后 N、E、U 定位精度提高了 14.7%、31.4%、31.5%。

(3)针对智能手机卫星的双频数据不全，且双频的无电离层组合的观测噪声远比电离层延迟大，研究智能手机单频定位时的电离层模型，使用智能手机小米 8 和华为 P40 设计两次实验，分析使用不同电离层模型时智能手机伪距单点定位精度。实验结果表明：智能手机小米 8 和华为 P40 均在使用 BDGIM 模型时的定位精度最高。

(4)针对智能手机 RTK 定位时的随机模型未考虑基准站载噪比，提出了基站载噪比联合卫星系统综合定权随机模型方法，并以智能手机小米 8 设计四组实验，分析使用此随机模型时的智能手机 RTK 定位精度。实验结果表明：相较于传统载噪比模型，该随机模型在静态开阔、静态遮挡、动态开阔和动态遮挡环境下的三维方向上的 RTK 定位精度整体提升了 18.7%、18.3%、3.3% 和 4.6%。

关键词：智能手机；电离层模型；RTK 定位；随机模型；定位性能

Abstract

In recent years, the demand for smartphone positioning has been steadily increasing, especially in areas such as mobility navigation and location sharing. However, the positioning accuracy of smartphone applications is only at the meter level, far from meeting the requirements of high-precision positioning. Therefore, this thesis focuses on addressing the issues of insufficient observation data quality and low positioning accuracy in Android smartphone positioning. The specific work and achievements of this thesis are as follows:

(1) Concerning the inadequate analysis of the quality of raw GNSS observation data from smartphones in actual environments, the thesis first investigates how to obtain pseudorange observations from smartphones. Taking Xiaomi 8 smartphone as an example, four sets of experiments were designed, including static open, static obstructed, dynamic open, and dynamic obstructed scenarios, followed by an analysis of their data quality. The results indicate that the number of visible satellites for smartphones is fewer than that for the Trimble R9 receiver. In obstructed environments, smartphones are prone to cycle slips. Additionally, there is significant variation in pseudorange observation noise among different satellite systems, while the phase noise shows less variation.

(2) Aiming at the smartphone GNSS observation data pseudo-range observation noise, analyze the quality of smartphone GNSS data, design and implement the mobile open window smoothing pseudorange algorithm. Experimental results show that after smoothing, the positioning accuracy of Xiaomi 8 smartphones in N, E, and U directions increased by 26.3%, 25%, and 29.7%, respectively. Similarly, the positioning accuracy of Huawei P40 smartphones increased by 14.7%, 31.4%, and 31.5% in the N, E, and U directions, respectively.

(3) Aiming at the incomplete dual-frequency data of smartphone satellites and the observation noise of the ionosphere-free combination of dual-frequency is much larger than the ionospheric delay, we study the ionospheric model of smartphone single-frequency localization, and design two experiments using the smartphone Xiaomi 8 and Huawei P40 to analyze the accuracy of the smartphone pseudorange single-point localization when using different ionospheric models. The experimental results show that the smartphone Xiaomi 8 and Huawei P40 both have the highest positioning accuracy when using the BDGIM model.

(4) Addressing the issue of the random model for RTK positioning of smartphones not

considering the signal-to-noise ratio of reference stations, the thesis proposes a method for joint weighting of reference station signal-to-noise ratio and satellite system for comprehensive RTK positioning. Using Xiaomi 8 smartphones, four sets of experiments were designed to analyze the RTK positioning accuracy when using this random model. Experimental results show that compared to traditional signal-to-noise ratio models, the proposed random model improved the three-dimensional direction RTK positioning accuracy by 18.7%, 18.3%, 3.3%, and 4.6% in static open, static obstructed, dynamic open, and dynamic obstructed environments, respectively.

Keywords: Smartphone; Ionospheric Model; RTK Positioning; Random Model; Positioning Performance

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外相关研究进展	2
1.2.1 安卓智能手机数据质量评估研究现状	3
1.2.2 安卓智能手机定位技术研究现状	4
1.3 本文主要研究思路	5
第 2 章 安卓智能手机定位基础理论	7
2.1 GNSS 主要误差源	7
2.1.1 与卫星有关误差	8
2.1.2 与传播路径有关误差	11
2.1.3 与接收机有关误差	13
2.2 参数估计理论	15
2.2.1 最小二乘估计	15
2.2.2 序贯最小二乘估计	16
2.2.3 卡尔曼滤波算法	17
2.3 本章小结	18
第 3 章 安卓智能手机 GNSS 原始数据获取与质量分析方法	19
3.1 概述	19
3.2 智能手机 GNSS 观测值获取	19
3.2.1 智能手机 GNSS 模块 API 介绍	19
3.2.2 伪距观测值的计算	20
3.3 智能手机原始观测数据采集	21
3.4 智能手机原始观测数据分析	23

3.4.1 卫星可见数	23
3.4.2 卫星周跳情况	25
3.4.3 伪距/相位观测噪声分析	26
3.5 本章小结	29
第 4 章 不同电离层模型的智能手机 SPP 定位分析	30
4.1 概述	30
4.2 安卓智能手机 GNSS 伪距单点定位数学模型	30
4.3 安卓智能手机数据质量控制	32
4.3.1 伪距粗差剔除	32
4.3.2 移动开窗载波平滑伪距	33
4.3.3 电离层延迟对移动开窗载波平滑伪距的影响	34
4.4 不同电离层模型对安卓智能手机伪距单点定位精度影响分析	36
4.4.1 GPS Klobuchar 电离层模型	36
4.4.2 BDS Klobuchar 电离层模型	38
4.4.3 BDGIM 电离层模型	40
4.4.4 广播电离层模型精度分析	42
4.5 本章小结	46
第 5 章 基站载噪比联合卫星系统综合定权的智能手机 RTK 定位...	47
5.1 概述	47
5.2 安卓智能手机 GNSS 单频 RTK 数学模型	47
5.3 随机模型	48
5.3.1 高度角随机模型	49
5.3.2 载噪比随机模型	49
5.3.3 载噪比联合卫星系统间随机模型	50
5.4 提出的基站载噪比联合卫星系统间综合定权随机模型	50
5.5 实验及定位结果分析	50
5.6 本章小结	54

结 论	55
参 考 文 献	57
致 谢	60
攻读硕士期间发表(含录用)的学术论文	61

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

自 1978 年美国发射第一颗 GPS 卫星以来，全球卫星导航系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）经历了蓬勃的发展。随着 2020 年 7 月 31 日北斗全球卫星导航系统全面建成，北斗全球定位系统（BeiDou Navigation Satellite System, BDS）与美国 GPS 系统、欧洲伽利略系统（Galileo satellite navigation system, Galileo）、俄罗斯格洛纳斯系统（GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM, GLONASS）组成了四大全球卫星导航系统，使全球卫星导航系统在定位、导航和授时服务方面取得了快速的进步^[1-5]。全球卫星导航系统已广泛应用于出行导航、快递物流、智能驾驶和共享位置等领域，成为人们日常生活中不可或缺的一部分^[6]。人们对精准位置信息的依赖不断增加，卫星导航系统的不断发展和进步则为提供准确可靠的定位与导航服务奠定了坚实基础。

安卓系统目前在智能手机市场占据了约 80% 的市场份额，远超其他操作系统^[7]。其应用范围也已扩展至智能电视、智能手环、智能手表以及智能家居等领域。与此同时，随着卫星导航系统的不断发展和进步，在轨卫星数量的不断增加，进而增加了智能手机观测的卫星数量。然而，在日常使用中，安卓智能手机的定位精度通常约为 10 米左右。在城市复杂环境中，多路径效应更为严重，可能导致信号中断或无法定位等问题^[8]。谷歌在 2016 年开放了安卓 GNSS 原始数据接口，智能手机可以直接获取伪距、相位和多普勒等 GNSS 原始观测数据，不再受限于只能获取芯片输出的位置、速度和方向等定位结果^[9]。这一技术为研究人员提供了新的机遇和可能性，他们可以通过应用程序编程接口（Application Programming Interface, API）直接获取 GNSS 原始观测数据，从而实现高精度定位的研发。2018 年，小米发布了第一部搭载双频 GNSS 芯片的智能手机小米 8，此后，越来越多的手机厂商推出双频或三频的手机^[10]。双频的 GNSS 信号为智能手机提供了更多信息以进行定位，但多数智能手机观测文件缺失 L5/E5 频点的观测信息。

目前，GNSS 定位技术主要涵盖单点定位和差分定位^[11]。其中，伪距单点定位（Single Point Positioning, SPP）因其简单易用且成本低的特点而备受青睐，通过使用单个接收机接收卫星信号，用户可以在没有额外基础设施支持的情况下进行定位。这种方法不需要复杂的数据处理，适用于许多应用场景，如导航、地图服务和移动定位等。但对于搭

载低成本芯片的智能手机而言，其定位精度通常在 5-10 米左右。这一限制主要源自于这些智能手机所搭载的 GNSS 芯片性能较弱，其接收能力有限，容易受到周围环境中的信号干扰和多路径效应的影响。信号干扰和多路径效应会导致接收到的卫星信号变得不稳定，进而影响定位精度。因此，要提升智能手机伪距单点定位的精度，就需要采取相应的优化措施，来解决这些因素带来的影响^[12]。

在 GNSS 定位领域中主要的高精度定位技术有动态差分定位(Real-Time Kinematic, RTK)，已经在各个领域得到了广泛应用。然而，智能手机在接收 GNSS 信号时会受到硬件本身和外部环境的干扰，导致其 GNSS 观测数据质量常常低于专用测量型接收机。因此，传统的 RTK 定位算法在智能手机上往往无法获得理想的定位结果。为了克服这一问题，有必要从智能手机 GNSS 数据本身的特点和局限性入手，开发适用于智能手机的新型 RTK 定位算法，以提高其定位精度和可靠性。针对智能手机特有的数据质量问题进行优化和改进，可以有效提高其在各种应用场景下的定位性能。

在这一背景下，本文以小米 8 和华为 P40 为例，将深入研究安卓智能手机在 SPP 和 RTK 两方面的性能表现。通过对这两种定位技术在智能手机上的应用进行全面分析，将充分评估智能手机的数据质量和定位准确性。鉴于智能手机在不同环境下的使用场景多样，将特别关注其在各种环境条件下的表现，并提出相应的优化策略。

1.2 国内外相关研究进展

近年来，随着科技的迅猛发展，低成本接收机的全球导航卫星系统定位备受关注，尤其是智能手机终端的 GNSS 定位。智能手机的普及使得普通用户也能轻松获取定位服务，这种便捷性和实用性极大地推动了智能手机定位技术的发展。通过智能手机的 GNSS 定位功能，用户可以随时随地准确获取自身位置信息，实现导航、位置共享、地图应用等多种功能，极大地改善了人们的生活和工作体验。这一趋势引起了许多国内外学者的广泛关注和深入研究。他们致力于评估智能手机的数据质量和定位性能，探索其在定位技术领域的潜力和应用前景。通过对智能手机定位的研究，人们可以更好地了解其定位精度、可靠性以及适用场景，为智能手机定位技术的进一步发展提供有力支持。这些研究成果不仅可以指导智能手机定位算法和技术的改进，还有助于推动智能手机在导航、定位和位置服务等领域的应用和发展。下面将介绍智能手机 GNSS 原始数据质量和智能手机 GNSS 定位两个方面的国内外研究。

1.2.1 安卓智能手机数据质量评估研究现状

由于安卓系统的应用程序编程接口功能允许用户轻松访问智能手机 GNSS 原始观测数据，许多学者投入到智能手机定位研究中。智能手机的 GNSS 模块与传统的专业接收机存在明显的差异，这种差异性包括硬件设计、信号处理和定位算法等方面。智能手机通常采用集成式的 GNSS 芯片，其设计更注重功耗、尺寸和成本等因素，而非专业接收机所追求的高精度和稳定性。由于智能手机的 GNSS 模块受到手机设计的限制，其接收能力、数据处理能力以及定位算法的性能可能不及专业接收机。因此，对智能手机的 GNSS 数据质量进行研究具有重要意义。

早期，Linty 等人发现了智能手机存在“占空比”工作模式，即 GNSS 芯片不连续工作，使智能手机采集的原始相位数据不连续，最终影响智能手机的定位精度^[13]。Paziewski 对华为 P20 和传统的测量型接收机进行实验，发现由于占空比的原因导致其相位观测值误差逐渐增加，使伪距观测值和相位观测值的钟差不同^[14]。为了减少智能手机多路径效应的影响，Gogoi 等人评估了智能手机在受控环境中的定位精度，并研究了“占空比”工作模式。结果表明：在暗室中智能手机 GNSS 数据质量好于实际环境；当有占空比时，伪距和相位噪声变大^[15]。幸运的是，大多数最新的智能手机都提供了手动关闭该设置的选项。

自小米公司推出第一款双频 GNSS 智能手机小米 8 以来，吸引了大量研究者的关注和研究。赵硕从小米 8 的 GNSS 观测数据中的载噪比、多路径等方面去验证占空比机制，结果表明：即使关闭占空比，依然发生严重周跳^[16]。Guo 等人使用智能手机小米 8 进行了开阔和遮挡环境下的静态和动态实验，并对其伪距噪声、载噪比和周跳等方面进行分析。结果表明：双频的无电离层组合的观测噪声远比电离层延迟大，载噪比与伪距噪声相关^[17]。Robustelli 等人对智能手机小米 8 和接收机性能进行对比分析，结果显示：智能手机小米 8 存在严重的多路径效应且载噪比较低，这使得传统的模型和算法很难实现智能手机的高精度定位^[18]。在此基础上，刘万科通过谷歌 Nexus9 实验，使用改进的载噪比随机模型进行定位，结果表明：安卓智能手机使用载噪比定权可以提高其定位精度^[19]。

通过分析智能手机的观测值噪声，研究适合智能手机定位的随机模型。

Lachapelle 分析智能手机华为 P10 的伪距噪声, 得出结论其噪声达到了 2.2 米, 远超过了传统测量型接收机的水平^[20]。零基线双差常用于计算接收机的伪距观测噪声, 对于智能手机一般只能采用超短基线, 主要是因为智能手机的天线在手机的内部。Paziewski 使用超短基线的方法分析华为 P20 的伪距噪声, 结果表明, 华为 P20 的伪距和相位观测值噪声远比测量型接收机大^[21]。

智能手机 GNSS 原始观测数据已被国内外学者进行大量分析, 但在复杂环境下的数据分析较为匮乏。本文将从这方面入手, 对智能手机小米 8 在不同环境及不同卫星系统下的观测值进行分析。实验具体包括静态开阔、静态遮挡、动态开阔和动态遮挡四种情况下的卫星跟踪情况、周跳、伪距噪声以及超短基线双差等方面的质量分析。

1.2.2 安卓智能手机定位技术研究现状

谷歌在 2016 年开放了安卓 GNSS 原始数据接口, 促进了基于智能手机 GNSS 原始观测数据的定位技术快速发展。对种类繁多的智能手机, 在复杂动态环境中实现高精度定位依然是挑战。确保提供可靠稳定的位置服务是研究人员共同努力的目标。通过不断提高定位算法的精度和鲁棒性, 优化接收设备的性能, 以及改善环境干扰的处理方法, 可以实现更准确、更可靠的定位结果, 满足用户在各种应用场景中的需求, 促进定位技术的进步和应用。

在智能手机数据质量控制方面, Cutugno 等人通过研究智能手机定位性能, 验证了占空比工作模式影响智能手机定位精度的结论。结果表明, 智能手机关闭“占空比”工作模式能使平面定位精度能提升 3-4 米^[22]。另一方面, Liu 等人观察到智能手机的伪距和相位观测值存在不一致的情况, 因此提出了利用相位平滑伪距的方法, 运用到智能手机单点定位和差分定位中, 以降低伪距观测值噪声, 提高智能手机定位精度^[23-24]。栗广才及其团队提出了适用于智能手机的随机模型补偿方法, 以解决多路径误差问题, 并在不同运动状态下实现模糊度固定^[25]。另外, 王怡欣等人研究出多普勒速度约束的单频历元间差分法, 该方法同时利用智能手机的周跳检测和修复方法。实验结果表明, 该方法的成功率超过了 92%^[26]。

在智能手机 GNSS 定位领域, 葛于祥、肖青怀等研究者发现, 在伪距单点模式下, 载噪比模型优于高度角模型, 整体提高了约 10% 的三维定位精度^[27-28]。舒宝在葛于祥提

出的载噪比模型基础上,进一步考虑了智能手机 P30 的观测噪声,提出了载噪比联合卫星系统综合定权随机模型,相较于传统模型,精度有了明显提升^[29]。在精密单点定位方面,载噪比随机模型的表现也优于高度角模型^[30]。冷宏宇等人进行了智能手机小米 8 的单基线 RTK 定位实验,结果显示在良好的观测条件下,小米 8 在 RTK 定位模式下可达分米级水平的精度,平面方向精度可达 20 厘米以内,高程方向精度可达 50 厘米以内^[31]。袁良雄等人的研究显示,在 RTK 定位模式下,载噪比模型相较于高度角模型有显著的精度提升^[32]。王式太等人研究指出,静态时,智能手机定位误差能达到分米级,但在动态时达不到,有的历元误差十几米,然而,在使用卡尔曼滤波后,静态和动态定位精度逐渐接近^[33]。高成发等人把智能手机和接收机固定一起进行实验,当智能手机稳定后,输出其定位误差,结果表明,智能手机 RTK 水平精度 0.73m,高程精度 0.78m,表明智能手机具备传统测绘的能力^[34]。Dabove 和 Wanninger 等人对智能手机进行 RTK 定位实验,结果表明,智能手机 RTK 定位精度可以达到分米级^[35]。徐彦田等人也对智能手机小米 8 进行静态 RTK 定位实验,实验结果显示,小米 8 手机 RTK 定位时仅使用 GPS 系统时的定位精度高于仅使用 BDS 系统^[36],并且水平和高程方向的定位精度均达到分米级水平。

尽管智能手机的高精度定位已经受到国内外学者广泛研究,但多数研究并不是智能手机实际使用场景。因此,本文对不同环境下的智能手机 GNSS 原始观测数据进行数据质量评估,并对其伪距粗差进行剔除,设计实现使用相位平滑伪距方法。然后针对智能手机小米 8 和华为 P40 单频的伪距观测值进行电离层改正,以提升伪距单点定位精度。最后,利用智能手机小米 8 在开阔和遮挡环境下进行静态和动态 RTK 定位实验,分析其在实际环境中使用不同随机模型的 RTK 定位性能。

1.3 本文主要研究思路

从论文的目的出发,本文总共分为五章,各章主要内容安排如下:

第一章,绪论。介绍了基于智能手机 GNSS 原始观测数据的高精度定位的背景与意义,详细总结国内外学者对智能手机的研究,主要包括两方面,一是安卓智能手机数据质量;二是安卓智能手机定位技术。总结国内外学者对智能手机“占空比”工作模式以及载噪比、多路径、伪距和相位观测值等方面数据质量评估。总结国内外学者研究安卓智能手机定位算法和数据质量控制方法。

第二章，安卓智能手机 GNSS 定位基础理论。研究智能手机 GNSS 定位中的主要误差源，包括与卫星和接收机相关误差以及传播路径相关误差，并且给出对应误差源的校正方法。最后详细介绍智能手机定位中常用的参数估计理论，包括最小二乘和卡尔曼滤波。

第三章，安卓智能手机 GNSS 数据获取及质量分析方法。详细介绍如何获取智能手机 GNSS 原始观测值的方法，描述在静态开阔、静态遮挡、动态开阔和动态遮挡情况下对智能手机小米 8 的观测数据采集，然后对采集的数据进行数据分析。主要分析内容有智能手机小米 8 卫星可见数、周跳情况以及伪距和相位观测值噪声。

第四章，不同电离层模型的智能手机 SPP 定位分析。首先分析智能手机 GPS/BDS 双系统下的伪距单点定位算法原理。由于智能手机 GNSS 原始观测数据质量较差，设计实现相位平滑伪距方法，分析智能手机载波相位平滑伪距的单点定位性能。最后针对单频伪距单点定位误差大的问题，使用不同的电离层模型对智能手机小米 8 和华为 P40 的电离层误差进行改正，分析不同电离层模型对智能手机伪距单点定位影响。

第五章，基站载噪比联合卫星系统综合定权的智能手机 RTK 定位。首先介绍了智能手机 GNSS 单频 RTK 定位数学模型，然后介绍了常用的随机模型，并在已有模型的基础上提出了基站载噪比联合卫星系统间综合定权随机模型，最后对提出的随机模型与常用的随机模型对智能手机在不同环境下 RTK 定位精度进行了对比分析。

第2章 安卓智能手机定位基础理论

2.1 GNSS 主要误差源

卫星信号发射、传播和接收机接收的过程中，无法避免会受到各种因素的影响，从误差源的性质可以分为随机误差和系统误差，系统误差可以通过一定的方法进行削弱，但随机误差相比于系统误差对定位结果的影响较小，其特性一般无法通过一定的方法去削弱或者消除，一般需要通过参数估计的方式进行计算^[37]。当使用安卓智能手机 GNSS 原始观测数据进行高精度定位时，要充分考虑各误差源对智能手机定位的影响。误差源一般分为三类，一类是与卫星端的相关的误差，主要包括卫星钟差、卫星轨道误差以及卫星的系统误差，这些误差可能会导致卫星位置计算的偏差，进而影响智能手机的定位精度。一类是与信号传播相关的，主要涉及电离层和对流层等误差源，电离层和对流层会对定位结果产生米级影响，在进行定位时必须进行校正。还有一类是与接收机相关的，特别是智能手机的天线相位中心，在进行定位处理时必须标定好智能手机的天线相位中心。因此需要综合考虑这些误差源，采取相应措施来优化定位精度。具体误差如下图所示：

