

分 类 号：_____
学校代码： 10638

密 级：_____
学 号： 212022070400016

学术硕士研究生学位论文

弹载 GNSS 虚拟参考站差分定位技术研究

论 文 作 者 _____ 吴庆丰 _____
指 导 教 师 _____ 李静 研究员 宋叶志 正高级工程师 _____
一 级 学 科 _____ 天文学 _____
二级学科/研究方向 _____ 天文技术与方法 _____
学 习 形 式 _____ 全日制 _____
所 在 学 院 _____ 物理与天文学院 _____

西华师范大学

2025 年 5 月

摘 要

为解决弹载接收机定位中因快速运动和环境复杂性导致的精度不足问题，本文围绕弹载接收机虚拟参考站差分定位技术展开研究，针对弹载接收机定位中的长基线实时解算、复杂环境下的信号误差抑制等关键技术，提出高动态网络 RTD 方法，实现相关代码，经过实测检验，验证了其有效性和可行性。

首先，针对长基线差分定位精度差的问题，本文基于多基站融合技术，结合线性内插模型生成虚拟参考站的伪距观测值，实现了长基线条件下的高精度差分定位。通过香港连续运行参考站的静态数据验证，三维定位均方根误差不大于 0.398 米，证明了算法的正确性和可行性。针对弹载接收机，研究应用了扩展卡尔曼滤波算法，实时更新目标的位置和速度状态，有效提升了定位稳定性。弹载接收机实测数据表明，在共视卫星不少于 6 颗的情况下，定位中误差不大于 2.75 米，基本满足弹载接收机的定位需求。

其次，针对峡谷环境中非视距接收对定位精度的影响，本文采用了一种基于方位角阈值的卫星选择方法，直接排除受障碍物遮挡或衍射影响的卫星信号，定位精度提升约 24.25%。同时，引入位置精度因子随机模型，通过调整关键卫星的权重，降低因卫星排除导致的位置精度因子增加对定位精度的影响，进一步提升了 8.69% 的定位精度。实验结果表明，在峡谷环境中，综合应用等效高度角随机模型、方位角阈值和 PDOP 随机模型的方法，可将三维定位均方根误差降至 9.445mm，显著优于单独使用的高度角随机模型（22.518 mm）。

此外，本文通过与其他外测设备（如光学雷达、测速雷达）的综合轨迹对比，验证了 GNSS 定位的可靠性，位置差异的均方根值为 6.390 m。对于峡谷环境中的测站定位，设计了五种方法的对比实验，证实了提出方法的有效性，体现在定位精度和模糊度固定率上的显著提升。

本文的研究成果为弹载接收机定位提供了一定的理论支撑和技术方案，但仍需在实时动态误差建模优化、复杂环境下的智能信号处理以及实际应用场景的扩展验证等方面进一步探索。

关键词：虚拟参考站；弹道测量；方位角阈值；PDOP 随机模型

Abstract

To address the accuracy limitations in projectile-borne receiver positioning caused by high-speed motion and environmental complexity, this study focuses on the virtual reference station differential positioning technology for projectile-borne receivers. Targeting key challenges such as real-time long-baseline resolution and signal error suppression in complex environments, a high-dynamic network Real-Time Differential (RTD) method is proposed. The corresponding algorithms are implemented and validated through field tests, confirming their effectiveness and feasibility.

First, to resolve the poor accuracy of long-baseline differential positioning, this paper employs a multi-station fusion technique combined with a linear interpolation model to generate pseudo-range observations for virtual reference stations, achieving high-precision differential positioning under long-baseline conditions. Validation using static data from Hong Kong's Continuous Operating Reference Stations (CORS) demonstrates a three-dimensional root mean square (RMS) positioning error of no more than 0.398 meters, proving the algorithm's correctness and feasibility. For projectile-borne receivers, an Extended Kalman Filter (EKF) algorithm is applied to update the target's position and velocity states in real time, significantly enhancing positioning stability. Field tests with projectile-borne receivers show that, under conditions of no fewer than six commonly visible satellites, the positioning error does not exceed 2.75 meters, meeting basic operational requirements.

Second, to mitigate the impact of non-line-of-sight (NLOS) reception in canyon environments on positioning accuracy, a satellite selection method based on azimuth angle thresholds is applied. This method directly excludes satellite signals affected by obstacles or diffraction, improving positioning accuracy by approximately 24.25%. Additionally, a position dilution of precision (PDOP) stochastic model is introduced to adjust the weighting of critical satellites, reducing the adverse effects of increased PDOP caused by satellite exclusion and further enhancing positioning accuracy by 8.69%. Experimental results indicate that in canyon environments, the combined application of equivalent elevation angle stochastic models, azimuth angle thresholds, and PDOP stochastic models reduces the three-dimensional RMS positioning error to 9.445 mm, significantly outperforming the standalone elevation angle stochastic model (22.518 mm).