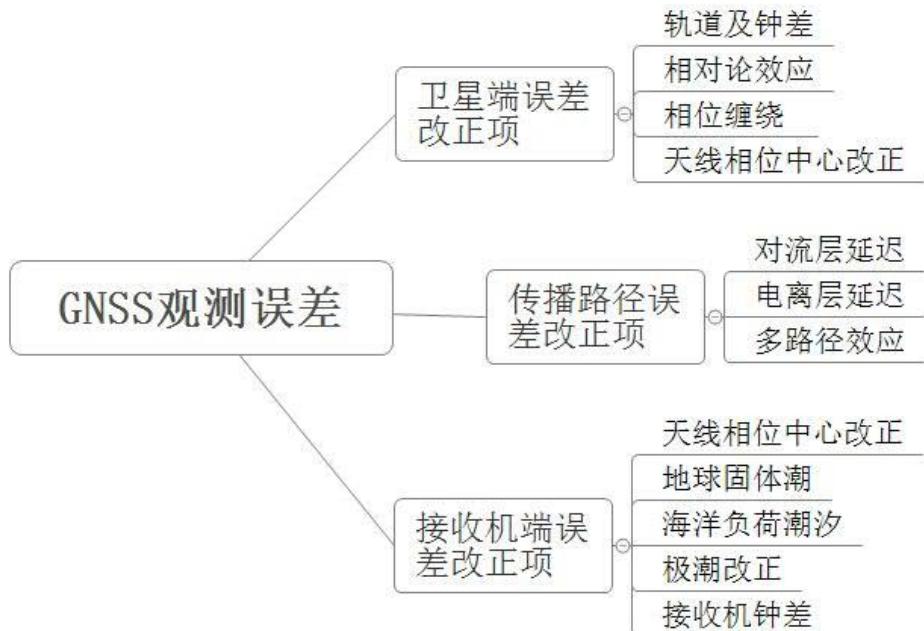


图 2.1 误差源示意图

2.1.1 与卫星有关误差

(1) 轨道和钟差改正

智能手机用户在使用卫星定位时，通常会利用卫星播发的星历参数来计算卫星的位置和速度。星历参数包括卫星在天空中的位置、速度以及轨道参数等信息，这些参数是由地面控制站收集、处理后通过卫星导航系统广播到用户接收设备上的。然而，尽管星历参数经过精密的计算和校正，但由于多种因素的影响，导致卫星的位置与真实情况还存在偏差，这种误差被称为星历误差。

卫星定轨的精度影响星历误差大小。卫星的定轨精度受到多种因素的影响，包括地球引力场的不均匀性、大气阻力、地球自转等。这些因素会导致卫星在轨道上产生微小的偏差，进而影响到星历参数的精度。特别是在高轨道卫星和地面接收设备之间存在大量大气层等干扰时，星历误差可能会更加显著。

为了减小星历误差对定位精度的影响，研究人员不断致力于提高卫星定轨精度和星历参数的计算精度。目前，卫星导航系统在设计和运行过程中已经采取了多种措施来降低星历误差，如增加地面测量站密度、改进星历计算算法、引入辅助导航卫星等。同时，用户设备也在不断提升自身的定位算法和处理能力，以尽可能减小星历误差对定位结果的影响。

在安卓智能手机 GNSS 伪距单点定位和动态差分定位中，可以通过广播星历或者精密星历计算卫星的位置信息。当使用广播星历时，可以通过卫星播发的轨道参数计算卫星位置，计算方法参照接口控制文件（Interface control document, ICD），各系统计算卫星位置大致相同^[38]。

一般对广播星历播发的钟差参数进行多项式预报：

$$\delta = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \quad (2.1)$$

式中， a_0 、 a_1 、 a_2 为卫星播发的钟差参数， t 、 t_0 分别为卫星信号发射时刻和星历钟差参考时刻。

在差分定位时，可以通过站间单差消掉卫星钟差，精密定位时对定位精度要求较高，广播星历往往不能满足要求，所以需要使用国际地球动力学服务机构提供的精密产品，用户可以通过内插计算任意时刻的卫星钟差。

(2) 天线相位中心改正

卫星和接收机之间的几何距离是通过卫星天线相位中心得到的，不是通过卫星质心得到的。广播星历提供的卫星坐标是信号发射天线相位中心（Antenna Phase center, APC），而精密轨道是卫星质心（MC）。天线相位中心修正（Phase Center Offset, PCO）和变化（Phase Center Variation, PCV）是两种改正^[38]。通常指定的接收机天线的 PCO 是固定值，但 PCV 不是固定的，其距离指的是平均相位中心（MPC）到天线瞬时中心（Instantaneous Phase Center, IPC），误差通常较小，主要与卫星的方位角和高度角密切相关^[38]。具体计算方法如下：

$$MPC = MC + PCO \quad (2.2)$$

将卫星的平均天线相位中心归算至实际接收信号的相位中心的方法如下：

$$p = \rho + P \quad (2.3)$$

上式中， P 表示是 PCV 改正； ρ 为接收机与卫星间的几何距离。

天线相位中心改正如图所示：

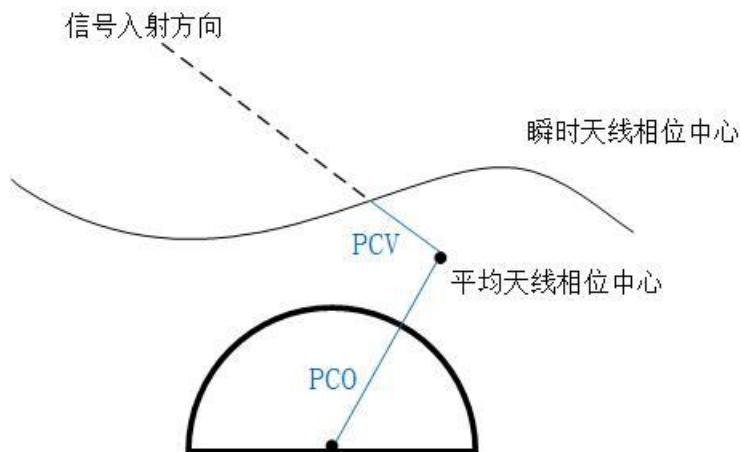


图 2.2 天线相位中心改正

在智能手机 GNSS 定位中，卫星天线相位中心的准确性直接影响智能手机的定位精度。

（3）相位缠绕效应

天线相位缠绕是由于天线或接收机的旋转引起的现象。这种现象涉及卫星和接收机之间的相位差变化，尤其是在卫星的快速运动情况下，天线相位缠绕现象更加显著。即使接收机处于静止状态，由于卫星的运动，天线也会缓慢地发生移动，导致相位缠绕的产生。因此，天线相位缠绕在 GNSS 定位过程中是一个不可忽视的因素，需要进行适当

的校正和处理，以确保定位精度的准确性和稳定性。在定位过程中，接收机天线相位缠绕可以通过钟差项来消除，相位缠绕效应可采用以下模型改正^[39]：

$$\Delta\phi = \text{int}[\Delta\phi_{pre} - \delta\varphi] + \delta\varphi \quad (2.4)$$

$$\delta\varphi = \text{sign}\left(\mathbf{k} \cdot \left(\vec{\mathbf{D}} \times \vec{\mathbf{D}}'\right)\right) \cdot \arccos\left(\frac{\vec{\mathbf{D}} \times \vec{\mathbf{D}}'}{\|\vec{\mathbf{D}}\| \cdot \|\vec{\mathbf{D}}'\|}\right) \quad (2.5)$$

$$\vec{\mathbf{D}} = \mathbf{x} - \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}) + \mathbf{k} \times \mathbf{y} \quad (2.6)$$

$$\vec{\mathbf{D}}' = \mathbf{x}' - \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}') + \mathbf{k} \times \mathbf{y}' \quad (2.7)$$

式中， \mathbf{k} 为接收机与卫星之间方向向量； \mathbf{x}' 、 \mathbf{y}' 和 \mathbf{x} 、 \mathbf{y} 为星固坐标系和东北天坐标系的单位向量； \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 为地球参考系下的方向向量； $\Delta\phi_{pre}$ 为上个历元相位缠绕改正； $\Delta\phi$ 为当前相位缠绕改正； $\delta\varphi$ 为不足一周部分的相位缠绕改正值； $\text{int}[\bullet]$ 表示取整运算符。

研究智能手机高精度定位必须考虑天线相位缠绕的影响，以提升智能手机定位精度。

(4) 相对论效应

卫星导航信号在高速运动状态下发射时，相对论效应会影响光速，因此对于高精度定位而言，需要考虑相对论效应。此外，信号在传播过程中因为 Shapiro 延迟的影响，当信号穿过强大引力场时会减速，引力场会使时间和空间发生弯曲，导致实际传播距离与几何距离不同。具体公式为：

$$d_{\text{shapiro}} = \frac{2GM}{c^2} \ln\left(\frac{r_{rcv} + r^{\text{sat}} + r_{rcv}^{\text{sat}}}{r_{rcv} + r^{\text{sat}} - r_{rcv}^{\text{sat}}}\right) \quad (2.8)$$

式中， \mathbf{M} 表示地球质量； \mathbf{G} 表示引力系数； r^{sat} 和 r_{rcv} 分别表示卫星和接收机至地核的距离； r_{rcv}^{sat} 表示接收机到卫星几何距离。

相对论效应的常数部分是与卫星轨道的长半轴密切相关，通常可以在出厂前对卫星钟的频率进行改正，周期项部分通常与卫星轨道的偏心率密切相关，无法在卫星钟出厂时进行改正，需要用户在定位时通过模型改正^[38]，改正公式为：

$$\text{Re} = -\frac{2\mathbf{r}^{\text{sat}} \mathbf{v}^{\text{sat}}}{c^2} \quad (2.9)$$

式中， r_{rcv} 和 r^{sat} 表示卫星速度和位置向量； Re 表示钟差相对论改正，通常在精密

星历中应用，使用广播星历通常使用下式：

$$Re = F \cdot e \cdot \sqrt{A} \sin(E_k) \quad (2.10)$$

式中， e 、 A 分别表示卫星轨道偏心率和卫星轨道长半轴； E_k 为卫星轨道偏近地点角，一般来说 $F = -4.442807633 \times 10^{-10}$ 。

卫星轨道的偏心率影响相对论误差大小。当偏心率变化时，该项误差也随之变化。相对论效应影响可能达到米级，因此在智能手机定位中需要对相对论效应进行改正。

2.1.2 与传播路径有关误差

(1) 电离层延迟

电离层距地面高度约为 60~1000km，它是大气层在紫外线和辐射电离形成的。当卫星信号穿过电离层，会引起信号传播方向的变化，产生电离层延迟。信号的频率和电子密度影响电离层延迟的大小。一般来说，卫星高度角低的时候其电离层延迟较大。因此，在智能手机单频伪距单点定位时，需要校正电离层误差。本文在处理智能手机小米 8 和华为 P40 原始观测数据时，使用 GPS K8、BDS K8、BDGIM 电离层模型对电离层延迟进行改正。

如果只考虑低阶电离层影响，伪距电离层延迟一阶项为^[40]：

$$Ip = -\frac{40.28}{f^2} TEC \quad (2.11)$$

相位电离层延迟一阶项为：

$$Ip = \frac{40.28}{f^2} TEC \quad (2.12)$$

其中， f 表示载波信号频率； TEC 表示总电子含量。当利用智能手机单频单点定位时，可以根据实际情况使用不同的电离层模型进行改正，电离层模型一般改正量在 60%~70% 左右。当智能手机能接收到双频的观测数据时，可以通过双频组合消掉电离层，但经研究发现双频的无电离层组合的观测噪声远比电离层延迟大^[17]。在本文的智能手机 RTK 定位中，智能手机和天宝 R9 接收机距离较近，可以通过星间双差消除电离层延迟的影响。但对于长基线而言，由于基站和流动站距离较远，电离层延迟无法消除故不能忽略，需要将电离层延迟残差作为未知参数进行估计。

(2) 对流层延迟

对流层位置区域是地球大气层的低层部分，通常距离地面高度在 50 公里以下。卫星信号穿过对流层时，由于对流层的存在，会导致信号发生测距误差，这种误差称为对流层延迟。对流层延迟通常分为干延迟和湿延迟，干延迟占比九成以上且稳定，通常是使用模型进行改正。然而，湿延迟通常不稳定，大气层中水汽含量是其主要影响因素之一。因此，湿延迟很难通过经验模型进行有效改正，通常需要将其视为未知参数进行估计。对流层延迟如下式所示：

$$T = M_d \cdot T_d + M_w \cdot T_w \quad (2.13)$$

式中， M_w 为湿延迟投影系数； M_d 为干延迟投影系数； T_w 为湿延迟分量； T_d 为干延迟分量。

Hopfield 模型^[41]、Saastamoinen 模型^[42]和 Black 模型^[43]是对流层延迟常用的经验模型。NMF 模型^[44]、GMF 模型^[45]和 IMF 模型^[46]是对流层延迟常用的映射函数。这些模型和函数被广泛应用于 GNSS 定位和导航领域，用于对流层延迟进行建模和校正，以提高定位精度和可靠性。

使用智能手机进行精密单点定位时，用户对定位精度要求一般为亚米级，甚至厘米级，但对流层延迟有时对定位精度影响到米级，所以需要使用经验模型并将对流层作为未知参数进行估计。当使用智能手机 RTK 定位时，短基线时可以忽略对流层延迟的影响，因为短基线时双差观测值会把对流层延迟消掉。在长基线时，不可以忽略对流层延迟，因为流动站和基准站距离较远，无法完全消掉对流层的影响，所以需要利用分段常数和随机游走等方法对对流层进行参数估计。

(3) 多路径延迟

卫星信号在传播过程中因反射、折射或散射等现象而导致的延迟现象被称为多路径延迟。这种延迟会使接收设备接收到来自不同路径的多个信号，其中一些可能是经过反射或散射后到达的，与直射信号的到达时间有所偏差。多路径延迟是导致 GNSS 定位精度降低的主要因素之一，因为它会引入额外的测量误差，导致定位结果产生偏差。多路径效应与接收机所处环境密切相关，因此在用户进行定位时难以进行有效修正。智能手机所采用的线性天线无法区分接收到的卫星信号的极化方式，这会导致伪距观测值产生几米的误差。

减弱多路径效应是提高智能手机 GNSS 定位精度的关键问题之一。在卫星发射

GNSS 信号传播过程中，多路径效应会导致信号在到达接收机时经过不止一条路径，产生相位差异，从而影响定位精度。通常，研究者会选择远离高大建筑物、水面、玻璃及其他可能引起信号反射的表面的地方进行数据采集。这样可以减少信号在传播过程中与周围环境发生反射的可能性，从而降低多路径效应对定位精度的影响。特别是在城市峡谷等高密度建筑区域，选择避开高楼大厦的区域进行数据采集，有助于减少多路径效应的影响，以提高智能手机定位精度。另外，可以采用天线阵列和专业天线也是减轻多路径效应的有效方法。天线阵列可以通过对信号的相位和幅度进行空间处理，提高接收机对信号的抑制能力，减少多路径效应的影响。此外，通过一些专业天线设计具有较好的抗多路径效应能力，可以减少信号反射和衍射，以提高测量型接收机和智能手机的定位精度。除了在数据采集和天线设计方面的措施外，还可以采用数字信号处理技术来处理多路径效应。通过使用先进的信号处理算法，可以在接收端对信号进行深度分析和处理，识别和消除多路径信号，最大程度减小多路径效应对定位结果的影响。

综上所述，有多种方法可以减轻多路径效应，包括选择合适的数据采集地点、采用天线阵列和专业天线设计、以及应用数字信号处理技术等。这些方法的综合应用可以有效地提高智能手机 GNSS 定位的精度，保证定位结果的准确性和可靠性。

2.1.3 与接收机有关误差

(1) 接收机钟差

卫星使用的原子钟精度较高，因为原子钟能够提供非常稳定和准确的时间参考，是 GNSS 系统中的核心组件之一。相比之下，测量型接收机通常采用石英钟作为时钟源，其精度较低。然而，智能手机中使用的时钟比接收机中的石英钟精度还要低，这是因为智能手机的设计主要侧重于功耗和成本的考虑，而非高精度的时间测量。

在使用智能手机进行单点定位时，通常会将智能手机的坐标和时钟差一起作为未知参数进行估计。这是因为在单点定位中，需要同时估计接收机的位置和时钟偏差，以便准确计算卫星信号的传播时间。而在智能手机进行 RTK 定位时，情况则有所不同。RTK 定位通过基准站和流动站之间的观测数据差分来消除大部分误差，其中包括钟差。在这种情况下，智能手机的钟差可以通过星间单差消除。星间单差是通过比较两颗卫星的信号传播时间来计算钟差的方法。由于两颗卫星在同一时刻的传播路径基本相同，其钟差误差可以互相消除，从而得到更准确地钟差估计值。

因此，在智能手机的定位过程中，时钟误差是一个重要的影响因素。在单点定位中，需要将时钟误差考虑在内进行估计，而在 RTK 定位中，则可以通过星间单差来消除时钟误差。钟差对于智能手机的定位性能至关重要，尤其是在需要高精度定位的应用场景中，如导航、地图服务和精准农业等领域。

（2）接收机天线相位中心偏差

国际 GNSS 服务站向常用的接收机提供天线文件，目的是校正天线相位中心偏差，以降低其对定位精度的影响。天线文件包含了针对不同天线型号的校正信息，有助于接收机更准确地计算卫星信号的到达时间和位置。然而，智能手机的天线相位中心通常需要根据智能手机型号进行提前标定，以确保定位过程中的准确性和可靠性。通过对天线相位中心的标定，智能手机可以更精确地接收和处理 GNSS 信号。

（3）地球形变改正

a) 固体潮影响

地球在太阳、月亮等天体引力扰动下，无论是接收机还是智能手机在地球上的位置都会在国际坐标框架下发生变化。有时影响甚至能达到米级。所以必须进行固体潮、海潮和极潮的改正^[47]。改正公式为：

$$r_M = r_{mo} + \Delta r_{sol} + \Delta r_{ocean} + \Delta r_{pole} \quad (2.14)$$

式中， r_M 、 r_{mo} 分别为接收机实际坐标和接收机参考点坐标； Δr_{pole} 为极潮改正； Δr_{ocean} 为海潮改正； Δr_{sol} 为固体潮改正。

固体潮是由地球引力影响的，地球形变表达式如下：

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r}_{sol} = & \sum_{j=2}^3 \frac{G \cdot M_j \cdot \mathbf{r}}{G \cdot M \cdot \mathbf{R}_j^3} \left\{ \left[3l_2 (\mathbf{R}_j \cdot \hat{\mathbf{r}}) \right] \mathbf{R}_j + \left[3 \left(\frac{h_2}{2} - l_2 \right) (\mathbf{R}_j \cdot \hat{\mathbf{r}})^2 - \frac{h_2}{2} \right] \hat{\mathbf{r}} \right\} \\ & + \left[-0.025 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot \sin (\theta_g + \lambda) \right] \cdot \hat{\mathbf{r}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

式中， $l_2 = 0.609, h_2 = 0.085$ ； M_j 是月亮或太阳的质量， $j = 2, j = 3$ 分别表示月亮和太阳； \mathbf{r} ， \mathbf{R}_j 分别表示用户接收机和摄动天体在地心坐标系中的坐标向量； $\hat{\mathbf{r}}$ 表示单位向量； φ 表示接收机经度； λ 表示接收机纬度； θ_g 表示格林尼治平恒星时。

固体潮在水平方向影响最大为 5cm，高程为 30cm，它主要与时间和纬度变化有关。在使用智能手机进行静态定位时，如果实验时长为 24 小时，其周期部分可以消掉，但固定形变是无法消掉。

b) 海潮改正

潮汐是由地球和月球以及太阳之间的引力相互作用引起的地球表面和海洋水位周期性变化现象。这种潮汐引起的地球形变虽然存在，但在智能手机静态定位场景下，通常可以忽略其影响。首先，如果定位点距离海洋较远，潮汐引起的地球形变对定位精度的影响会相对较小。其次，如果定位精度要求不是在厘米级别，而是在数米或更粗糙的水平，潮汐的影响也可以被忽略。此外，如果观测时间超过 24 小时，潮汐引起的地球形变通常会在短时间内波动，对整体定位结果的影响也会被平均掉。因此，在这些情况下，可以合理地忽略潮汐对智能手机静态定位的影响，不会对定位结果产生显著的影响。

c) 极潮改正

极潮是由地球自转造成的，其周期一般是 14 个月。其改正公式如下：

$$\Delta N = -9 \cos 2\varphi \left[(X_p - \bar{X}_p) \cos \lambda - (Y_p - \bar{Y}_p) \sin \lambda \right] \quad (2.16)$$

$$\Delta E = 9 \sin \varphi \left[(X_p - \bar{X}_p) \sin \lambda + (Y_p - \bar{Y}_p) \cos \lambda \right] \quad (2.17)$$

$$\Delta U = -33 \sin 2\varphi \left[(X_p - \bar{X}_p) \cos \lambda - (Y_p - \bar{Y}_p) \sin \lambda \right] \quad (2.18)$$

式中， $[\Delta N, \Delta E, \Delta U]$ 表示测站在站心地平坐标系下的偏差； X_p, \bar{X}_p 和 Y_p, \bar{Y}_p 表示地球极移和地球平均极移； λ 表示测站经度； φ 表示测站纬度。极潮的影响很小通常会被接受机钟差消掉，智能手机定位精度一般为分米级，一般不需要考虑极潮。如果使用智能手机采集几个月的数据分析其定位性能，需要将极潮改正考虑在内。

2.2 参数估计理论

2.2.1 最小二乘估计

通常，在数学优化中，最小二乘法被广泛采用。它通过寻找数据的最佳函数匹配，即通过最小化误差的平方和来实现。最小二乘是比较简单易懂的方法，当智能手机伪距单点定位时常用到最小二乘，比较方便计算智能手机的位置，并确保估计智能手机位置参数与实际参数之间误差最小。其函数模型如下式所示：

$$v = B\hat{x} - l \quad (2.19)$$

式中， v, l 表示观测值的误差向量和观测向量； \hat{x}, B 表示待估参数和线性化后的系数矩阵。

$$l = L - (B \cdot X_0 + d) \quad (2.20)$$

式中, L 、 X_0 、 d 分别表示观测值向量、待估参数的初值向量和测方程的常数项。

$v^T P v = \min$ 表示最小二乘估计的求解准则, 其中 P 表示为观测值向量的权矩阵。 \hat{x} 的估值为:

$$\hat{x} = Q(\hat{x}) B^T P L \quad (2.21)$$

式中, $Q(\hat{x})$ 的协因数阵:

$$Q(\hat{x}) = (B^T P B)^{-1} \quad (2.22)$$

2.2.2 序贯最小二乘估计

为了解决内存占用大、计算效率低等问题, 传统的最小二乘估计可以转化为一种称为序贯最小二乘估计的方法^[48]。当序贯最小二乘平差的参数不变时, 它等同于静态的卡尔曼滤波。序贯最小二乘核心思想是需要利用最小二乘估计的第一历元参数, 然后将协方差矩阵和估计值作为虚拟值给下一个历元, 再进行最小二乘^[49]。在处理智能手机GNSS原始观测数据, 待估参数会因为卫星的变化、周跳和信号中止等原因发生变化^[49]。因此, 序贯最小二乘可以很好地解决这一问题。

假设上一个历元和当前历元的误差方程为:

$$\begin{aligned} v_1 &= A_1 x + B_1 y - L_1, P_1 \\ v_2 &= A_2 x + B_2 z - L_2, P_2 \end{aligned} \quad (2.23)$$

式中, x 、 y 和 z 表示两个历元间不变和变化的待估参数; 下标数字为历元编号; l 、 P 表示观测向量、观测量的权阵; A 、 B 表示观测向量、观测量设计矩阵。

上一历元的法方程表示为:

$$\begin{bmatrix} N_{11}^1 & N_{12}^1 \\ N_{21}^1 & N_{22}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^T P_1 A_1 & B_1^T P_1 A_1 \\ B_1^T P_1 A_1 & B_1^T P_1 B_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^T P_1 l_1 \\ B_1^T P_1 l_1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

第一个共同待估参数的估值和方差-协方差阵分别为:

$$\hat{x}_1 = \left(N_{11}^1 - N_{12}^1 \left(N_{22}^1 \right)^{-1} N_{21}^1 \right)^{-1} \left(W_{11}^1 - N_{12}^1 \left(N_{22}^1 \right)^{-1} W_{22}^1 \right) \quad (2.25)$$

$$Q_1(\hat{x}) = \left(N_{11}^1 - N_{12}^1 \left(N_{22}^1 \right)^{-1} N_{21}^1 \right)^{-1} \quad (2.26)$$

当前历元与上一历元估计值作为当前历元虚拟观测值的误差方程联立得:

$$v_2 = A_2 x + B_2 z - L_2, P_2 \quad (2.27)$$

$$x = \left(N_{11}^1 - N_{12}^1 \left(N_{22}^1 \right)^{-1} N_{21}^1 \right)^{-1} \left(W_{11}^1 - N_{12}^1 \left(N_{22}^1 \right)^{-1} W_{22}^1 \right), \left(N_{11}^1 - N_{12}^1 \left(N_{22}^1 \right)^{-1} N_{11}^1 \right)^{-1} \quad (2.28)$$

求得第二个历元的法方程为：

$$NX_2 = W \quad (2.29)$$

$$N = \begin{bmatrix} A_2^T P_2 A_2 + N_{11}^1 - N_{12}^1 \left(N_{22}^1 \right)^{-1} N_{21}^1 & A_2^T P_2 B_2 \\ B_2^T P_2 A_2 & B_2^T P_2 B_2 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$W = \begin{bmatrix} A_2^T P_2 l_2 + W_{11}^1 - N_{12}^1 \left(N_{22}^1 \right)^{-1} W_{22}^1 \\ B_2^T P_2 l_2 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

序贯最小二乘处理观测数据时是将观测值分成两组或多组，按组的顺序分别做相关间接平差，从而使其达到与两期或多期网一起做整体平差同样的结果，因此在处理大量数据时更高效。

2.2.3 卡尔曼滤波算法

在智能手机 RTK 定位中常用卡尔曼滤波作为滤波方式。通过将卡尔曼滤波与 GNSS 观测数据进行融合，RTK 定位系统能够在动态环境中实现高精度的位置跟踪，从而为用户提供准确的导航和定位服务。卡尔曼滤波的状态方程和观测方程为^[50]：

$$\begin{aligned} X_k &= \phi_{k,k-1} \cdot X_{k-1} + W_{k-1} \\ L_k &= H_k \cdot X_k + V_k \end{aligned} \quad (2.32)$$

式中： k 表示历元时刻； $\phi_{k,k-1}$ 表示状态转移矩阵； H_k 为系数矩阵； X 为观测值状态向量； L 为观测值向量； V 为观测噪声向量； W 为动态噪声向量。

智能手机定位时，一般认为不同卫星的伪距观测值和相位观测值是独立的，因此观测值噪声与系统的噪声是无关的，其随机模型为：

$$E(w_k) = 0, E(v_k) = 0 \quad (2.33)$$

$$\text{Cov}(w_k, v_i) = E[w_k v_i^T] = 0 \quad (2.34)$$

$$\text{Cov}\{v_k, v_i\} = E[v_k v_i^T] = R_k \delta_{ki} \quad (2.35)$$

$$\text{Cov}\{w_k, w_i\} = E\{w_k w_i^T\} = Q_k \delta_{ki} \quad (2.36)$$

式中， Q_k 、 R_k 为观测噪声的方差协方差阵和系统动态噪声的方差协方差阵； δ_{ki} 矩阵满足：

$$\delta_{ki} = \begin{cases} 1 & k = j \\ 0 & k \neq j \end{cases} \quad (2.37)$$

卡尔曼滤波的计算过程可以分为预测（时间更新过程）和校正（测量更新过程）两个步骤，主要递推步骤如下，式（2.38）和式（2.39）为预测过程，式（2.40）~式（2.42）为校正过程^[50]。

$$X_{k/k-1} = \phi_{k/k-1} \cdot X_{k-1/k-1} \quad (2.38)$$

$$P_{k/k-1} = \phi_{k/k-1} \cdot P_{k-1/k-1} \cdot \phi_{k/k-1}^T + Q_{k-1} \quad (2.39)$$

$$K_k = P_{k/k-1} \cdot H_k^T \cdot (H_k \cdot P_{k/k-1} \cdot H_k^T + R_k)^{-1} \quad (2.40)$$

$$X_{k/k} = X_{k/k-1} + K_k \cdot (L_k - H_k \cdot X_{k/k-1}) \quad (2.41)$$

$$P_{k/k} = (I - K_k \cdot H_k) \cdot P_{k/k-1} \quad (2.42)$$

式中， $X_{k-1/k-1}$ 、 $X_{k/k-1}$ 分别为滤波值和预测值； Q_{k-1} 表示系统噪声矩阵； $P_{k-1/k-1}$ 、 $P_{k/k-1}$ 分别为协方差矩阵和预测协方差矩阵； K_k 表示卡尔曼滤波增益矩阵； $X_{k/k}$ 为参数估计值，即为浮点解； R 、 $P_{k/k}$ 分别为测量协方差矩阵和协方差矩阵。其中 R 矩阵各元素分别由不同卫星伪距和载波相位的随机模型决定。

2.3 本章小结

本章首先介绍了与卫星、传播路径和接收机相关的误差源。接着，在智能手机定位中，介绍常用的参数估计理论，包括最小二乘和卡尔曼滤波。最小二乘法通过最小化残差平方和来估计参数，适用于线性和非线性系统。而卡尔曼滤波则利用系统的观测数据对系统状态进行最佳估计，能够处理系统动态和测量噪声的不确定性。这两种方法在智能手机定位中发挥着重要作用，有助于提高智能手机的定位精度和稳定性。

第3章 安卓智能手机GNSS 原始数据获取与质量分析方法

3.1 概述

随着智能手机的普及和5G网络的快速发展，智能手机用户的需求也逐渐从简单的导航功能转变为追求更高精度、更可靠性的应用服务。谷歌于2016年开放了应用程序编程接口，使用户能够轻松访问智能手机的GNSS原始观测值。同时，安卓系统具有清晰的结构设计、强大的兼容性和完善的GNSS模块，这使得许多学者都能够对智能手机的GNSS原始观测值进行分析和评估。目前安卓智能手机用户越来越多，智能手机的使用场景也变得丰富。市场上许多智能手机芯片、结构不同，所以多数智能手机的GNSS观测数据质量也不同。在智能手机实际使用环境采集其GNSS观测数据，分析不同环境的智能手机数据质量，评估智能手机在何种环境能达到何种精度。这可以为智能手机制造商和智能手机用户提供一些有价值的参考依据。

本节将对智能手机GNSS原始观测值进行深入研究，重点关注智能手机数据质量的影响因素和特征。通过系统地分析智能手机在不同环境条件下的GNSS原始观测值，将探索提升智能手机定位精度的方法和技术。希望能够为智能手机用户提供更可靠、更准确的定位服务，同时推动智能手机定位技术的不断进步和创新。

3.2 智能手机GNSS观测值获取

3.2.1 智能手机GNSS模块API介绍

智能手机在日常生活中的普及程度不断提升，已经成为人们生活不可或缺的一部分。随着技术的不断发展和智能手机功能的日益丰富，它们不仅仅是通信工具，还担负起人们的日常导航功能。谷歌在2016年开放了GNSS原始数据接口，智能手机可以直接获取伪距、相位和多普勒等GNSS原始观测数据，不再受限于只能获取芯片输出的位置、速度和方向等定位结果，从而使很多研究者投入到智能手机定位的研究中^[51]。但不是所有手机都支持这一功能，表3.1列出了部分支持GNSS原始测量数据的设备及其提供的数据。

表 3.1 部分手机支持 GNSS 原始观测值获取情况

型号	伪距观测值	载波相位观测值	L5/E5	卫星系统
小米 MI8	有	有	有	G/C/E/R
三星 Galaxy S21	有	没有	有	G/C/E/R
荣耀 V40	有	没有	没有	G/C/E/R
华为 P40	有	有	有	G/C/E/R
索尼 Xperia 5 III	有	没有	没有	G/C/E/R
Vivo IQOO7	有	没有	没有	G/C/E/R
华为 Mate 40	有	有	有	G/C/E/R

在表中, G/C/E/R 分别代表着 GPS、BDS、Galileo 和 GLONASS 四大全球卫星导航系统。2018 年之前, 市面上大部分的智能手机仅支单频的伪距观测值, 仅有少部分手机支持获取相位观测值。小米公司在 2018 年推出首款双频智能手机小米 8^[52]。此后, 越来越多的手机厂商推出双频或三频的智能手机。利用安卓智能手机 API 中的 GnssClock 类和 GnssMeasurement 类, 智能手机用户可以方便地获取与 GNSS 相关的观测数据。这些数据包括卫星信号发射时刻和伪距瞬时变化率等信息, 为用户提供了定位和导航所需的关键数据支持。GnssClock 类的字段则主要用于计算 GPS 钟面时。

GNSS 原始观测值可以通过安卓智能手机的 API 接口获取。谷歌公司发布的 gnsslogger 最开始只能输出 txt 格式的原始观测值。最初的版本虽然有原始观测值, 但观测值确实较少, 导致定位精度较差。后面谷歌更新了 gnsslogger, 也可以直接获取 RINEX 格式的文件, 使采集的观测数据相比之前有所增加。Rinex ON 功能比较全但无法在 1.3 版本的安卓智能手机上使用。相比之下, Geo++ RINEX Logger 软件已在多台安卓设备上使用且支持 GNSS 观测数据以 RINEX 格式输出。因此本文智能手机小米 8 和华为 P40 均使用 Geo++ RINEX Logger 软件进行 GNSS 原始观测数据采集。

3.2.2 伪距观测值的计算

安卓智能手机的伪距计算公式为:

$$P = (t_{Rx} - t_{Tx}) \cdot c \quad (3.1)$$

式中: P 为伪距; t_{Rx} 、 t_{Tx} 分别为安卓智能手机接收到卫星信号和卫星发射信号的时间; c 为光速; t_{Rx} 是由计算得出, 而 t_{Tx} 可以直接从采集数据中获取。安卓智能手机采集的各 GNSS 系统的时间是不同的, 并且采集原始观测值中的各系统对应的时间参数含义

也不同，因此各个系统计算时间的公式也是不同，下面给出了不同导航系统 t_{Rx} 的计算方法：

GPS:

$$t_{Rx} = t_{Rx_{GNSS}} - \text{WeekNumberNanos} \quad (3.2)$$

GLONASS:

$$t_{Rx} = t_{Rx_{GNSS}} - \text{DayNumberNanos} + 3h - \text{leapsecond} \quad (3.3)$$

BDS:

$$t_{Rx} = t_{Rx_{GNSS}} - \text{WeekNumberNanos} - 14s \quad (3.4)$$

Galileo:

$$t_{Rx} = t_{Rx_{GNSS}} - \text{MilliSecondsNanos} \quad (3.5)$$

式中： $t_{Rx_{GNSS}}$ 表示测量时间； MilliSecondsNanos 、 DayNumberNanos 、 WeekNumberNanos 分别表示 $t_{Rx_{GNSS}}$ 中的整 100ms、整天 (86400s) 和整周 (604800s) 的部分，单位均为纳秒； leapsecond 表示闰秒。

测量时间如下式所示：

$$t_{Rx_{GNSS}} = \text{TimeNanos} + \text{TimeOffsetNanos} - (\text{FullBiasNanos} + \text{BiasNanos}) \quad (3.6)$$

式中， TimeNanos 为手机的本地时钟； FullBiasNanos 为手机本地时钟总偏差； BiasNanos 为手机本地钟差； TimeOffsetNanos 为测量的时间偏移，单位均为纳秒。

3.3 智能手机原始观测数据采集

本文的实验选用了安卓智能手机小米 8 作为流动站，并搭配使用 Trimble R9 作为基站进行数据采集。实验覆盖了静态开阔、静态遮挡、动态开阔以及动态遮挡等不同环境条件。值得注意的是，在静态遮挡环境下，还使用了华测 B5 作为基准站。通过这些实验，我们将全面评估安卓智能手机在不同环境下的定位性能，为进一步研究和优化安卓智能手机定位提供数据支持和参考。在实验过程中，小米 8 均使用 Geo++ RINEX Logger APP 进行数据采集。

静态开阔实验地点位于中国科学院上海天文台佘山科技园区篮球场旁的空地，采集时间为 2023 年 2 月 24 日 8 时 40 分-9 时 20 分，采样间隔为 1 秒，实验地点如下图所示：



图 3.1 静态开阔场景小米 8 和 Trimble R9 基站

静态遮挡实验地点位于中国科学院上海天文台佘山科技园区 VLBI 实验楼前树下，采集时间为 2023 年 9 月 4 日 8 时 55 分-9 时 10 分，采样间隔为 1 秒，实验地点如下图所示：



图 3.2 静态遮挡环境小米 8 和华测 B5 基站

动态实验则从中国科学院上海天文台徐汇园区出发，前往中国科学院上海天文台佘山科技园，华测 B5 与小米 8 摆放位置关系如下图所示：

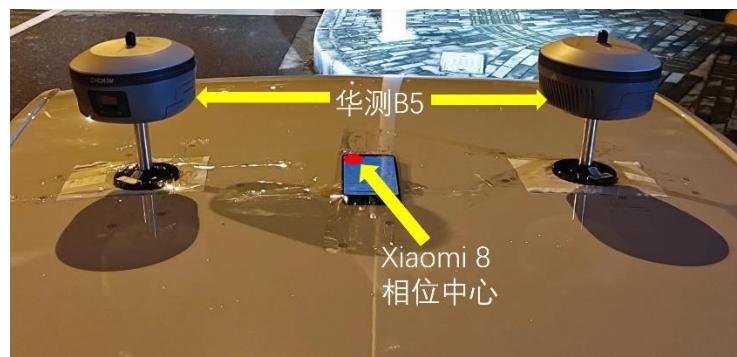


图 3.3 华测 B5 与小米 8 位置关系

该路线穿越了城市遮挡环境（2023年7月16日7时16分-7时26分）和郊区开阔环境（2023年7月16日7时26分-7时37分）。下图展示了运动轨迹，在图中放大展示了经过的环境部分。在遮挡环境中，高楼密布于马路两侧，可能导致信号被部分或完全遮挡，从而影响定位精度。相比之下，在开阔环境中，没有高楼遮挡，信号传播路径更为畅通，有利于接收到更多的卫星信号并提高定位准确性。一般选择开阔环境进行定位可能更有利于获取更稳定的GNSS信号，提高定位精度。

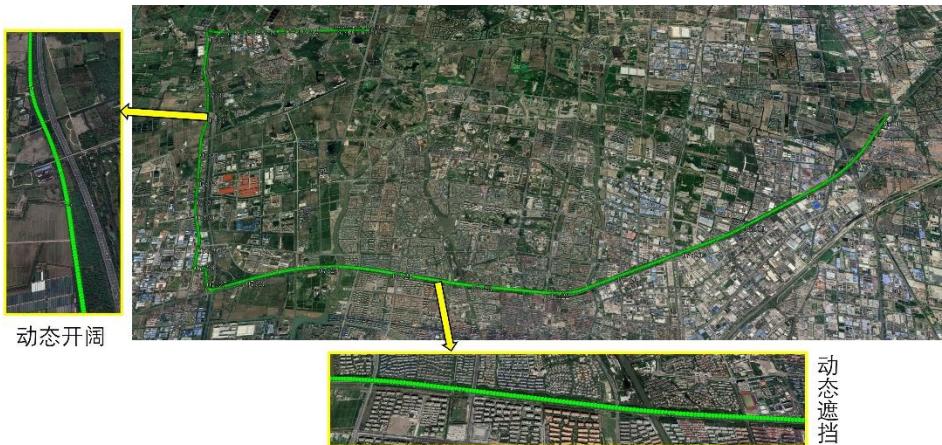


图 3.4 小米 8 运动轨迹及部分环境

为了评估智能手机RTK定位精度，静态实验中的参考坐标事先用华测CGI-610接收机RTK固定解标定。在动态车载实验中，将小米8手机放置在两台华测B5接收机之间，以这两台接收机的RTK固定解均值作为小米8手机动态位置的基准。一般来说，小米8手机的天线相位中心被认为位于智能手机左上方^[17]，如图3.3所示，小米8手机的相位中心正好位于两台B5接收机之间。由于B5接收机天线高度带来的高程影响已经在后续数据处理中被扣除。

本文以GPS、BDS和GLONASS三个系统的单频伪距和载波观测数据为研究对象，针对小米8观测数据中BDS和GLONASS仅有L1频点的情况展开分析。在遮挡环境下，小米8采集的观测数据质量较差，难以实现模糊度固定，因此只能考虑浮点解。

3.4 智能手机原始观测数据分析

3.4.1 卫星可见数

智能手机GNSS原始观测数据质量是与卫星可见数密切相关。将智能手机和接收机放置相同的环境中同时进行采集数据，分析智能手机小米8和天宝R9的卫星可见数。

图 3.5 是静态开阔实验时小米 8 手机与天宝 R9 接收机的可见卫星数。由图 3.5 可知, 天宝 R9 接收机观测卫星数较多, 主要是 BDS 系统的卫星多于小米 8, 天宝 R9 和小米 8 在 GPS 和 GLONASS 两个系统观测的卫星数接近。图 3.6 是静态开阔实验小米 8 手机与天宝 R9 接收机在整个观测时段卫星可见情况, 小米 8 手机观测卫星有 G06、G30 和 C20 长时间观测不到, 天宝 R9 观测卫星有 G06、R07、R13、C16 和 C19 长时间观测不到。由以上卫星可见情况来看, 智能手机采集的数据质量差于天宝 R9。

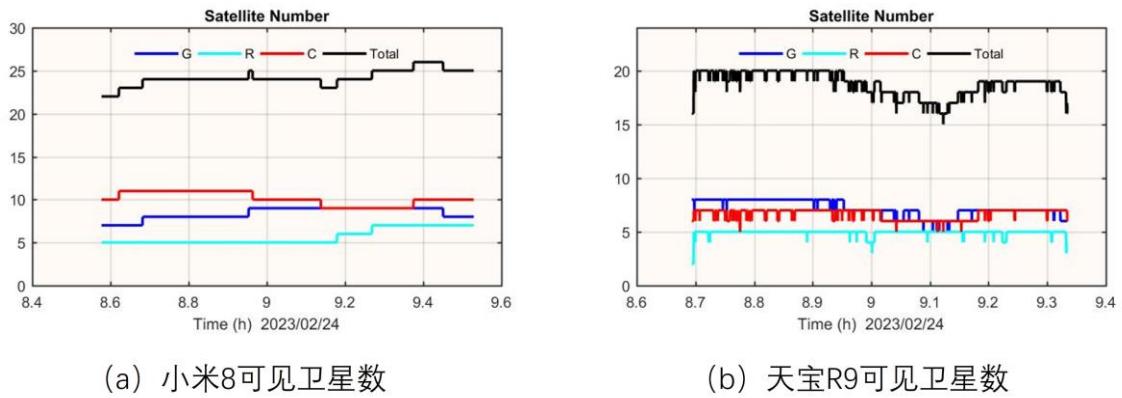


图 3.5 小米 8 和天宝 R9 可见卫星数

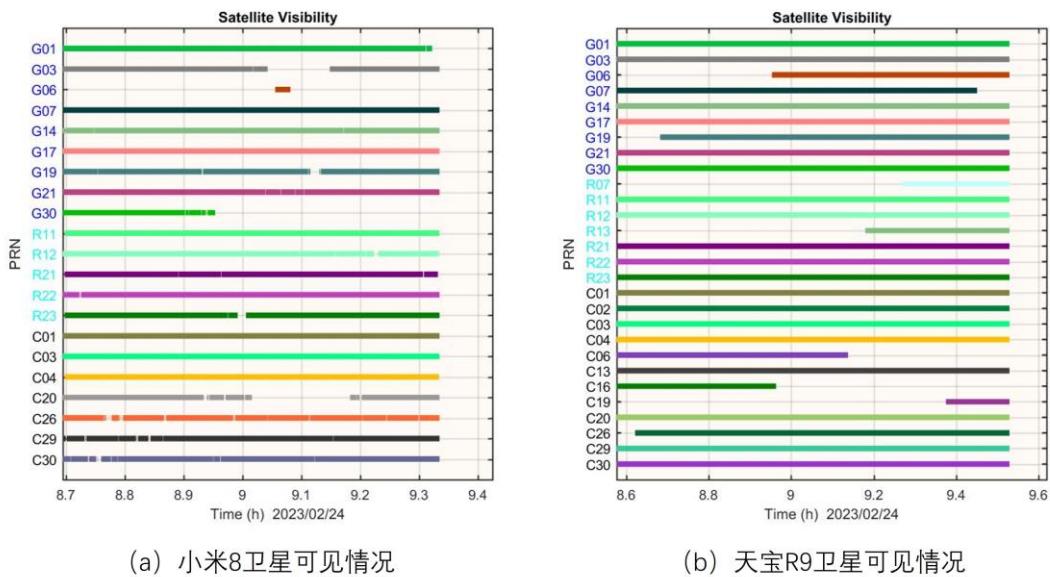


图 3.6 小米 8 和天宝 R9 卫星可见情况

智能手机小米 8 观测北斗卫星数量较少, 主要是因为只能观测到北斗卫星 30 号之前的, 可能是小米 8 发布时搭载的 GNSS 芯片不具备接受北斗系统后面发射的卫星。这