Furthermore, the reliability of GNSS positioning is verified through comparative trajectory analysis with external measurement devices (e.g., optical radar and

velocity-measuring radar), yielding an RMS position discrepancy of 6.390 meters. For canyon-environment station positioning, comparative experiments with five methods confirm the proposed approach's superiority in both positioning accuracy and ambiguity resolution success rates.

This research provides some theoretical and technical support for projectile-borne receiver positioning. However, further exploration is required in areas such as real-time dynamic error modeling optimization, intelligent signal processing in complex environments, and extended validation in practical application scenarios.

Keywords: Virtual Reference Station (VRS); trajectory measurement; azimuth angle threshold; PDOP stochastic model

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 差分 GNSS 定位研究现状	2
1.2.2 峡谷环境的精密定位技术	4
1.3 研究意义及内容	5
第 2 章 GNSS 虚拟参考站差分定位	6
2.1 GNSS 多系统的时空统一	6
2.1.1 时间系统的统一	6
2.1.2 坐标系统的统一	7
2.2 流动站的差分定位模型	8
2.2.1 原始观测模型	9
2.2.2 单差和双差观测模型	9
2.2.3 扩展卡尔曼滤波估计	10
2.2.4 短基线的 EKF 更新与预测	10
2.3 虚拟参考站技术	11
2.3.1 虚拟观测值模型	12
2.3.2 线性内插模型	13
2.3.3 大气延迟改正模型	14
2.3.4 几何相关改正	15
2.3.5 VRS 中的双差观测模型	15
2.4 本章总结	16
第 3 章 弹载接收机 VRS 差分定位算法	17
3.1 GNSS 融合差分软件介绍	17
3.1.1 实时数据获取	18
3.1.2 数据预处理	18
3.1.3 伪距单点定位	19
3.1.4 多基站融合 VRS 生成	20
3.1.5 软件使用	21
3.2 静态数据验证	23
3.3 弹载接收机数据测试	27
3.4 本章小结	31
第 4 章 峡谷 GNSS 参考站的非视距接收抑制	32

4.1	等效高度角随机模型	32
4.2	顾及 PDOP 的随机模型	33
4.3	方位角阈值	34
4.4	计算验证	35
4.4.1	障碍物方位角函数	35
4.4.2	模板函数的建立	36
4.4.3	定位性能分析	38
4.5	本章小结	43
第 5 章	总结与展望	44
参考文献	46
在学期间的科研情况	52

第1章 绪论

1.1 引言

武器的摧毁力与爆炸当量的算术平方根成正比，而与命中精度的二分之三次方成正比，即武器命中精度若提高 1 倍相当于弹药当量提高 8 倍^[1]。由此可见，命中精度在现代武器系统中的重要性甚至超过了单纯的爆炸威力，这也促使军事技术不断追求更高的打击精准度。而要实现这一目标，离不开先进的导航和定位技术的支持。全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite Systems, GNSS) 可以在全球范围内，为大量用户提供全天候、准确连续的定位、导航与授时服务(Positioning, Navigation and Timing, PNT)。其中，定位是指用户确定自己的空间位置，导航是指为用户规划航线，使用户能够正确的到达目的地，授时则是为用户提供并保持精确的时间信息^[2]。GNSS 系统目前已经成为海陆空各类载体广泛使用的导航技术，可为导弹提供精确的制导，使其能准确命中目标^[3]。

早期的 GNSS 定位是利用广播星历给出的导航卫星轨道和钟差以及接收机伪距观测值来进行的，称为伪距单点定位(Single Point Positioning, SPP)^[3]。该方式的定位精度较差。之后，欧美学者提出建设若干的主控站与监测站对导航卫星进行连续观测，对相邻区域内实现实时误差改正，实现了更高精度的伪距差分定位(Real-Time Difference, RTD)^[4]。随后由于导航卫星信号的载波相位观测精度远高于伪距观测精度，出现了以载波相位为观测手段的高精度实时动态定位(Real-Time Kinematic, RTK)技术^[3]。这种基于多个接收机实现的定位技术称为差分定位技术(Differential GNSS, DGNSS)。