意味着小米 8 用户在定位时无法完全利用北斗三号卫星系统提供的卫星信号来增强定位精度。相比于其他完全支持北斗三号系统的设备，小米 8 在使用北斗卫星系统进行定位时可能会受到限制，从而影响定位准确性和可靠性。

3.4.2 卫星周跳情况

在 GNSS 定位中，周跳是指接收机在观测过程中突然发生的跳变，导致距离测量值出现不连续性。这种突变可能由于信号传播路径的变化、卫星状态变化或接收机硬件问题等引起，对定位精度造成负面影响。因此，及时检测和修正周跳是保证定位准确性的关键步骤。

在影响智能手机 GNSS 定位的误差源中，除了电离层延迟误差、多路径误差和测量噪声之外，其余误差对伪距和载波相位测量的影响是相似的^[53]。因此，本研究采用伪距和载波相位观测值的组合来检测周跳现象。

智能手机 RTK 定位时能通过站间单差消掉卫星端的误差，星间单差消掉接收机端误差。当智能手机端 r 和参考站 b 距离较近时，双差对流层和双差电离层也可忽略不计，故伪距和相位观测方程为：

$$\begin{cases} \nabla \Delta P_{rb,i}^{jk} = \nabla \Delta \rho_{rb,i}^{jk} + \varepsilon_{P_{rb,i}^{jk}} \\ \nabla \Delta \varphi_{rb,i}^{jk} = \nabla \Delta \rho_{rb,i}^{jk} + \lambda_i \cdot \nabla \Delta \alpha_{rb,i}^{jk} + \varepsilon_{\varphi_{rb,i}^{jk}} \end{cases} \quad (3.7)$$

式中， $\nabla \Delta$ 为双差算子； $\varphi_{rb,i}^{jk}$ 表示以米为单位的载波相位观测值； $P_{rb,i}^{jk}$ 表示伪距观测量； $\rho_{rb,i}^{jk}$ 表示卫地距； $\alpha_{rb,i}^{jk}$ 表示整周模糊度； $\varepsilon_{P_{rb,i}^{jk}}$ 表示伪距噪声； $\varepsilon_{\varphi_{rb,i}^{jk}}$ 表示相位噪声； j, k 表示卫星； λ_i 为频率 i 上的波长；。

由上式伪距与相位作差得：

$$\nabla \Delta \alpha_{rb,i}^{jk} = \frac{(\nabla \Delta \varphi_{rb,i}^{jk} - \nabla \Delta P_{rb,i}^{jk}) + (\varepsilon_{P_{rb,i}^{jk}} - \varepsilon_{\varphi_{rb,i}^{jk}})}{\lambda_i} \quad (3.8)$$

对上式进行历元间差分。此时，整周模糊度的差分可表示为：

$$\nabla \Delta \alpha_{rb,i+1}^{jk} - \nabla \Delta \alpha_{rb,i}^{jk} = \frac{(\nabla \Delta \varphi_{rb,i+1}^{jk} - \nabla \Delta \varphi_{rb,i}^{jk}) - (\nabla \Delta P_{rb,i+1}^{jk} - \nabla \Delta P_{rb,i}^{jk}) + \Delta \varepsilon}{\lambda} \quad (3.9)$$

若没有周跳发生，上式伪距和相位的历元间双差应接近为 0。若发生周跳，则上式会超出一定范围。因此可根据上式是否大于阈值来判断是否发生周跳，阈值一般设为 0.5

周。伪距/载波组合法在 1s 采样率下，可以很好地探测出小至 1 周的周跳^[53-54]。

使用此方法探测的周跳情况如下图所示：

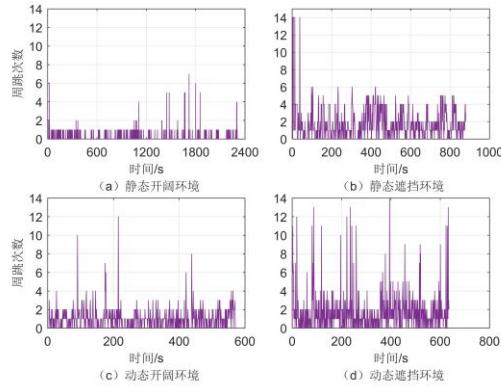


图 3.7 不同环境下智能手机小米 8 周跳卫星数

观察结果显示，在遮挡环境下，卫星信号发生周跳的次数相对较多。这主要有两个原因：首先，遮挡环境下，卫星信号必须穿越更多的障碍物，如建筑物和树木等。这些物体会引起信号衰减，导致信号强度下降，从而使得智能手机难以正常跟踪卫星信号，或者在信号重新捕获时可能发生周跳。其次，遮挡环境更容易引起信号的反射和折射，增加了多路径效应的明显性。这些额外的信号路径会导致智能手机产生不准确的测量结果，从而容易引发周跳事件的发生。

3.4.3 伪距/相位观测噪声分析

伪距观测值精度一般采用零基线法进行测量，由于手机天线内置于手机内，很难实现零基线，本研究采用短基线法来计算伪距和相位噪声。在本文的短基线算法中，基准站的坐标已经通过 RTK 精确进行了标定，因此消除了坐标误差带来的影响。另外，采用的短基线的基线长度均小于 10m，可以认为完全消除了轨道钟差误差及对流层电离层误差。短基线观测模型可以写成^[55]：

$$\begin{aligned}\nabla \Delta P_{rb,i}^{jk} &= \varepsilon_{P_{rb,i}^{jk}} \\ \nabla \Delta \varphi_{rb,i}^{jk} &= \lambda_i \nabla \Delta \alpha_{rb,i}^{jk} + \varepsilon_{\varphi_{rb,i}^{jk}}\end{aligned}\quad (3.10)$$

式中， $\alpha_{rb,i}^{jk}$ 为双差载波相位偏差，单位为周；其他符号定义与式 (3.7) 的一致。其中 $\alpha_{rb,i}^{jk}$ 可以作为参数进行估计，则剩余的残差中仅包含噪声：

$$E_p = \frac{1}{2} \times \varepsilon_{P_{rb,i}^{jk}} = \frac{1}{2} \times \nabla \Delta P_{rb,i}^{jk} \quad (3.11)$$

$$E_\varphi = \frac{1}{2} \times \varepsilon_{\varphi_{rb,i}^{jk}} = \frac{1}{2} \times (\nabla \Delta \varphi_{rb,i}^{jk} - \lambda_i \nabla \Delta \alpha_{rb,i}^{jk}) \quad (3.12)$$

式中, E_p 为单差后伪距噪声; E_φ 为单差后相位噪声; 当流动站和基准站的接收机类型一致时, 通常认为它们的测量噪声也是相同的, 此时归一化因子设置为 1/2。若基准站和流动站的接收机类型不一致时, 比如智能手机作为流动站, 接收机作为基准站, 则归一化因子需要重新设置。已有的研究证明, 测量型接收机的伪距观测噪声是智能手机的 1/10 倍, 它们载波相位的噪声是相同量级的^[55]。因此, 本文使用智能手机小米 8 作为流动站, 天宝 R9 作为基准站时, 设置了伪距的归一化因子 $1/\sqrt{2}$, 以忽略测量型接收机对伪距的影响。同时, 设置了载波相位的归一化因子 $1/2$, 假定测量型接收机的载波相位测量噪声与智能手机的测量噪声在相同数量级上。

当智能手机小米 8 的位置提前用华测接收机的 RTK 固定解标定好, 并且在短基线中忽略多路径效应的影响, 上面的方法依然适用, 其模型改为:

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{1}{\sqrt{2}} \times \varepsilon_{P_{rb,i}^{jk}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times (\nabla \Delta P_{rb,i}^{jk} - \nabla \Delta \rho_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}) \\ E_\varphi &= \frac{1}{2} \times \varepsilon_{\varphi_{rb,i}^{jk}} = \frac{1}{2} \times (\nabla \Delta \varphi_{rb,i}^{jk} - \nabla \Delta \rho_{r_1 r_2}^{s_1 s_2} - \lambda_i \nabla \Delta \alpha_{rb,i}^{jk}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

式中: $\rho_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}$ 为已知坐标反算的双差卫地距离。然后统计上式 E_p 和 E_φ 的标准偏差来量化测量噪声。

通过短基线双差残差法计算的伪距噪声下图所示。在静态开阔环境下, 北斗卫星导航系统和美国全球定位系统的伪距噪声大部分保持在 10 米以内, 俄罗斯的格洛纳斯定位系统的伪距噪声大部分保持在 20 米以内。同时, GPS、BDS 和 GLONASS 的伪距噪声均方根值分别为 4.65 米、5.08 米和 8.54 米。在其他环境下, 伪距噪声均方根值可参考下表。研究结果表明, 在智能手机小米 8 中, GPS、BDS 和 GLONASS 的伪距观测值噪声相差较大。因此, 当使用智能手机进行多系统定位时, 需要对不同系统的伪距观测值进行分别的加权处理。

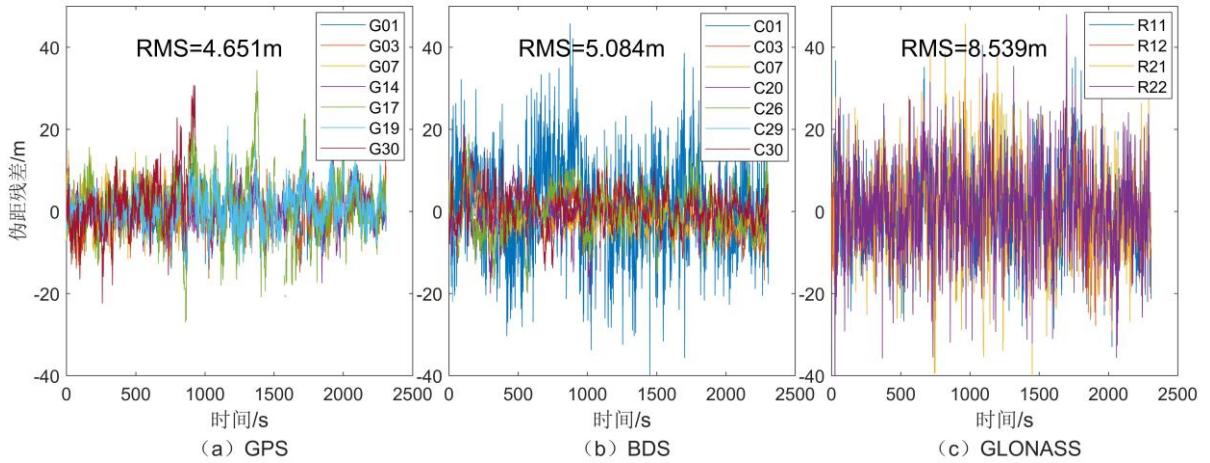


图 3.8 静态开阔环境下智能手机小米 8 RTK 双差伪距噪声

本研究在静态开阔、静态遮挡、动态开阔和动态遮挡四种环境下进行了实验验证，数据采集时间均在半小时到一小时之间。下表中列出了不同系统的双差伪距噪声及其均方根值。结果显示，在 GLONASS 系统中，伪距噪声较大，均方根值超过了 8 米；而在 BDS 和 GPS 系统中，伪距噪声接近，均方根值在 5 米左右。基于不同系统间伪距噪声的均方根值大小关系，确定了 GPS、BDS 和 GLONASS 的权重分别为 5.14、4.92 和 8.24。在后续的定位实验中，将伪距观测值 σ_0 按照这些权重进行权重分配。

表 3.2 智能手机小米 8 RTK 双差伪距噪声 (单位:m)

卫星系统	静态开阔	静态遮挡	动态开阔	动态遮挡	均方根值
GPS	4.65	5.67	5.15	5.07	5.14
BDS	5.08	5.38	4.02	5.17	4.92
GLONASS	8.54	8.11	8.13	8.19	8.24

使用短基线双差残差法计算的相位噪声如下图所示。在静态开阔环境下，GPS、BDS 和 GLONASS 的相位噪声大多保持在 0.02 米以内，它们的相位噪声均方根值分别为 0.009 米、0.008 米和 0.009 米。其他环境下的相位噪声均方根值可参考下表，结果显示在四种不同环境下，三个系统的相位噪声差异很小，均方根值分别为 0.009 米、0.008 米和 0.009 米。在后续的定位实验中，本文第五章提出的基站载噪比联合卫星系统间综合定权随机模型将相位观测值按照这些权重进行设置。

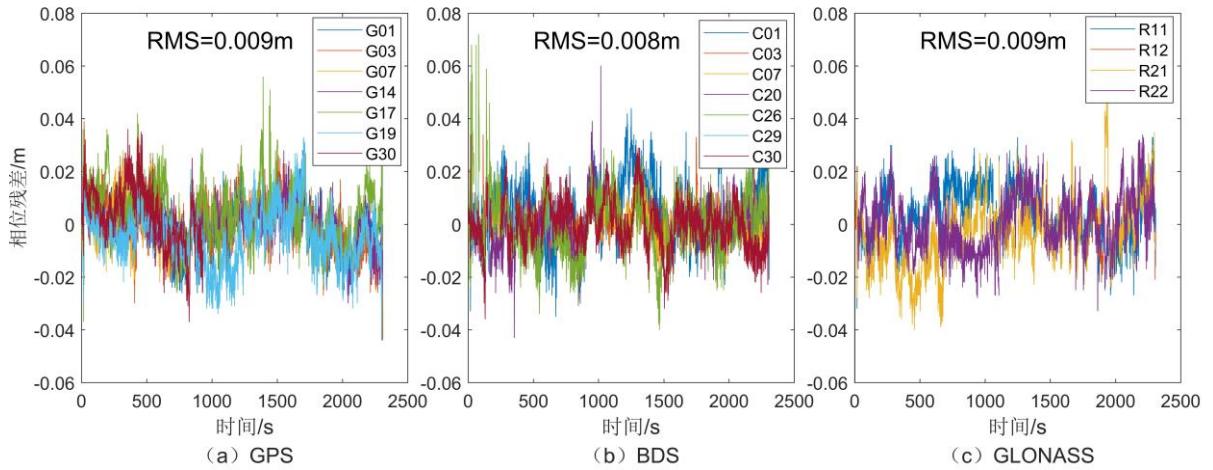


图 3.9 智能手机小米 8 RTK 双差相位噪声

表 3.3 智能手机小米 8 RTK 双差相位噪声 (单位:m)

卫星系统	静态开阔	静态遮挡	动态开阔	动态遮挡	均方根值
GPS	0.009	0.010	0.009	0.010	0.009
BDS	0.008	0.009	0.008	0.009	0.008
GLONASS	0.009	0.011	0.009	0.010	0.009

3.5 本章小结

本章首先介绍了如何计算伪距观测值。然后以智能手机小米 8 作为研究对象，分别在静态开阔、静态遮挡、动态开阔和动态遮挡四种情况下，从卫星跟踪情况、周跳情况和伪距相位观测噪声四个方面对 GNSS 观测数据质量进行分析与评价，实验结果表明：小米 8 手机可观测到的卫星数量比天宝 R9 少，主要是少 BDS 卫星；在遮挡环境下，智能手机小米 8 卫星信号发生周跳的次数相对较多；智能手机小米 8 的观测数据中不同卫星系统观测值的伪距噪声差异较大，BDS 和 GPS 卫星的伪距观测值精度明显优于 GLONASS，而小米 8 观测数据中不同卫星系统观测值的相位噪声差异较小。

第4章 不同电离层模型的智能手机 SPP 定位分析

4.1 概述

随着智能手机厂商不断更新智能手机的 GNSS 模块，并在智能手机中加入多源传感器，使基于智能手机 GNSS 原始观测数据的高精度定位成为可能。然而，与传统测量型接收机相比，智能手机的 GNSS 原始观测数据质量和 GNSS 定位性能还存在差距。使用智能手机伪距单点定位时，没有相位观测值的参与，所以不需要进行模糊度固定，并且单点定位又不需要基站，因此单点定位被广泛采用。大多数智能手机只能采集单频观测数据，少数能够采集双频数据，并且双频的无电离层组合的观测噪声远比电离层延迟大^[17]。因此，本章将重点分析智能手机的单频定位。

本章首先针对智能手机的伪距观测值进行粗差剔除，并采用相位平滑伪距方法。相位平滑伪距方法能够有效地减小观测数据的噪声，提高定位精度。在进行单频的伪距单点定位时，电离层的改正显得尤为重要。由于电离层的影响会导致信号传播速度的变化，从而影响到观测数据的精度，因此需要对电离层进行有效的改正。

针对不同的电离层模型，如 GPS Klobuchar、BDS Klobuchar 和 BDGIM，对智能手机在这些模型下的伪距单点定位精度进行详细分析。通过对比不同电离层模型对定位性能的影响，可以分析这些模型对智能手机伪距单点定位的提升效果。

4.2 安卓智能手机 GNSS 伪距单点定位数学模型

使用智能手机进行伪距单点定位时，定位精度受到对流层和电离层等误差的影响。这些误差会导致信号传播路径的变化，进而影响接收到的信号时间和相位，从而影响定位结果的准确性。智能手机 GPS/BDS 双系统伪距观测方程如下式所示^[56]：

$$\begin{aligned} P_i^G &= \rho_i^G + c \cdot \tilde{dt}_P + d_{\text{trop}} + d_{\text{ion}} + \delta \\ P_j^C &= \rho_j^C + c \cdot \tilde{dt}_P + c \cdot \tilde{dt}_{\text{sys}}^c + d_{\text{trop}} + d_{\text{ion}} + \delta \end{aligned} \quad (4.1)$$

式中， d_{ion} 、 d_{trop} 分别表示电离层延迟和对流层延迟； \tilde{dt}_P 为接收机钟差；第 i 颗为 GPS 卫星；第 j 颗为 BDS 卫星；上标 G 和 C 为 GPS 和 BDS； $\tilde{dt}_{\text{sys}}^c$ 是 GPS 卫星系统和 BDS 卫星系统的时间差； δ 表示伪距噪声。在智能手机伪距单点定位中，对流层和电离层使用经验模型校正，卫星的轨道和钟差通过广播星历进行改正，其他未考虑的误差和

未被模型消掉误差被归入残差，可重写伪距观测方程。

$$\begin{aligned} P_i^G &= \rho_i^G + c \cdot d\tilde{t}_P + \delta \\ P_i^C &= \rho_i^C + c \cdot d\tilde{t}_P + c \cdot d\tilde{t}_{sys}^c + \delta \end{aligned} \quad (4.2)$$

下式表示第 i 颗卫星与智能手机之间的几何距离：

$$\rho^i = \sqrt{(X_i^s - \tilde{X}_r)^2 + (Y_i^s - \tilde{Y}_r)^2 + (Z_i^s - \tilde{Z}_r)^2} \quad (4.3)$$

式中， (X_i^s, Y_i^s, Z_i^s) 、 $(\tilde{X}_r, \tilde{Y}_r, \tilde{Z}_r)$ 分别表示卫星坐标和接收机待计算坐标。根据智能手机近似坐标计算 ρ^i 的泰勒展开：

$$\rho^i = \alpha^i \cdot \dot{x} + \beta^i \cdot \dot{y} + \gamma^i \cdot \dot{z} + \rho_0^i \quad (4.4)$$

式中， \dot{x} 、 \dot{y} 、 \dot{z} 为智能手机坐标改正数值； ρ_0^i 为智能手机坐标和卫星的大致距离； α^i 、 β^i 、 γ^i 为智能手机到卫星的方向余弦：

$$\alpha^i = -\frac{X_i^s - X_r^0}{\rho_0^i}, \beta^i = -\frac{Y_i^s - Y_r^0}{\rho_0^i}, \gamma^i = \frac{Z_i^s - Z_r^0}{\rho_0^i} \quad (4.5)$$

将上式代入公式 (4.4) 可得误差方程：

$$\begin{aligned} v^i &= \alpha^i \cdot \dot{x} + \beta^i \cdot \dot{y} + \gamma^i \cdot \dot{z} + c \cdot d\tilde{t}_P - l^i \\ v^j &= \alpha^j \cdot \dot{x} + \beta^j \cdot \dot{y} + \gamma^j \cdot \dot{z} + c \cdot d\tilde{t}_P + c \cdot d\tilde{t}_{sys}^c - l^j \end{aligned} \quad (4.6)$$