为了实现高精度定位，RTK 作业的基线长度通常不应当超过 20 km^[5]。而差分定位技术在这样的作业范围限制下，很难在大区域的定位需求中发挥作用。当流动站运动速度很快时，会在短时间内跨越很大的区域。另一方面，在流动站接收机运动速度较快时，其与卫星的相对运动速度在卫星视向投影会引起载波多普勒频移的急剧变化，因为 GNSS 接收机具有频率跟踪环路限制，相位观测很容易出现载波跟踪失锁线性，进而无法满足接收机的实时定位条件^[6]。因此，以载波相位观测值为手段的 RTK 技术并不适用于弹载 GNSS 定位。目前弹道测量中 GNSS 技术的应用仍以 SPP 技术或 SPP 与惯性导航相组合为主^[7-9]，伪距差分定位技术在弹载 GNSS 中的应用尚未体现。

此外，因为导弹的运动距离较远，若对弹载接收机实现差分定位，则需要更大范围的区域布设参考站。如此将难免参考站布设在例如峡谷这种极端环境中。另一方面，随着连续运行参考站网 (Continuously Operating Reference Stations, CORS) 的广泛建立，同样有越来越多的参考站建立在城市环境中。这些环境存在普遍的特点是地表地形起伏较大，因而被称为峡谷环境^[10]。峡谷环境中的参考站

接收机在对导航卫星观测时，障碍物会对导航卫星的信号产生遮挡、衍射、导致多路径效应等非视距接收(Non-Line Of Sight, NLOS)。非视距接收将严重损害定位精度，于是便产生了峡谷环境中的精密定位问题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 差分 GNSS 定位研究现状

1.2.1.1 DGNSS 的发展与标准化

1970 年代，MITRE 公司与美国空军在 GPS (Global Positioning System, GPS) 实验中发现，接收机之间的共同误差可通过差分的方法消除，这为 DGNSS 提供了理论雏形。1983 年，美国海岸警卫队首次建立海事差分 GPS 系统，通过固定基准站广播误差修正信号，为船只提供米级定位精度。这是首个大规模应用的 DGNSS 系统。1980 年代后期，国际民航组织推动了 DGNSS 在飞机精密进近的应用，如局域增强系统(Local Area Augmentation System, LAAS)^[11]。2002 年美国联邦航空管理局对 LAAS 完成了 I 类精密进近认证。随后霍尼韦尔和雷声公司共同制定了 GPS LAAS 的相关技术规范与运行标准，为精密进近提供了 II 类和 III 类的精度、完好性以及可用性服务。2003 年之后，美国一些机场开始使用 LAAS 系统^[4]。1990 年代，美国联邦航空局开发了广域增强系统(Wide Area Augmentation System, WAAS)，覆盖全美范围。该系统通过地面参考站网监测 GPS 误差（电离层、星历、钟差），通过主控站计算修正数据，由地球静止卫星（Geostationary Earth Orbit, GEO）广播给用户，能够实现的定位精度为：水平 1~2 m(95 %置信度)、垂直方向 2~3 m。

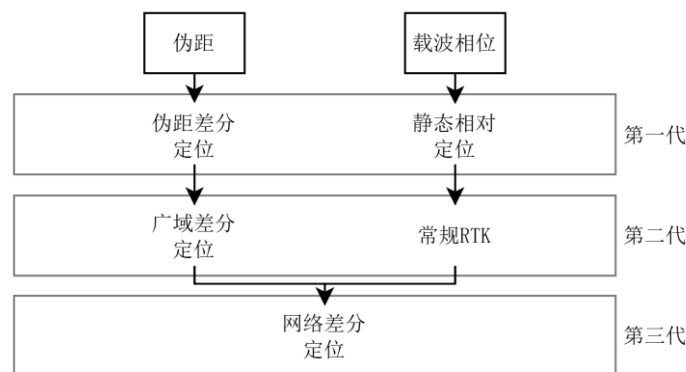


图 1-1 相对定位的发展历程

在 DGNSS 发展的过程中，相关技术标准与推广也起到了重要作用。1983 年，美国无线电技术海事委员会(Radio Technical Commission for Maritime services, RTCM)成立了专门委员会(Special Committee 104, SC-104)，制定了差分数据格式标准，以确保不同厂商的接收机能够兼容差分修正信号^[11]。RTCM SC-104 标准定义了差分修正数据的编码方式，包括伪距修正值、载波相位修正值、参考站坐标、

健康状态、数据龄期等元数据。该标准极大促进了 DGNSS 的商业化,使基准站和目标之间的数据交换成为可能。

随着 DGNSS 技术的不断发展,传统单基准站差分模式逐渐暴露出覆盖范围有限、误差建模不完善等问题。在此背景下,基于多个基准站的网络差分定位技术应运而生,成为高精度定位领域的重要突破。