式中， v^i 是未知参数，待估参数有钟差、GPS/BDS 系统时间差和智能手机位置。此时，待估参数向量为：

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} & c \cdot d\tilde{t}_P & c \cdot d\tilde{t}_{sys}^c \end{bmatrix}^T \quad (4.7)$$

假设在一个历元内观测到 n_1 、 n_2 颗 GPS、BDS 卫星，使用最小二乘进行参数估计，则该模型的观测系数矩阵如下：

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \alpha^1 & \beta^1 & \gamma^1 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha^{n_1} & \beta^{n_1} & \gamma^{n_1} & 1 & 0 \\ \alpha^{n_1+1} & \beta^{n_1+1} & \gamma^{n_1+1} & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha^{n_1+n_2} & \beta^{n_1+n_2} & \gamma^{n_1+n_2} & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

此历元，近似值与观测值之间差值向量为：

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} P^1 - \rho_0^1 & \dots & P^{n_1} - \rho_0^{n_1} & P^{n_1+1} - \rho_0^{n_1+1} & \dots & P^{n_1+n_2} - \rho_0^{n_1+n_2} \end{bmatrix}^T \quad (4.9)$$

利用上述伪距单点定位方法能够确定智能手机的位置。但由于智能手机GNSS原始观测数据质量较差，会导致计算出的智能手机位置偏差较大，因此需要对智能手机的观测数据进行质量控制。

4.3 安卓智能手机数据质量控制

4.3.1 伪距粗差剔除

伪距粗差一般是异常的伪距观测值，与正常的伪距观测量精度差距较大，当把粗差当作观测值时，会严重影响到定位结果。伪距粗差由多方面原因导致，比如：大气延迟和多路径效应等。粗差探测主要是对比每个卫星的伪距观测值与其他卫星的观测值的差距，检测和剔除异常的伪距观测值。研究智能手机高精度定位，必须对智能手机采集的伪距观测值进行伪距粗差剔除，以确保定位结果的准确性和可靠性。

C_1 、 P_1 、 P_2 为伪距观测值，则如下式所示：

$$\begin{aligned} DCB_{C_1R_1} &= C_1 - P_1 = DCB_{s-C_1R_1} + DCB_{r-C_1R_2} + \Delta_{C_1R_1} + \varsigma \\ DCB_{R_1R_2} &= P_1 - P_2 = DCB_{s-R_1R_1} + DCB_{r-R_1R_2} + \Delta_{R_1R_2} + I + \vartheta \end{aligned} \quad (4.10)$$

其中， Δ 表示码偏差变化量； $DCB_{s-C_1R_1}$ 和 $DCB_{r-C_1R_2}$ 为卫星端码偏差； $DCB_{s-R_1R_1}$ 和 $DCB_{r-R_1R_2}$ 为接收机端的码偏差； ϑ 为观测值噪声； ς 为多路径误差； I 表示电离层延迟。伪距粗差的探测的条件：

(1) 当伪距观测值中不存在较大粗差：

$$|DCB_{C_1R_1}| \leq \eta_1 \text{ 且 } |DCB_{R_1R_2}| \leq \eta_2 \quad (4.11)$$

(2) 当伪距观测值中存在大粗差：

$$|DCB_{C_1R_1}| > \eta_1 \text{ 且 } |DCB_{R_1R_2}| > \eta_2 \quad (4.12)$$

$\eta_2 > \eta_1$ ， η_2 、 η_1 为阈值，取值 $\eta_1 = 30\text{m}$ ， $\eta_2 = 60\text{m}$ ^[57]。

数据预处理是实现智能手机高精度定位的关键步骤之一。当智能手机的伪距观测值中存在较大粗差时，需要采用粗差探测技术对伪距观测值进行粗差剔除。这可以有效的剔除伪距观测值中的异常值，提高数据质量，保证定位结果的准确性。但对于较小的粗差，通常可以通过在后续数据处理阶段利用卡尔曼滤波进行校正。卡尔曼滤波能有效减弱观测数据中的噪声，从而改善最终定位结果。

4.3.2 移动开窗载波平滑伪距

对流层延迟、卫星和接收机钟差对伪距和相位观测量影响基本相同, 因此可以忽略, 同时多路径效应在多历元平均后也可忽略, k 历元时的伪距和相位观测方程表示为^[58]:

$$\begin{cases} L_k = \rho_k - I_k - N + \varepsilon_L, \\ P_k = \rho_k + I_k + \varepsilon_P \end{cases} \quad (4.13)$$

式中, P 为伪距观测值; L 为相位观测值; ρ 为接收机和卫星之间距离; N 表示模糊度参数; I 为电离层延迟; ε 为观测噪声。

将上式中两方程相减, 并将观测噪声吸收在观测量中, 得:

$$P_k - L_k = 2I_k + N \quad (4.14)$$

指定滑动窗口为 n 个历元, 令起始历元为 $j = k - n + 1$, 当 $k < n$ 时, $j=1$, 窗口内电离层延迟均值为 \bar{I}_k , 令

$$A_{k,j} = 2\bar{I}_k + N \quad (4.15)$$

则有:

$$\begin{cases} A_{k,j} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (P_i - L_i), & k < n \\ A_{k,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=k-n+1}^k (P_i - L_i), & k \geq n \end{cases} \quad (4.16)$$

由式 (4.14) 和式 (4.16) 可得基于最近滑动窗口模型的平滑伪距 $\bar{P}_{k,k-n+1}$, 这里仍然以 \bar{P}_k 表示:

$$\bar{P}_k = L_k + A_{k,j} \quad (4.17)$$

由上式将相邻历元相减, 得到基于滑动窗口的载波平滑伪距的递推公式:

$$\begin{cases} \bar{P}_k = \frac{1}{k} P_k + \left(1 - \frac{1}{k}\right) (\bar{P}_{k-1} + L_k - L_{k-1}), & k \leq n \\ \bar{P}_k = \bar{P}_{k-1} + (L_k - L_{k-1}) + \frac{1}{n} [(P_k - L_k) - (P_{k-n} - L_{k-n})], & k > n \end{cases} \quad (4.18)$$

当设置参数 $n=k$ 时, 移动开窗载波相位平滑伪距模型与常规的载波相位平滑伪距模型一致。常规的相位平滑伪距模型假设历元内的电离层延迟是常量, 但当电离层延迟发生较大变化时, 误差会积累超过伪距噪声, 从而降低定位精度。为考虑电离层延迟的影响, 通常将 Hatch 滤波设置为一个常数或历元窗口大小 m , 并称之为加权 Hatch 滤波:

$$\bar{P}_k = \frac{1}{m} P_k + \left(1 - \frac{1}{m}\right) (\bar{P}_{k-1} + L_k - L_{k-1}) \quad (4.19)$$

尽管移动窗口滤波公式在一定程度上减轻了历元积累的电离层延迟影响, 但初始的电离层延迟影响依然存在。随着不断引入新的历元观测数据并剔除超出移动窗口范围的数据, 同时清除了平滑窗口外的电离层延迟误差, 使得电离层延迟变化所带来的平滑伪距的系统偏差逐渐减弱。这一过程有助于提高定位精度, 尤其是在电离层延迟变化较大的情况下, 能够有效地减少定位误差。这种处理方式有效地提高了定位系统对电离层延迟变化的适应能力, 进而增强了定位精度的稳定性和准确性。因此, 在实际应用中, 采用移动窗口滤波方法对于处理电离层延迟误差具有重要意义, 能够有效地改善定位性能。

4.3.3 电离层延迟对移动开窗载波平滑伪距的影响

考虑电离层的变化, 使起始历元的电离层为 I_1 , 根据式 (4.16), 令窗口大小为 n , 有^[58]:

$$\sum_{i=j}^k (P_i - L_i) = (2I_1 + N) + 2 \sum_{i=j}^k \Delta I_{i,1} \quad (4.20)$$

式中, $\Delta I_{i,1} = I_i - I_1$, 为历元 i 与历元 1 电离层延迟之差, 起始历元为 $j = k - n + 1$ 。由电离层模型计算出电离层延迟大小, 再通过历元间作差得到电离层变化 $\Delta I_{i,1}$, 令指定历元数量为 n , 则可以计算出:

$$A_{k,j} = 2I_1 + N = \frac{1}{n} \sum_{i=j}^k (P_i - L_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=j}^k 2\Delta I_{i,1} \quad (4.21)$$

由上式和式 (4.16), 可得具有电离层延迟变化改正的平滑伪距:

$$\bar{P}_k = A_{k,j} + (L_k + 2\Delta I_{k,1}) \quad (4.22)$$

对比式 (4.17), 相当于 L_k 被 $L_k + 2\Delta I_{k,1}$ 代替了, 可得考虑电离层延迟的移动开窗平滑伪距递推公式:

$$\begin{cases} \bar{P}_k = \frac{1}{k} P_k + \left(1 - \frac{1}{k}\right) (\bar{P}_{k-1} + L_k - L_{k-1} + 2\Delta I_{k,k-1}), & k \leq n \\ \bar{P}_k = \bar{P}_{k-1} + (L_k - L_{k-1}) + 2\Delta I_{k,k-1} + \frac{1}{n} [(P_k - L_k) - (P_{k-n} - L_{k-n}) - 2\Delta I_{k,k-n}], & k > n \end{cases} \quad (4.23)$$

对智能手机小米 8 和华为 P40 采用上述载波相位平滑伪距和伪距单点定位算法, 分析相位平滑伪距对智能手机小米 8 和华为 P40 的定位性能。本节对智能手机小米 8 的伪距单点定位中进行相位平滑伪距, 平滑窗口时间设置为 20s, 具体结果如下图所示:

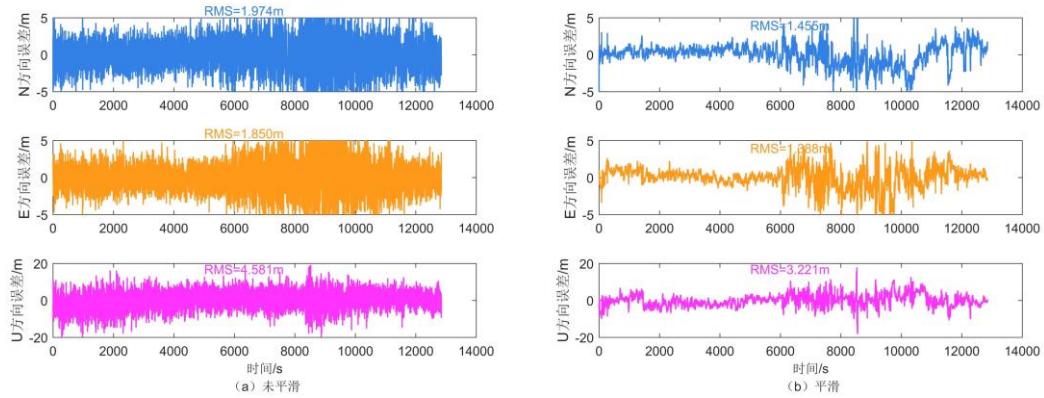


图 4.1 智能手机小米 8 未平滑伪距和平滑伪距定位误差序列

由上图结果可知, 移动开窗相位平滑伪距是一种有效的技术, 可以显著减少伪距观测值中的噪声, 从而提高定位精度。智能手机小米 8 未使用相位平滑伪距时 N、E、U 三个方向的均方根值分别为 1.974m、1.85m、4.581m, 使用相位平滑伪距时 N、E、U 三个方向的均方根值分别为 1.455m、1.388m、3.221m, 在 N、E、U 三个方向的定位精度分别提升 26.3%、25%、29.7%。

下面是对智能手机华为 P40 的伪距单点定位中进行相位平滑伪距, 平滑窗口时间设置为 20s, 具体结果如下图所示:

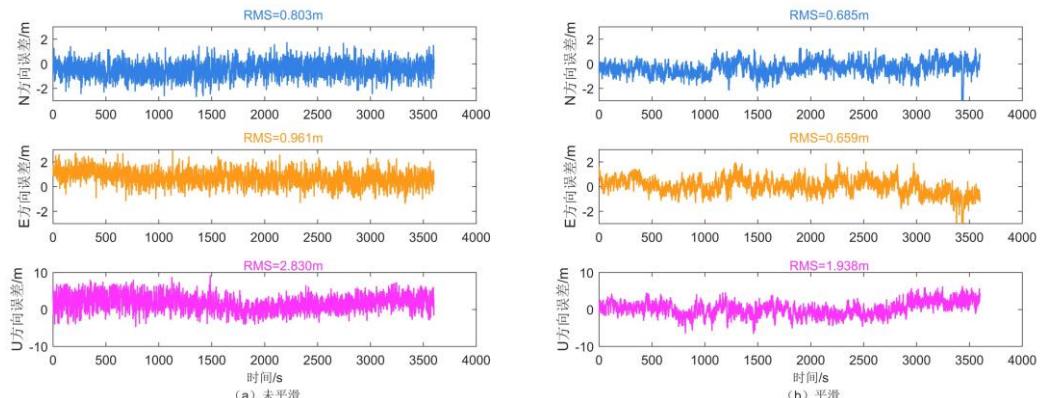


图 4.2 智能手机华为 P40 未平滑伪距和平滑伪距定位误差序列

由上图结果可知, 华为 P40 未使用相位平滑伪距时 N、E、U 三个方向的均方根值

分别为 0.803m、0.961m、2.830m，使用相位平滑伪距时 N、E、U 三个方向的均方根值分别为 0.685m、0.659m、1.938m，在 N、E、U 三个方向定位精度分别提升 14.7%、31.4%、31.5%。

首先相位平滑伪距可以有效减少伪距观测值中的噪声，有效提高智能手机的定位精度。其次，相位平滑伪距能够有效抑制多路径效应和信号衰减，增强信号的稳定性和可靠性。

4.4 不同电离层模型对安卓智能手机伪距单点定位精度影响分析

电离层延迟是影响 GNSS 定位精度的重要因素之一，特别是在单频用户的情况下。各个卫星导航系统都通过其广播信号传输电离层延迟参数，以便用户进行修正。然而，不同的卫星导航系统可能采用不同的电离层延迟模型，因此在进行定位时需要考虑这些系统之间的差异。例如，GPS 系统使用 Klobuchar 模型来计算电离层延迟，GLONASS 系统采用扩展的 Klobuchar 模型，而 Galileo 系统使用了 NeQuick 模型。此外，北斗系统还提供了其特定的电离层延迟模型。因此，用户在进行 GNSS 定位时需要根据所使用的导航系统选择相应的电离层延迟改正模型，以确保定位精度和准确性。

4.4.1 GPS Klobuchar 电离层模型

1987 年，Klobuchar 提出了 GPS Klobuchar 模型，被广泛认为是计算电离层延迟改正的一种简便而可靠的模型。研究表明，该模型适用于中纬度地区，如美国、欧洲和中国等地区^[59]。这是因为中纬度地区的电离层电子浓度变化相对平缓，受电子的物理特性影响较大。GPS 卫星导航系统的广播星历中包含预报的电离层参数，可用于校正电离层延迟影响^[60]。该模型基于经验算法构建，可修正全球约 50% 的电离层延迟误差。模型假设电子主要集中在电离层薄层上，因此将薄层处的总电子含量转换为垂直电子含量，并应用电离层投影函数进行校正^[61]。

GPS Klobuchar 是在地磁坐标系下通过三角余弦函数建立的，其参数即考虑了纬度差异，又考虑了电离层周日振幅和周期变化，但此模型认为夜间的电离层延迟为 5ns，又默认当地两点的电离层延迟最大。此模型存在缺陷，它没有考虑周日电离层的实际变化，并且给单频用户使用时，又认为电离层是平稳介质。GPS Klobuchar 电离层模型 8 个系数是从 370 组常数中选择的，这些常数是根据地面系统该天前五天及一年中第几天

的太阳平均辐射量计算的，然后通过广播星历播发给用户，每天更新一次^[62]。

GPS K8 电离层模型算法需要的参数有卫星的高度角 E 和方位角 A 、测站的地理经纬度 λ 、 φ 以及广播星历播发的 8 个参数 α_i 和 β_i ， $i=1,2,3,4$ 。对智能手机单频用户，利用 GPS K8 模型计算电离层延迟的详细步骤如下^[63]：

(1) 计算接收机与穿刺点 (ionospheric pierce point, IPP) 之间的地球弧度角 (ψ)。

$$\psi = \frac{0.0137}{E + 0.11} - 0.022 \text{ (弧度)} \quad (4.24)$$

(2) 确定 IPP 下方星点位置的纬度 (φ_{IPP})。

$$\varphi_{IPP} = \varphi + \psi \cos A \text{ (弧度)} \quad (4.25)$$

如果 $\varphi_{IPP} > +0.416$ ，则 $\varphi_{IPP} = +0.416$ 。如果 $\varphi_{IPP} < -0.416$ ，则 $\varphi_{IPP} = -0.416$ 。

(3) 计算 IPP 星下点位置的经度 (λ_{IPP})。

$$\lambda_{IPP} = \lambda + \frac{\psi \sin A}{\cos \varphi_{IPP}} \text{ (弧度)} \quad (4.26)$$

(4) 计算 IPP 星下点位置的地磁纬度。

$$\phi_{IPP} = \varphi_{IPP} + 0.064 \cos(\lambda_{IPP} - 1.617) \text{ (弧度)} \quad (4.27)$$

(5) 计算 IPP 星下点位置的当地时间。

$$t = 43200 \lambda_{IPP} + t_{GPS} \text{ (秒)} \quad (4.28)$$

如果 $t > 86400$ ，则 $t = t - 86400$ ；如果 $t < 0$ ，则 $t = t + 86400$ 。

(6) 计算电离层余弦函数的振幅的数值。

$$A_{IPP} = \sum_{n=0}^3 \alpha_n \phi_{IPP}^n \text{ (秒)} \quad (4.29)$$

如果 $A_{IPP} < 0$ ，则 $A_{IPP} = 0$ 。

(7) 计算电离层余弦函数的周期性参数。

$$P_{IPP} = \sum_{n=0}^3 \beta_n \phi_{IPP}^n \text{ (秒)} \quad (4.30)$$

如果 $P_{IPP} < 72000$ ，则 $P_{IPP} = 72000$ 。

(8) 计算电离层余弦函数的相位角。

$$X_{IPP} = \frac{2\pi(t-50400)}{P_{IPP}} \text{ (弧度)} \quad (4.31)$$

(9) 计算斜率参数。

$$F = 1.0 + 16.0(0.53 - E)^3 \quad (4.32)$$

(10) 估算电离层的时间延迟。

$$I_{IPP_{IEC}} = \begin{cases} F \cdot [5 \cdot 10^{-9} + A_{IPP} \cos X_{IPP}] & |X_{IPP}| \leq 1.57 \\ F \cdot 5 \cdot 10^{-9} & |X_{IPP}| \geq 1.57 \end{cases} \quad (4.33)$$

式中, $I_{IPP_{IEC}}$ 表示为 GPS k8 模型计算 GPS B1I 频点在传播路径方向的电离层延迟。

此外, 由于卫星发射的信号受电离层延迟与信号频率的平方成反比, 即:

$$I_{TEC} = \frac{k}{f^2} \quad (4.34)$$

式中, K 表示相关系数, f 表示对应频点的频率。

因此, 其他的 GPS 频点的电离层延迟可以通过 GPS L1 频点的电离层延迟量表示, 具体如下式所示:

$$I_{\text{其它}TEC} = \left(\frac{f_{GPS_{L1}}^2}{f_{\text{其它}}^2} \right) I_{GPS_{L1}} \quad (4.35)$$

4.4.2 BDS Klobuchar 电离层模型

BDS K8 是在 GPS K8 的基础上优化的, 是根据国内 GNSS 双频数据计算的。在中国区域, 已有多位学者证明 BDS K8 电离层模型比 GPS K8 电离层模型性能更好^[64]。为了更好使地理经纬度和时间统一, BDS K8 电离层模型采用日固地理坐标系。另外需要注意的是, BDS K8 与 GPS K8 电离层模型在电离层高度和地球半径是不同的。BDS K8 电离层参数每两小时更新一次, 8 个参数是由中国区域的数据计算的^[64]。

智能手机单频用户利用 BDS K8 电离层模型的计算步骤是根据北斗空间信号接口控制文件, 具体步骤如下^[65]:

(1) 计算接收机与 IPP 之间的地心张角 (ψ)。(弧度)

$$\psi = \frac{\pi}{2} - E - \arcsin\left(\frac{R}{R+h} \cdot \cos E\right) \quad (4.36)$$

其中, $R = 6378km$, 是地球半径; $h = 375km$, 是电离层单层高度; E 表示卫星高

度角 E ，单位为弧度。

(2) 计算穿刺点位置的地理纬度 (φ_{IPP})。(弧度)

$$\varphi_{IPP} = \arcsin(\sin \varphi \cdot \cos \psi + \cos \varphi \cdot \sin \psi \cdot \cos A) \quad (4.37)$$

式中， φ 为地理纬度。

(3) 计算穿刺点位置的地理经度 (λ_{IPP})。(弧度)

$$\lambda_{IPP} = \lambda + \arcsin\left(\frac{\sin \psi \cdot \sin A}{\cos \varphi_{IPP}}\right) \quad (4.38)$$

式中， λ 为地理经度。

(4) 计算 IPP 位置的本地时间 (t)。(秒)

$$t = \frac{\lambda_{IPP}}{15} + UT \quad (4.39)$$

式中，UT (universal time) 表示世界时；如果 $t > 86400$ ，则 $t = t - 86400$ ；如果 $t < 0$ ，则 $t = t + 86400$ 。

(5) 计算电离层余弦函数的振幅的数值 (A_{IPP})。

$$A_{IPP} = \sum_{n=0}^3 \alpha_n |\varphi_{IPP}|^n \quad (4.40)$$

如果 $A_{IPP} < 0$ ，则 $A_{IPP} = 0$ 。

(6) 计算电离层余弦函数的周期性参数 (P_{IPP})。

$$P_{IPP} = \sum_{n=0}^3 \beta_n |\varphi_{IPP}|^n \quad (4.41)$$

如果 $P_{IPP} > 172800$ ，则 $P_{IPP} = 172800$ 。如果 $P_{IPP} < 7200$ ，则 $P_{IPP} = 7200$ 。

(7) 计算电离层余弦函数的相位角 (X_{IPP})。

$$X_{IPP} = \frac{2\pi(t - 50400)}{P_{IPP}} \quad (4.42)$$

(8) 计算斜率参数 (F)。

$$F = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+h} \cdot \cos E\right)}} \quad (4.43)$$

(9) 估算电离层的时间延迟 ($I_{IPP_{TEC}}$)。(秒)

$$I_{IPP_{IEC}} = \begin{cases} F \cdot [5 \cdot 10^{-9} + A_{IPP} \cos X_{IPP}] & |X_{IPP}| \leq 1.57 \\ F \cdot 5 \cdot 10^{-9} & |X_{IPP}| \geq 1.57 \end{cases} \quad (4.44)$$

式中, $I_{IPP_{IEC}}$ 表示为 BDS K8 模型计算 BDS B1I 频点在传播路径方向的电离层延迟。

因此, 其他的 BDS 频点的电离层延迟可以通过 BDS B1I 频点的电离层延迟量表示, 具体公式参考 (4.35)。

4.4.3 BDGIM 电离层模型

北斗三号全球卫星导航系统使用 BDGIM 电离层模型, 是一种基于球谐函数的全球电离层时延修正模型。

在 2012 年李子申首次提出 BDGIM 电离层模型, 此模型一共通过广播星历播发九个参数, 还需要的输入参数有智能手机实验位置、卫星位置和北斗导航系统发布的非播发电离层参数共同去计算电离层改正值。BDGIM 电离层模型一次更新 12 组参数, 每天更新一次, 每组参数两小时更新一次^[66]。

智能手机单频用户使用 BDGIM 模型计算电离层改正值的步骤如下^[66]:

(1) 计算接收机在日固地磁坐标系下穿刺点 IPP 位置处的经纬度:

在地固坐标系下, 接收机穿刺点地磁经纬度的计算公式为:

$$\begin{cases} \varphi_m = \arcsin \left(\sin \varphi_M \cdot \sin \varphi_g + \cos \varphi_M \cdot \cos \varphi_g \cdot \cos(\lambda_g - \lambda_M) \right) \\ \lambda_m = \arctan \left(\frac{\cos \varphi_g \cdot \sin(\lambda_g - \lambda_M) \cdot \cos \varphi_M}{\sin \varphi_M \cdot \sin \varphi_m - \sin \varphi_g} \right) \end{cases} \quad (4.45)$$

式中, φ_M 、 λ_M 分别表示地磁北极地理纬度和地理经度, φ_g 、 λ_g 表示用户地理经纬度。

在日固坐标系下, 接收机穿刺点地磁经纬度的计算公式为

$$\begin{cases} \varphi' = \varphi_m \\ \lambda' = \lambda_m - \arctan \left[\frac{\sin(S_{ion} - \lambda_M)}{\sin \varphi_M \cdot \cos(S_{ion} - \lambda_M)} \right] \end{cases} \quad (4.46)$$

式中, S_{ion} 表示平太阳地理经度, $S_{ion} = \pi \cdot (1 - 2 \cdot (t - \text{int}(t)))$, t 是简化儒略日, $\text{int}(\cdot)$ 为向下取整。

(2) 计算 BDGIM 电离层模型的预报值 A_0 :

$$A_0 = \sum_{j=1}^{17} \beta_j \cdot B_j \quad (4.47)$$

$$B_j = \begin{cases} \tilde{P}_{|n_j, l, |m_j|}(\sin \varphi') \cdot \cos(m_j \cdot \lambda'), & m_j \geq 0 \\ \tilde{P}_{n_j, l, m_j}(\sin \varphi') \cdot \sin(-m_j \cdot \lambda'), & m_j < 0 \end{cases} \quad (4.48)$$

式中, BDGIM 电离层模型的预报系数为 B_j , B_j 球谐函数阶次分别为 n_j 和 m_j , φ' 和 λ' 分别为穿刺点在日固地磁坐标系下的纬度和经度, $\tilde{P}_{|n_j, l, |m_j|}$ 表示为归化后的勒让德函数:

BDGIM 电离层模型预报系数 β_j 可以由非发播参数计算生成(Office, 2018):

$$\begin{cases} \beta_j = \sum_{k=0}^{12} (a_{k,j} \cdot \cos \omega_k t_k + b_{k,j} \cdot \sin \omega_k t_k) \\ \omega_k = \frac{2\pi}{T_k} \end{cases} \quad (4.49)$$

式中, T_k 是预报参数的第 k 个周期; t_k 是预报时刻; $a_{k,j}$ 和 $b_{k,j}$ 分别表示为非播发参数, 具体参数由北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件可知。

(3) 根据智能手机用户穿刺点的经纬度及观测时间, 计算得到 BDGIM 电离层模型的预报函数 A_i ($A_1 \sim A_9$):

$$A_i = \begin{cases} \tilde{P}_{|n_i, l, |m_i|}(\sin \varphi') \cdot \cos(m_i \lambda'), & m_i \geq 0 \\ \tilde{P}_{|n_i, l, |m_i|}(\sin \varphi') \cdot \sin(-m_i \lambda'), & m_i \leq 0 \end{cases} \quad (4.50)$$

$$\begin{cases} n_i = 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ m_i = 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 2 & -2 \end{cases}$$

式中, $i = 1 \sim 9$, 其他参数含义同式 (4.48)。

(4) 计算电离层投影函数 MF:

$$MF = \frac{1}{\cos(z)} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{R_e}{R_e + h} \sin(z') \right]^2}} \quad (4.51)$$

式中, MF 表示投影函数; z 、 z' 分别表示卫星相对于穿刺点的天顶距和卫星相对于测站的天顶距; R_e 表示地球半径; h 表示电离层薄层, 即电子密度最大处的高度。

(5) 计算用户穿刺点处 VTEC (单位 VTEC):

$$I_z(t) = A_0 + \sum_{i=1}^9 \alpha_i A_i \quad (4.52)$$

依据非播发参数、用户位置和时间计算出电离层延迟预报值 A_0 、 $A_i \sim A_9$ ， $I_z(t)$ 表示穿刺点处 VTEC。

(6) 计算卫星信号传播方向的电离层延迟 (单位 m)：

$$I_s(t) = MF \cdot \frac{40.28 \times 10^{16}}{f^2} \cdot I_z(t) \quad (4.53)$$

式中， $I_s(t)$ 表示卫星信号传播方向的电离层延迟改正值；MF、f 分别表示投影函数和信号对应的频率。

4.4.4 广播电离层模型精度分析

在本节研究中，我们选取了智能手机小米 8 和华为 P40 作为研究对象，进行了两次实验。第一次实验地点位于中国科学院上海天文台佘山科技园 3 号楼楼顶，实验时间为 2023 年 4 月 22 日。在此次试验中，小米 8 的采集时长约为三个半小时，而华为 P40 的采集时长约为四个半小时，采样间隔设置为 1 秒。第二次试验地点位于上海市徐汇滨江大道附近，实验时间为 2023 年 12 月 26 日。在这次实验中，小米 8 的采集时长约为 2 小时，而华为 P40 的采集时长约为 4 小时，同样采样间隔设置为 1 秒。两次实验的现场情况分别如图 4.3 和图 4.4 所示。

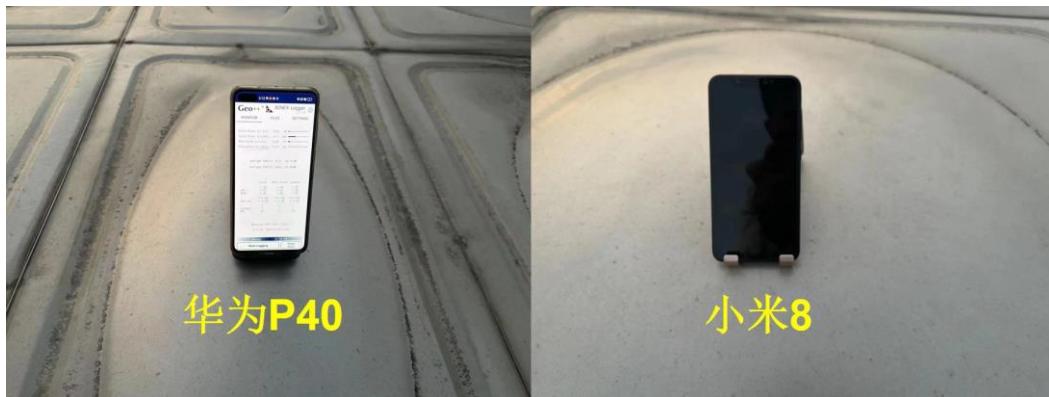


图 4.3 中国科学院上海天文台佘山科技园 3 号楼顶实验的华为 P40 和小米 8



图 4.4 上海市徐汇滨江大道实验的华为 P40 和小米 8

为评估智能手机小米 8 和华为 P40 在不同电离层模型下的定位精度,两次实验中小米 8 和华为 P40 的参考坐标均事先用华测 B5 接收机 RTK 固定解标定。

利用上述数据,我们计算了智能手机小米 8 和华为 P40 在 GPS K8、BDS K8 和 BDGIM 三种电离层模型下的伪距单点定位精度。下图给出了智能手机小米 8 和华为 P40 在不同电离层模型下的定位误差序列。

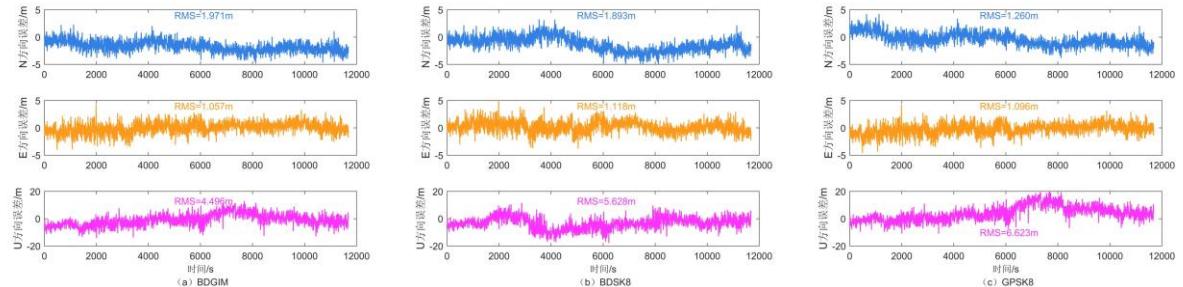


图 4.5 2023 年 4 月 22 号智能手机小米 8 在不同电离层模型下的定位误差序列

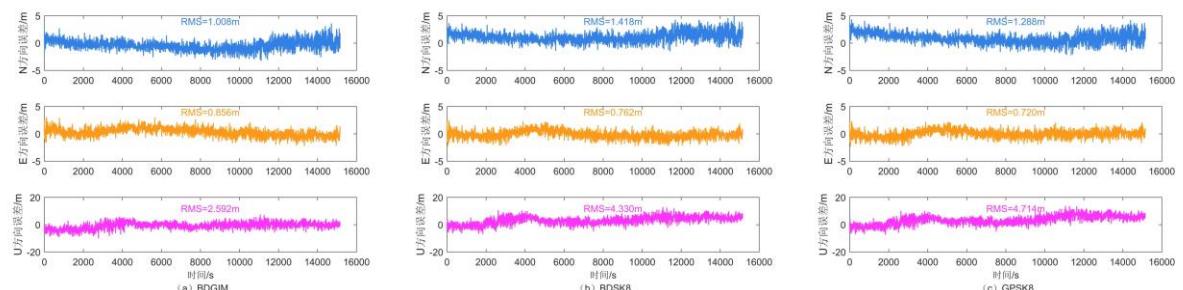


图 4.6 2023 年 4 月 22 号智能手机华为 P40 在不同电离层模型下的定位误差序列

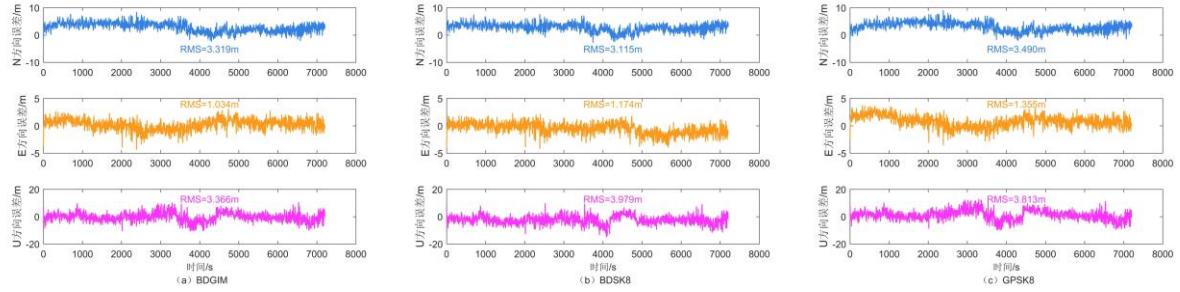


图 4.7 2023 年 12 月 26 号智能手机小米 8 在不同电离层模型下的定位误差序列

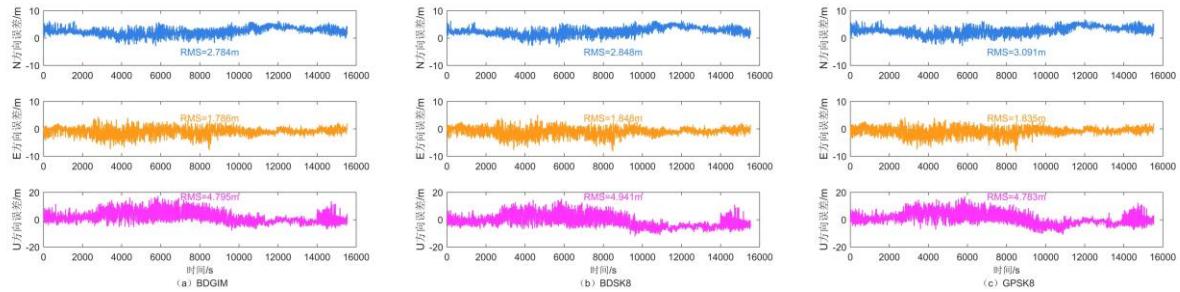


图 4.8 2023 年 12 月 26 号智能手机华为 P40 在不同电离层模型下的定位误差序列

将上面定位结果 RMS 值进行统计，如下表所示：

表 4.1 统计实验结果 RMS 值 (单位: m)

手机型号	三维方向	2023 年 4 月 22 日			2023 年 12 月 26 日		
		BDGIM	BDS K8	GPS K8	BDGIM	BDS K8	GPS K8
小米 8	N	1.971	1.893	1.26	3.319	3.115	3.49
	E	1.057	1.118	1.096	1.034	1.174	1.355
	U	4.496	5.628	6.623	3.366	3.979	3.813
华为 P40	N	1.008	1.418	1.228	2.784	2.848	3.091
	E	0.856	0.762	0.72	1.786	1.848	1.835
	U	2.592	4.33	4.714	4.795	4.941	4.783

根据以上统计结果，在两次实验中，小米 8 和华为 P40 采用 BDGIM 电离层模型的高程方向定位精度均优于 BDS K8 和 GPS K8 模型。考虑到高程方向定位精度更依赖于电离层延迟的校正，因此这一结果表明了北斗全球电离层模型相较于其他两种模型更为优越。在两次实验中，小米 8 和华为 P40 采用 BDGIM 模型的三维方向整体定位精度均

优于 BDS K8 模型，而后者又优于 GPS K8 模型。这一结论与先前学者对于在中国区域使用测量型接收机时对不同电离层模型的分析结果一致^[67]。在上海附近，我们又选取了与智能手机采集数据相同时间段的三个观测站数据，包括武汉的 WHU2、台湾的 TWTF 和朝鲜的 GAMG 三个观测站。通过进一步的实验验证了以上的结论。下图给出了智能手机小米 8、华为 P40 以及观测站 WHU2、TWTF 和 GAMG 在三种电离层模型下的水平误差和高程误差。

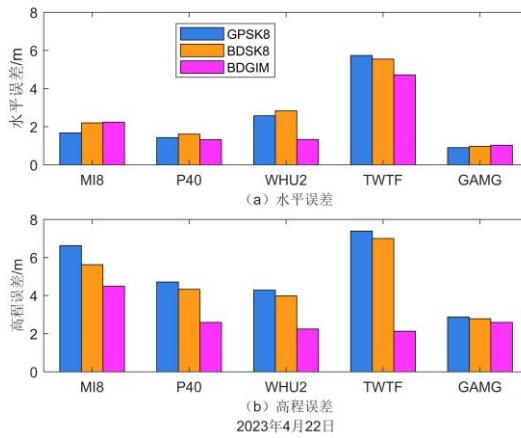


图 4.9 智能手机和观测站 2023 年 4 月 22 日在不同电离层模型下的水平误差和高程误差

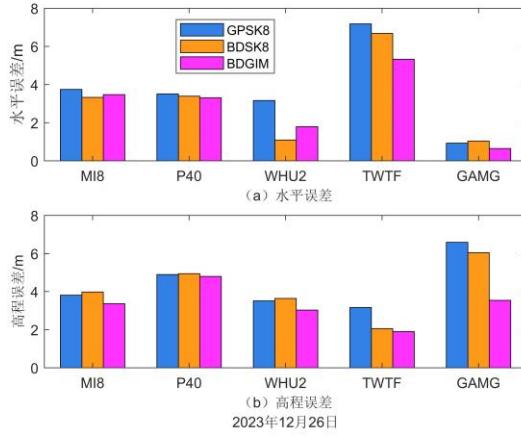


图 4.10 智能手机和观测站 2023 年 12 月 26 日在不同电离层模型下的水平误差和高程误差

根据柱状图 4.9 和 4.10 的结果，可以清晰地看出，在采用 BDGIM 电离层模型时，智能手机小米 8、华为 P40 以及观测站 WHU2、TWTF 和 GAMG 的高程误差均最小。智能手机小米 8、华为 P40 以及观测站 WHU2、TWTF 和 GAMG 的三维方向整体定位精度均优于 BDS K8 模型，而后者又优于 GPS K8 模型。观测站 WHU2、TWTF 和 GAMG

在不同电离层模型下的结论与智能手机的结论一致。

综上，智能手机伪距单点定位时采用 BDGIM 电离层模型在定位精度方面表现更为优异，尤其在高程误差方面具有显著优势。这表明 BDGIM 模型能够更准确地校正电离层延迟对定位结果的影响，从而提高了定位精度。智能手机小米 8、华为 P40 以及观测站 WHU2、TWTF 和 GAMG 的定位精度高都得益于 BDGIM 模型的采用，进一步证明了其在实际定位应用中的有效性。

4.5 本章小结

本章首先介绍了伪距单点定位原理、伪距粗差剔除、移动开窗平滑伪距和考虑了电离层延迟移动开窗平滑伪距。最后分析智能手机小米 8、华为 P40 以及观测站 WHU2、TWTF 和 GAMG 在不同电离层下的定位精度。实验结果表明：

(1) 考虑电离层延迟移动开窗平滑伪距，大大降低了伪距噪声，智能手机小米 8 在 N、E、U 三个方向分别提升 26.3%、25%、29.7%，华为 P40 在 N、E、U 三个方向分别提升 14.7%、31.4%、31.5%。

(2) 2023 年 4 月 22 日实验中，智能手机小米 8 采用 BDGIM 模型相比于 GPS K8 模型，三维方向整体提升 16.2%；华为 P40 采用 BDGIM 模型相比于 GPS K8 模型，三维方向整体提升 33.1%；智能手机小米 8 采用 BDS K8 模型相比于 GPS K8 模型，三维方向整体提升 3.8%；华为 P40 采用 BDS K8 模型相比于 GPS K8 模型，三维方向整体提升 2.3%。

(3) 2023 年 12 月 26 日实验中，智能手机小米 8 采用 BDGIM 模型相比于 GPS K8 模型，三维方向整体提升 10.8%；华为 P40 采用 BDGIM 模型相比于 GPS K8 模型，三维方向整体提升 3.5%；智能手机小米 8 采用 BDS K8 模型相比于 GPS K8 模型，三维方向整体提升 4.5%。

(4) 观测站 WHU2、TWTF 和 GAMG 在不同电离层模型下的结论与智能手机的结论一致。

第 5 章 基站载噪比联合卫星系统综合定权的智能手机 RTK 定位

5.1 概述

尽管伪距单点定位是一种简便快速地定位方法，但其精度受到多种因素的限制，难以满足手机高精度定位的需求。特别是在需要更高精度的场景下，仅仅使用伪距单点定位通常无法达到理想的精度水平。因此，差分定位技术中的 RTK 定位技术应运而生。RTK 技术通过利用基准站和流动站之间的载波相位观测量，利用其空间相关性来进行精确定位，从而显著提高定位精度。在智能手机高精度定位领域，RTK 定位技术的引入为解决伪距单点定位精度不足的问题提供了有效的解决方案。

RTK 定位技术利用参考站和流动站之间观测误差的空间相关性，通过站间单差可以消掉卫星端的误差，星间单差可以消掉接收机端误差，当基准站和流动站较近时，可以通过双差把对流层和电离层消掉，因而大幅提升了定位精度。相对于传统的伪距单点定位，RTK 定位能够实现分米甚至厘米级别的高精度定位，更为适用于手机高精度定位场景。其基本原理是通过测量基准站和流动站之间的载波相位观测值，根据它们之间的空间相关性来消除误差，从而实现更精准的位置确定。在实际应用中，RTK 定位技术已经成为一种被广泛采用的高精度定位方案，为各种应用场景提供了更可靠的定位服务。

本章主要关注安卓智能手机 GNSS 观测值在 RTK 定位中的性能。我们将收集和处理智能手机 GNSS 原始观测数据，并提出适用于安卓智能手机 RTK 定位的随机模型。随后，我们将对该模型与传统随机模型进行比较分析，以评估安卓智能手机在不同环境条件下的 RTK 定位性能。

5.2 安卓智能手机 GNSS 单频 RTK 数学模型

在 RTK 定位中，基线矢量的准确标定是至关重要的，因为它涉及了两个站点之间的距离和方向。因此，需要提前准确标定基准站的坐标，以便进行流动站位置的估计。RTK 定位通常采用单差和双差技术，其中双差技术能够有效消除卫星信号和接收机钟差的影响，从而实现厘米级定位精度。

假设智能手机端 r 和参考站 b 同时观测同一颗卫星 j ，将两个站对卫星的观测量作站间单差，站间单差的观测方程为^[68]：

$$\begin{cases} \nabla P_{rb,i}^j = \nabla \rho_{rb,i}^j - c \cdot \nabla t_{rb} + \nabla I_{rb,i}^j + \nabla T_{rb}^j + \varepsilon_{P_{rb,i}^j} \\ \nabla \varphi_{rb,i}^j = \nabla \rho_{rb,i}^j - c \cdot \nabla t_{rb} - \nabla I_{rb,i}^j + \nabla T_{rb}^j + \lambda_i \cdot \nabla \alpha_{rb,i}^j + \varepsilon_{\varphi_{rb,i}^j} \end{cases} \quad (5.1)$$

其中, ∇ 为单差算子; 下标 i 表示频率; $\varphi_{rb,i}^j$ 表示以米为单位的载波相位观测值; $P_{rb,i}^j$ 表示伪距观测量; $\rho_{rb,i}^j$ 表示卫地距; $\alpha_{rb,i}^j$ 表示整周模糊度; $I_{rb,i}^j$ 表示电离层误差; T_{rb}^j 表示对流层误差; t_{rb} 表示接收机钟差; $\varepsilon_{P_{rb,i}^j}$ 表示伪距噪声; $\varepsilon_{\varphi_{rb,i}^j}$ 表示相位噪声; λ_i 为频率 i 上的波长; c 表示光速。从上式可以看出, 站间单差可以消除卫星端的误差项。

在站间单差的基础上, 智能手机端 r 和参考站 b 同时观测卫星 j 和 k , 在两颗卫星之间作星间单差, 星间单差的观测方程为:

$$\begin{cases} \nabla \Delta P_{rb,i}^{jk} = \nabla \Delta \rho_{rb,i}^{jk} + \nabla \Delta I_{rb,i}^{jk} + \nabla \Delta T_{rb}^{jk} + \varepsilon_{P_{rb,i}^{jk}} \\ \nabla \Delta \varphi_{rb,i}^{jk} = \nabla \Delta \rho_{rb,i}^{jk} - \nabla \Delta I_{rb,i}^{jk} + \nabla \Delta T_{rb}^{jk} + \lambda_i \cdot \nabla \Delta \alpha_{rb,i}^{jk} + \varepsilon_{\varphi_{rb,i}^{jk}} \end{cases} \quad (5.2)$$

其中, $\Delta \nabla$ 为双差算子, 上式可以看出星间单差可以消除接收机端的误差。当智能手机端 r 和参考站 b 距离较近时, 双差对流层和双差电离层也可忽略不计, 故上式可改写为:

$$\begin{cases} \nabla \Delta P_{rb,i}^{jk} = \nabla \Delta \rho_{rb,i}^{jk} + \varepsilon_{P_{rb,i}^{jk}} \\ \nabla \Delta \varphi_{rb,i}^{jk} = \nabla \Delta \rho_{rb,i}^{jk} + \lambda_i \cdot \nabla \Delta \alpha_{rb,i}^{jk} + \varepsilon_{\varphi_{rb,i}^{jk}} \end{cases} \quad (5.3)$$

由于短基线 RTK 可以消除卫星端和智能手机端的绝大部分误差, 因此在短基线 RTK 定位模式下, 只需估计接收机的位置参数和整周模糊度参数。

5.3 随机模型

常见的随机模型包括高度角随机模型和载噪比随机模型。有研究者在载噪比随机模型的基础上进一步考虑了不同卫星系统间伪距噪声的差异, 提出了载噪比联合系统间综合定权随机模型^[62]。上述三种模型通常用于单点定位模式, 但在 RTK 模式下, 基站和移动站通常处于不同的环境中, 这导致基站和移动站之间的载噪比存在差异。在某些情况下, 基站和移动站的载噪比差异可能超过 10 dB-Hz 以上。如果在 RTK 定位模式下不考虑基站的随机模型, 模型将无法准确反映双差观测值的协方差信息, 从而导致 RTK 定位中各个参数的有偏估计。因此, 本研究基于载噪比联合系统间随机模型的基础上, 进一步提出在 RTK 定位中考虑基站载噪比的联合系统间随机模型, 这一模型的提出旨

在更准确地考虑不同信号源之间的载噪比差异，以提高 RTK 定位的精度。下面将对上述随机模型进行详细介绍。

5.3.1 高度角随机模型

由于卫星信号受电离层、对流层和遮挡等因素的影响，不同高度角下的卫星信号质量存在差异。高度角随机模型是根据卫星的高度角来赋予卫星观测值不同的权重，以反映不同高度角下信号质量的差异。

在高度角随机模型中，常见的方法包括三角函数模型和指数函数模型。然而，由于指数函数模型的初始参数选择和调整需要大量实验和经验，因此本研究采用了最常用的正弦函数模型^[69]。具体公式为：

$$\sigma = \left(a + \frac{b}{\sin(E)} \right) \cdot \sigma_0 \quad (5.4)$$

式中： σ 表示观测值方差； E 表示卫星高度角， a 和 b 表示经验系数，默认设置均为 0.5； σ_0 为天顶方向的观测值噪声，对于伪距观测值一般设为 0.3 m，对相位观测值一般设为 0.003 m。

5.3.2 载噪比随机模型

在卫星导航定位、通信、信号处理以及无线通信等领域，载噪比是一个重要的评估指标，用于衡量信号强度与周围噪声之间的相对关系。载噪比随机模型的主要目的是建立信号强度和噪声之间的概率分布，以更深入地理解和分析系统性能。

卫星信号在传播过程中会受到多种误差的影响。同时，每颗卫星信号的传输能量水平也存在差异，因此不同信号的载噪比值会有所不同。载噪比在一定程度上反映了观测值的信号质量。载噪比值越大，表示信号质量越好，测量精度越高。本文采用 $SIGMA-\varepsilon$ 模型^[70]，即：

$$\sigma^2 = \begin{cases} \sigma_0^2 \times 10^{-\frac{(C/N_0_{rover} - C/N_0^r_{max})}{10}}, & C/N_0_{rover} < C/N_0^r_{max} \\ \sigma_0^2, & C/N_0_{rover} \geq C/N_0^r_{max} \end{cases} \quad (5.5)$$

式中， σ_0 的设置参考公式 (5.4)； C/N_0_{rover} 为流动站载噪比； $C/N_0^r_{max}$ 为对应频率 C/N_0_{rover} 最大值阈值。根据小米 8 智能手机 L1 频率特性，将 L1 频率的 $C/N_0^r_{max}$ 阈值设为 45 dB-Hz^[71]。

5.3.3 载噪比联合卫星系统间随机模型

在基于载噪比的随机模型的基础上,一些研究者提出了载噪比联合系统间的随机模型,该模型综合考虑了不同卫星系统之间信号质量和空间信号精度的差异,从而显著提高了定位精度^[72]。其模型可表示为:

$$\sigma^2 = \begin{cases} \sigma_0^2 \times 10^{-\frac{(C/N0_{rover} - C/N0_{max}^r)}{10}}, & C/N0_{rover} < C/N0_{max}^r \\ \sigma_0^2, & C/N0_{rover} \geq C/N0_{max}^r \end{cases} \quad (5.6)$$

与式(5.5)不同,上式中, σ_0 是根据不同卫星系统的伪距观测值和相位观测值噪声进行设置,此处根据3.3.3节设置。

5.4 提出的基站载噪比联合卫星系统间综合定权随机模型

建立在载噪比联合系统间随机模型基础上,进一步推导了一种考虑基站载噪比的联合卫星系统间随机模型,其目的在于更精确地考虑不同信号源之间的载噪比差异。通过这一模型,充分利用信号质量信息来提高RTK定位的精度,从而优化定位结果。其表示为:

$$\sigma^2 = \begin{cases} \sigma_0^2 \times 10^{-\frac{((C/N0_{rover} - C/N0_{max}^r) + (C/N0_{base} - C/N0_{max}^b))}{10}}, & C/N0_{rover} < C/N0_{max}^r \\ \sigma_0^2, & C/N0_{rover} \geq C/N0_{max}^r \end{cases} \quad (5.7)$$

式中: $C/N0_{base}$ 为基站载噪比; $C/N0_{max}^b$ 为对应频率 $C/N0_{base}$ 最大值阈值。可以看出,上述模型综合考虑了基站和用户站的载噪比,更能反应RTK定位中基站和用户站的综合影响。通常,Trimble R9接收机比智能手机强约5-6 dB-Hz,因此将 $C/N0_{max}^b$ 的阈值设为50-51 dB-Hz^[72]。

5.5 实验及定位结果分析

在本节研究中,我们使用了3.2节中描述的数据,分析智能手机小米8在GPS/BDS/GLONASS多系统下的RTK定位性能,并在RTKLIB Demo5 b34g的基础上进行了改进和解算。针对智能手机小米8分别采用提出的基站载噪比联合卫星系统间综合定权随机模型(方案四)与高度角模型(方案一)、载噪比模型(方案二)以及系统间联合载噪比模型(方案三)的RTK定位性能,下面四张图将展示智能手机小米8在静态开阔、静态遮挡、动态开阔和动态遮挡情况下使用不同随机模型时RTK定位在N、E、U三个方向的定位误差序列。

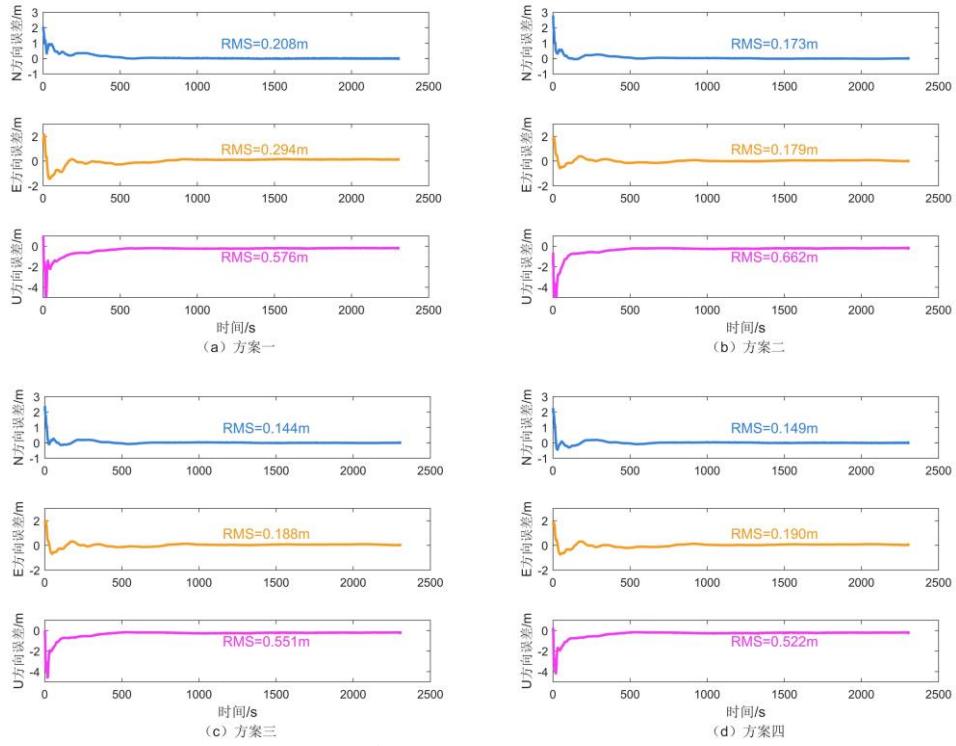


图 5.1 静态开阔下的定位误差序列

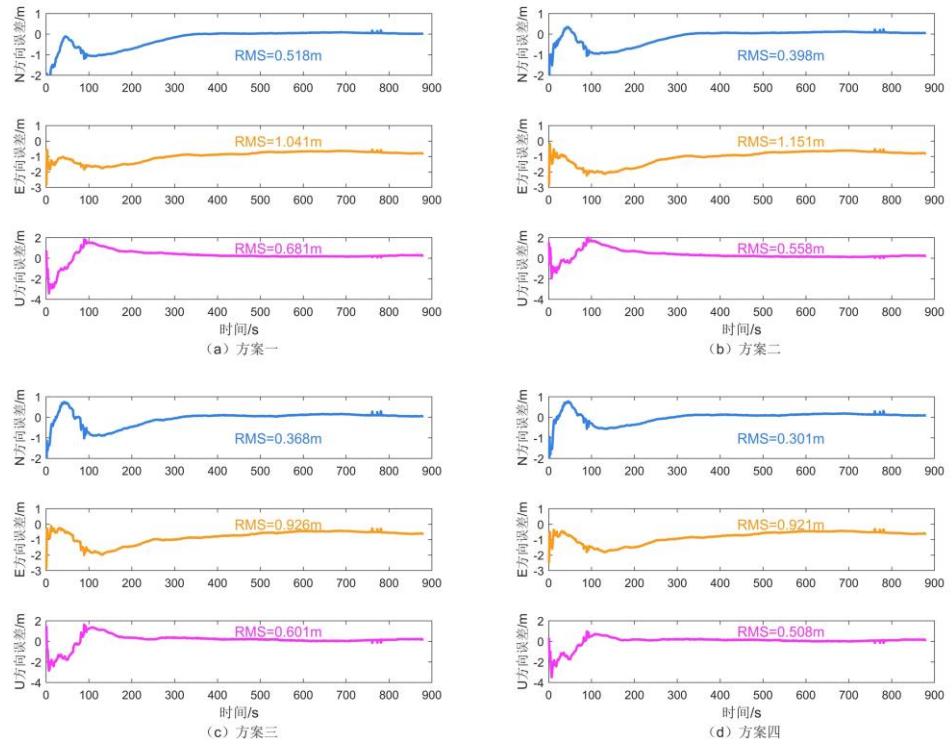


图 5.2 静态遮挡下的定位误差序列

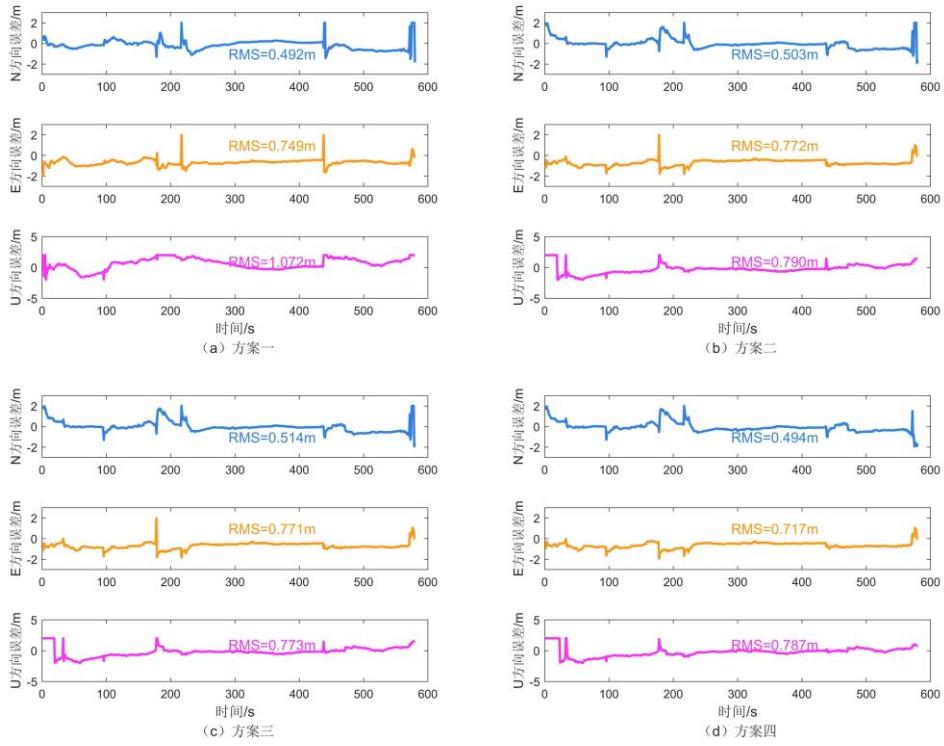


图 5.3 动态开阔下的定位误差序列

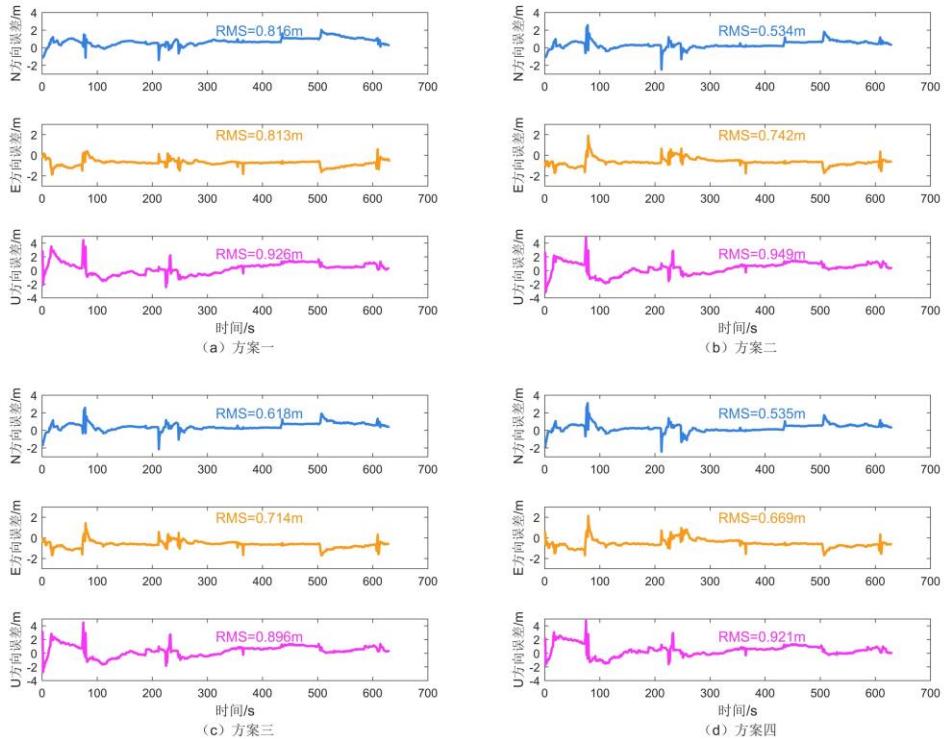


图 5.4 动态遮挡下的定位误差序列

为了使结果对比更加清晰。以下是基于提出的基站载噪比联合卫星系统间综合权随机模型（方案四）与高度角模型（方案一）、载噪比模型（方案二）以及系统间联合载噪比模型（方案三）所得到的三维方向误差时间序列的结果。

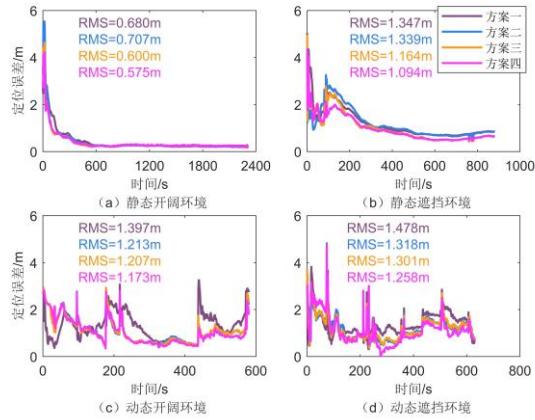


图 5.5 不同环境下不同随机模型的定位结果

根据上图（a）的结果，在静态开阔环境下，四种方案收敛后定位精度相当，但方案三和方案四的收敛速度明显快于方案一和方案二。这种差异可能是因为在开阔环境下卫星数量众多，随着观测数据积累，不同随机模型对参数的估计更接近。然而，在收敛过程中，合适的随机模型能更好地反映不同卫星观测误差的差异，也使观测误差在卫星之间得到更为合理的分配，从而加快了收敛速度。根据上图（b）的结果，在静态遮挡环境下，四种方案的定位精度明显低于开阔环境，但方案三和方案四的精度高于方案一和方案二。在收敛速度方面，方案四明显优于其他三种方案。这是因为在遮挡环境下，卫星数量较少，观测数据不足，定位结果更加依赖随机模型。此外，遮挡环境下，卫星伪距噪声存在较大的差异并且变化迅速，因此考虑伪距噪声的方案三和方案四表现更出色。方案四在方案三的基础上还考虑了基站处不同卫星载噪比的差异和变化，因此表现更佳。根据上图（c）和（d）的结果，动态遮挡环境定位精度总体差于开阔环境，动态开阔环境下四种模式定位精度均在 1.1 米左右，动态遮挡环境定位精度在 1.3 米左右。开阔环境下，三种基于载噪比的模型明显好于高度角模型，从统计结果来说，方案四略好于方案二和方案三。在动态遮挡环境下，方案四相比于其他方案有 5%~15% 的精度提升，提升较为明显。动态定位都比静态定位的定位精度低，主要原因可能是动态的情况下，信号强度可能会发生剧烈的变化，导致智能手机难以准确捕捉信号，从而影响定位。

结果的稳定性。下图给出在不同环境下使用不同随机模型的水平和高程误差。

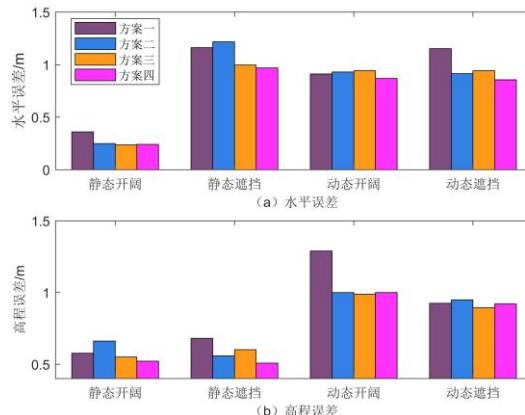


图 5.6 不同环境下不同随机模型水平和高程误差

根据上图的结果, 可以得出以下结论: 在静态开阔和遮挡环境下, 方案四相对于其他三种方案在水平和高程定位精度上都有所提升。在动态开阔环境下, 四种模型的水平定位精度相近, 但三种基于载噪比的模型在高程定位精度方面表现明显优于高度角模型。在动态遮挡环境下, 四种模型的高程定位精度相近, 但三种基于载噪比的模型在水平定位精度方面表现明显优于高度角模型。

5.6 本章小结

本节首先对安卓智能手机的 GNSS 单频 RTK 数学模型进行分析, 聚焦于智能手机多系统定位的随机模型, 针对现有模型未考虑基站载噪比的问题, 提出了基站载噪比联合卫星系统间综合定权随机模型, 并将其与高度角随机模型、载噪比随机模型以及载噪比联合高度角随机模型进行了详细比较与分析。利用小米 8 智能手机, 在开阔和遮挡环境下, 进行了静态和动态 RTK 定位验证, 实验结果表明:

- (1) 此前的研究已经证明载噪比模型在单点定位中胜过高度角模型, 本文使用小米 8 智能手机进行了 RTK 定位, 得出了相同的结论。
- (2) 本文提出的基站载噪比联合卫星系统间综合定权随机模型在开阔和遮挡环境下进行 RTK 定位验证。结果表明, 采用此模型时手机 RTK 定位性能最优, 相比传统载噪比模型, 该随机模型分别在静态开阔、静态遮挡、动态开阔和动态遮挡下三维方向上的 RTK 定位精度分别整体提升 18.7%、18.3%、3.3% 和 4.6%。

结 论

本文主要研究内容有对智能手机小米 8 在静态开阔、静态遮挡、动态开阔和动态遮挡下的 GNSS 原始数据质量分析, 智能手机小米 8 和华为 P40 在不同电离层模型下的单点定位性能以及智能手机小米 8 在不同随机模型下的 RTK 定位性能研究三个方面, 具体结论如下:

(1)智能手机数据质量分析。本文在静态开阔、静态遮挡、动态开阔和动态遮挡四种情况下, 对智能手机小米 8 的 GNSS 原始数据质量进行了分析和评价。实验结果显示, 与天宝 R9 接收机相比, 智能手机小米 8 的卫星观测数相对较少, 且卫星观测的连续性较差。在遮挡环境下, 智能手机小米 8 的卫星信号容易出现周跳现象。此外, 智能手机小米 8 在观测数据中不同卫星系统的卫星观测值伪距噪声存在较大差异, 而相位噪声的差异较小。具体而言, GPS、BDS、GLONASS 三种卫星系统的伪距观测噪声在四种情况下的平均均方根值分别为 5.14m、4.92m、8.24m, 而相位观测噪声的平均均方根值分别为 0.009m、0.008m、0.009m。

(2)智能手机小米 8 和华为 P40 的观测数据进行了伪距单点定位算法研究和定位性能分析。结果显示, 智能手机小米 8 未平滑伪距时的 N、E、U 三个方向定位精度为 1.974m、1.850m、4.581m, 平滑后的精度为 1.46m、1.39m、3.22m, N、E、U 精度提高了 26.3%、25%、29.7%; 智能手机华为 P40 未平滑伪距时的 N、E、U 三个方向定位精度为 0.803m、0.961m、2.830m, 平滑后的精度为 0.685m、0.659m、1.938m, N、E、U 精度提高了 14.7%、31.4%、31.5%。在两次实验中, 采用 BDGIM 模型时, 相比于 GPS K8 模型, 智能手机小米 8 在三维方向定位精度整体提升了 16.2% 和 10.8%, 华为 P40 在三维方向定位精度整体提升了 33.1% 和 3.5%。此外, 在采用 BDS K8 模型时, 相比于 GPS K8 模型, 智能手机小米 8 在三维方向定位精度整体提升了 3.8% 和 4.5%, 华为 P40 在三维方向定位精度整体提升为 2.3%。

(3)智能手机小米 8 GNSS 观测数据进行了 RTK 定位算法研究和定位性能分析。实验结果显示: 在采用提出的基站载噪比联合卫星系统综合定权随机模型的情况下, 在静

态开阔环境下，智能手机小米 8 RTK 定位在 N、E、U 三个方向上定位精度分别达到了 0.149m、0.19m、0.522m；在静态遮挡环境下，达到了 0.301m、0.921m、0.508m；在动态开阔环境下，达到了 0.494m、0.717m、0.787m；在动态遮挡环境下，达到了 0.535m、0.669m、0.921m。相较于传统载噪比模型，该随机模型在静态开阔、静态遮挡、动态开阔和动态遮挡环境下的三维方向上的 RTK 定位精度整体提升了 18.7%、18.3%、3.3% 和 4.6%。

下一步计划：

(1)多传感器融合定位。智能手机在室内往往采集不到卫星信号，此时仅仅依靠 GNSS 是无法确定用户的基本位置。所以智能手机需要通过结合不同传感器的优势，以互补的方式改善定位性能。下一步开发多模式定位技术，将 GPS、GLONASS、Galileo、北斗等多个卫星导航系统以及 Wi-Fi、蓝牙、惯性传感器等多种传感器数据融合，提高定位的准确性和稳定性。

(2)模糊度固定。在城市峡谷等复杂环境下，智能手机的 GNSS 数据受到多路径效应和信号阻塞的影响，导致定位精度下降，模糊度固定难度大大增加。这一挑战需要通过改进算法和技术提高智能手机抗多径能力来解决，以提高智能手机在复杂环境中的定位性能和可靠性。因此对智能手机模糊度固定方面还需进一步研究。

(3)智能手机定位应用。将基于智能手机 GNSS 原始观测数据改进的算法，可开发安卓定位软件，为智能手机用户提供更丰富的定位服务和智能化体验。

参考文献

- [1] 杨元喜, 许扬胤, 李金龙, 等 . 北斗三号系统进展及性能预测:试验验证数据分析[J]. 中国科学 : 地球科学, 2018, 48(5): 584-594.
- [2] Steigenberger P, Montenbruck O. Galileo Status:Orbits, Clocks, and Positioning[J]. GPS Solutions, 2017, 21(2): 319-331.
- [3] Paziewski J D . Recent Advances and Perspectives for Positioning and Applications with Smartphone GNSS Observations[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(9): 1-13.
- [4] Alsubaie N M , Youssef A A , El-Sheimy N . Improving the Accuracy of Direct Geo-referencing of Smartphone-Based Mobile Mapping Systems Using Relative Orientation and Scene Geometric Constraints[J]. Sensors, 2017, 17(10): 2237-2249.
- [5] Gikas V , Perakis H . Rigorous Performance Evaluation of Smartphone GNSS/IMU Sensors for ITS Applications[J]. Sensors, 2016, 16(8):1240-1256.
- [6] 王楚极,龙驰宇,王锋,等. 智能手机多频多系统实时动态的定位性能分析 [J]. 全球定位系统,2021,46(05):10-16. doi:10. 12265/j. gnss. 2021060301.
- [7] European Commission, Joint Research Centre, Boniface, K., Gioia, C., Pozzoli, L. et al., Europe's Earth observation, satellite navigation and communications missions and services for the benefit of the Arctic – Inventory of current and future capabilities, their synergies and societal benefits, Publications Office, 2021, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/270136>
- [8] Wübbena T, Darugna F, Wübbena, J. Geo++'s Experiments on Android GNSS Raw Data. In Proceedings of the GNSS Raw Measurements Taskforce Workshop, GSA Headquarters, Prague, Czech Republic[M]. GSA Headquarters, Prague, 2018.
- [9] Miralles D, Akos D M, Lee D K, et al. Robust Satellite Navigation in the Android Operating System using the Android Raw GNSS Measurements Engine and Location Providers[C]. 2020 European Navigation Conference (ENC), 2020.
- [10] 程義. 高采样率 GPS 动态精密定位数据处理及其应用研究[D]. 陕西: 西安科技大学, 2013.
- [11] 林楠.Android 智能手机 GNSS 数据质量评估和定位性能分析[D]. 陕西: 长安大学,2023.DOI:10. 26976/d.cnki.gchau.2023.000396.
- [12] 陈波.Android 手机高精度实时 GNSS 定位研究[D]. 南京: 东南大学,2020.DOI:10.27014/d.cnki.gdnau.2020.002317.
- [13] Linty N , Presti L L , Dovis F , et al. Performance analysis of duty-cycle power saving techniques in GNSS mass-market receivers[C]// 2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium - PLANS 2014. IEEE, 2014.
- [14] Paziewski J, Sieradzki R, Baryla R. Signal characterization and assessment of code GNSS positioning with low-power consumption smartphones[J]. GPS solutions, 2019, 23(4): 1-12.
- [15] Gogoi N, Minetto I A, Nicola I D, et al. A Controlled-Environment Quality Assessment of Android GNSS Raw Measurements[J]. Electronics, 2019, 8(1): 5.
- [16] 赵硕,秘金钟,徐彦田,赵忠海.双频智能手机 GNSS 数据质量及定位精度分析 [J].测绘科学,2020,45(2):22-28.
- [17] Guo L, Wang F, Sang J, et al. Characteristics Analysis of Raw Multi-GNSS Measurement from Xiaomi Mi 8 and Positioning Performance Improvement with L5/E5 Frequency in an Urban Environment[J]. Remote Sensing, 2020, 12(4): 744.
- [18] Robustelli Umberto, Baiocchi Valerio,Pugliano Giovanni. Assessment of dual frequency GNSS observations from a Xiaomi MI8 Android smartphone and positioning performance analysis[J]. Electronics, 2019, 8(1): 91-102.
- [19] 刘万科,史翔,朱锋,王甫红,虞顺.谷歌 Nexus 9 智能终端原始 GNSS 观测值的质量分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(12):1749-1756.
- [20] Lachapelle G , Gratton P . GNSS PRECISE POINT POSITIONING WITH ANDROID SMARTPHONES AND COMPARISON WITH HIGH PERFORMANCE RECEIVERS[C]// 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP). IEEE, 2019.

- [21] Paziewski J, Sieradzki R, Baryla R. Signal characterization and assessment of code GNSS positioning with low-power consumption smartphones[J]. *GPS solutions*, 2019, 23(4): 1-12.
- [22] Cutugno M, Robustelli U, Pugliano G. Low-Cost GNSS Software Receiver Performance Assessment[J]. *Geosciences (Switzerland)*, 2020, 10(2): 79.
- [23] Liu Y, Gao C, Chen B, et al. Pseudo-range Single Point and Differential Positioning Accuracy Test Based on Android Smartphone[C]. 中国卫星导航年会, 2019.
- [24] 刘永胜, 高成发, 陈波, 等. 安卓智能手机的精密单点定位模型研究[J]. 测绘科学, 2021, 46(02): 15-19+33.
- [25] 栗广才. 大众智能手机 GNSS 模糊度固定理论与方法[D]. 武汉:武汉大学,2021.
- [26] 王怡欣. 安卓手机反向 RTK 关键技术研究及车载实验验证[D]. 武汉大学, 2022.
- [27] 葛于祥,刘赞,李增科,等. 智能手机单点定位随机模型与平滑方式分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(08):1113-1119.
- [28] 肖青怀,谷守周,秘金钟,等. 智能手机多普勒平滑伪距单点定位精度分析[J]. 测绘科学,2020,45(7):11-17.
- [29] 舒宝,义琛,王利,等. 华为 P30 手机 GPS/BDS/GLONASS/Galileo 观测值随机模型优化及定位性能分析[J]. 大地测量与地球动力学,2022,42(12):1222-1226. DOI:10. 14075/j. jgg. 2022. 12. 003.
- [30] LI Zishen,WANG liang,WANG Ningbo,et al. Real-time gnss precise point positioning with smartphones for vehicle navigation[J]. *Satellite Navigation*,2022,3(1).
- [31] 冷宏宇,秘金钟,徐彦田,等. 智能手机终端 RTK 定位性能分析[J]. 测绘科学,2020,45(12):15-21.
- [32] 袁良雄,王浩,申志恒. 基于扩展天线的智能手机 GNSS RTK 定位性能研究[J]. 全球定位系统,2023,48(03):77-84.
- [33] 王式太, 杨诗妮, 李雪珍. 单双频智能手机 GNSS 定位精度分析[J]. 测绘通报,2021 (01): 18-23.
- [34] 高成发, 陈波, 刘永胜. Android 智能手机 GNSS 高精度实时动态定位[J]. 测绘学报, 2021, 50(01): 18-26.
- [35] Dabovic P, Pietra V D. Towards high accuracy GNSS real-time positioning with smartphones[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(1): 94-102.
- [36] 徐彦田. 双频智能手机 GNSS 数据质量及定位精度分析[J]. 测绘科学, 2020, 45(02): 22-28.
- [37] 李俊鹏. 低成本 GNSS 终端导航定位算法研究[D]. 辽宁工程技术大学, 2021.
- [38] 杨涛.北斗高精度定位数据处理算法研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2022. DOI:10.27324/d.cn ki.gshkc.2022.000450.
- [39] Wu J. T., Wu S. C., Hajj G A., et al. Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase[J]. *Manuscripta Geodaetica*, 1993, (18): 91-98.
- [40] Hernández-Pajares M., Juan J M., Sanz J., et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3-4):263-275.
- [41] Hopfield H S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1969, 74(18) :4487-4499.
- [42] Saastamoinen J. Contributions to the theory of atmospheric refraction[J]. *Bulletin Géodésique* (1946-1975), 1973, 107(1):13-34.
- [43] Penna N., Dodson A., Chen W. Assessment of EGNOS Tropospheric Correction Model[J]. *Journal of Navigation*, 2001, 54(1):37-55.
- [44] Niell A E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1996, 101(B2):3227-3246.
- [45] Boehm J., Niell A., Tregoning P., et al. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33 (7):199-208.
- [46] Boehm J. Werl B. Schuh H. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2006, 111(B2): 1059-1075.
- [47] 赵兴旺, 王胜利, 刘超. GNSS 精密单点定位理论与方法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2015.
- [48] 张勤, 李家权. GPS 测量原理及应用[M]. 科学出版社, 2009.

- [49] 戴吾蛟,丁晓利,朱建军. 基于观测值质量指标的 GPS 观测量随机模型分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(7):718-722.
- [50] 杨元喜. 自适应动态导航定位[M]. 北京:测绘出版社, 2006:75-79.
- [51] <https://www.gsa.europa.eu/newsroom/news/world-s-first-dual-frequency-gnss-smartphone-hits-market>, (20 December, 2019).
- [52] <https://www.nsl.eu.com/nsl-jcms/about-nsl/nsl-blog/15-products-and-services/56-xiaomi-mi8-2>, (20 December, 2019).
- [53] 张明,郭斐,邵贺,等. 单频非差相位观测值的周跳探测方法及其比较[J]. 全球定位系统,2009,34(01):10-14. DOI:10.13442/j.gnss.2009.01.003.
- [54] 戴振东,张凯渊,刘佩林,等. 面向低成本 GNSS 接收机终端的周跳修复策略[J]. 导航定位与授时,2021,8(06):125-130.
- [55] Paziewski Jacek,Fortunato Marco,Mazzoni Augusto,et al. An analysis of multi-gnss observations tracked by recent android smartphones and smartphone-only relative positioning results[J]. Measurement,2021,175.
- [56] Pan L , Cai C , Santerre R , et al. Performance Evaluation of Single-frequency Point Positioning with GPS, GLONASS, BeiDou and Galileo[J]. Survey Review, 2017, 70(354):1-9.
- [57] Zhang X. Guo F. Zhou P. Improved precise point positioning in the presence .of ionospheric scintillation[J]. GPS Solutions, 2014, 18(1):51-60.
- [58] 陈正生,张清华,崔阳,等.单频载波相位移动开窗平滑伪距算法及精度分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(07):964-973.DOI:10.13203/j.whugis20180324.
- [59] 陈秀德.电离层延迟改正模型算法的研究与探讨[D].长安大学,2017.
- [60] 周金宁.北斗广播电离层模型的评估与改进分析[D].武汉大学,2020.DOI:10.27379/d.cnki.gwhdu.2020.000404.
- [61] 袁运斌,李敏,霍星亮,等.北斗三号全球导航卫星系统全球广播电离层延迟修正模型(BDGIM)应用性能评估[J].测绘学报,2021,50(04):436-447.
- [62] 鲍任杰,唐成盼,胡小工,等.北斗广播电离层模型精度评估研究[J/OL].北京航空航天大学学报,1-14[2024-04-15].<https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0588>.
- [63] 孙德鹏.北斗系统电离层误差修正算法优化研究[D].中国民用航空飞行学院,2021.DOI:10.27722/d.cnki.gzgmh.2021.000185.
- [64] 刘家龙,贾小林,陶清瑞,等.多系统广播电离层模型精度评估[J].测绘通报,2022,(01):66-71+78.DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2022.0012.
- [65] 毛锐,朱永兴,宋小勇.全球系统广播电离层模型精度分析[J].大地测量与地球动力学,2020,40(09):88-891.DOI:10.14075/j.jgg.2020.09.002.
- [66] 张强,赵齐乐.武汉大学 IGS 电离层分析中心全球电离层产品精度评估与分析[J].地球物理学报,2019,62(12):4493-4505.
- [67] 郭睿,黄张裕,孙瑞,等.北斗三号 BDGIM 模型的适用性分析[J].海洋测绘,2021,41(04):61-64+73.
- [68] Edwards S J, Cross P A, Barnes J B, et al. A methodology for benchmarking real time kinematic GPS[J]. Survey Review, 1999, 35(273):163-174.
- [69] 曾树林,匡翠林. 智能手机 RTK 定位软件实现及应用试验[J]. 全球定位系统,2022,47(05):72-80.
- [70] Li Z, Xu G, Guo J, et al. A sequential ambiguity selection strategy for partial ambiguity resolution during RTK positioning in urban areas[J]. GPS Solutions, 2022, 26(3):1-16.A
- [71] Anon. 2008 ieee asia pacific conference on circuits and systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers,2008,55(2):709-709.
- [72] 吕明慧,李薇,张宝成,等.联合高度角与载噪比的精化随机模型及其对高纬度精密单点定位的影响[J].全球定位系统,2021,46(03):15-23+53.

致 谢

朝来庭下，光阴似箭。回首三年学习生涯，值得铭记的事情有很多，需要感谢的人有很多。

首先感谢我的导师王尔申教授。王老师严以律己，宽以待人。在学习上，王老师时刻督促我的研究进展以及论文完成情况。在生活上，王老师教会了我为人处世的道理，让我受益终身。此外，王老师给我提供了优秀的科研学习平台，让我有更好的发展。

其次感谢我的导师张益泽研究员。张老师平易近人，学识渊博。是您耐心的指导，使我从卫星导航领域小白，一步步成长起来。在联培期间，您给我提供了优秀的学习资源和平台，多次出差的学习，不仅使我学习能力和交际能力都得到很大提升，而且使我见识到许多城市的美好。同时您在生活上也给予了我许多帮助。感谢您对我的付出，您是我永远学习的榜样。

感谢卫星导航实验室大集体。感谢师哥杨涛、宋伟、刘慧超、师姐邓喜丹、王欢对我学习上的帮助；感谢我的同门陈纪浩、陈怡彤、何奕霖、季善斌、贾帅、刘天峰、刘依凡、孙薪蕙、苑子泊、张宏轩，很高兴和你们度过了愉快的三年。感谢博士师哥师姐以及研一研二的师弟师妹，虽然与你们相处的时间很短，但短暂的时光里也让我最后的研究生活充满乐趣。

感谢在中科院上海天文台学习期间陈俊平研究员、王彬老师、谭伟杰老师、宋子远博士、唐文杰博士、丁君生博士、王茹圆博士、朱红玉博士、刘文宣博士等的帮助。感谢程泉润师兄对我小论文撰写以及实验的帮助，生活上我们一起去寻找美食和快乐。

最后感谢我的家人。感谢我的妈妈、姐姐和姐夫，在我的学习生涯一直鼓励我、相信我，生活上也无条件支持我，让我成为更优秀的人。感谢我的姥姥、舅舅、舅妈、弟，在我读初中和高中的时候给我无微不至的照顾，让我有家一样的感觉，是您们让我在成长的道路上少吃了些苦。

他日凌云，万事胜意。

王珩于沈阳航空航天大学

2024年05月30日

攻读硕士期间发表(含录用)的学术论文

- [1] 王尔申, 王珩, 张益泽等. 基站载噪比联合卫星系统综合定权的智能手机 RTK 定位. 全球定位系统[J]. (已录用, 本硕士学位论文第五章)

版权授权说明

本人授权学校“有权保留送交学位论文的原件，允许学位论文被查阅和借阅，学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以影印、缩印或其他复制手段保存学位论文”；愿意将本人学位论文电子版提交给研究生部指定授权单位收录和使用。学校必须严格按照授权对论文进行处理，不得超越授权对毕业论文进行任意处置。

作者：

年 月 日

指导教师：

年 月 日