1.2.1.2 网络差分定位的关键技术

早期的 DGNSS 系统依赖单个基准站,其有效范围通常不超过 20 km,且难以消除区域性的电离层和对流层误差。而 WAAS 虽然通过地球静止卫星实现了广域覆盖,但其米级精度无法满足测绘、自动驾驶等更高精度的需求。1995 年, Wanninger 利用多个基准站的观测值,在区域中内插出以电离层延迟为主的误差模型^[12]。1997 年, Wanninger 又提出了虚拟参考站 (Virtual Reference Station, VRS) 技术^[12]。虚拟参考站技术的核心定位机制可概括为:数据处理中心实时接收至少三个参考站的原始观测数据,同时获取流动站(定位目标)的近似位置坐标。系统在该坐标点模拟一个观测站,即为虚拟参考站,并针对该站点位置进行大气传播延迟(包括电离层与对流层效应)的空间相关性建模。通过计算虚拟站点的理论观测值,生成符合通用数据协议的标准格式修正信息,最终将这些数据实时传输至流动站,使其能够高精度的实时动态定位^[13,14]。VRS 技术因其可靠的稳定性,且定位精度高,所以是目前所有网络差分定位技术中普及率最高的技术^[13]。

1996 年, Wubben 等人在提出了区域改正数(Flächen Korrektur Parameter, FKP)模型^[12]。区域改正数方法是在测站网中选择某一参考站作为主控站,其他各个参考站的观测数据发送给该主控站,主控站则通过线性多项式来模拟测站网区域中的误差,实时对该区域内误差进行建模,进而生成沿经纬线方向的区域改正数,用户则可使用区域改正数实现精密定位^[13,14]。该方法对流动站的先验信息要求较多,且建设成本高,因此该技术普及率比较低^[14]。

2003 年,徕卡公司对 FKP 技术做出了改进,提出了主辅站技术(MMAC)^[13,15]。主辅站技术借鉴了 VRS 技术的标准化格式,并发挥了 FKP 技术的数据处理优势。主辅站技术将距离流动站距离最近的参考站作为主参考站,其余参考站作为辅站,数据中心接收各参考站数据后,处理并发布主站的差分改正数以及辅站与主站差分改正数之差值,流动站随机对改正数加权处理完成定位^[13]。

武汉大学的唐卫明在 2006 年提出了综合改正数(Combined Bias Interpolation, CBI)的网络差分定位算法。该方法不区分对流层与电离层误差,数据处理中心接收各个基准站的数据后,将观测数据统一处理后得到综合误差改正数并发播给用户^[12]。

表 1-1 网络差分技术对比^[13]

技术	改正数数学模型	参考站	精度	普及率
VRS	双差内插	一个主参考站，多个副参考站	高	高
FKP	非差卡尔曼滤波	最近的三个参考站	高	低
MAC	双差	一个主参考站，多个副参考站	高	中
CBI	双差内插	根据流动站选择	高	中

1.2.2 峡谷环境的精密定位技术

准确的 NLOS 检测和后续处理对于信号质量控制至关重要^[16]。信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)是反映信号质量的主要指标，因为 SNR 和信号质量之间关系密切^[10]。以 10 为底的 SNR 的指数函数是一个常用的随机模型，用作 GNSS 观测的定权策略，尤其是在低信号质量情景中^[17]。但无论是以 10 为底的 SNR 的指数函数随机模型，还是以卫星高度角为函数的随机模型，孤立地使用这些随机模型均无法合理估计特定站点不同类型卫星权重的准确性^[18]。

2015 年，为了解决峡谷环境中非视距接收带来的挑战，Strode 和 Groves 在提出了一种使用三频 SNR 观测来检测多路径效应的方法^[19]。该方法包括首先在高 NLOS 条件下在不同频率的 SNR 观测和卫星高度角之间建立一个基于 SNR 的多路径检测器^[19]。然后将观察到的 SNR 与检测器进行比较，以检测多路径效应^[19]。基于 Strode 和 Groves 的方法，Zhang 等人开发了一种使用双频 SNR 检测多路径效应的技术^[20]。

2018 年，Špánik 等人指出了 Strode 和 Groves 方法中的几处问题^[21]。首先，Strode 和 Groves 用来建立参考函数的三次多项式是否可以应用于更广泛的场景，需要进一步研究。其次，使用三次多项式来拟合 SNR 观测值和高度角之间的关系以建立参考函数的有效性值得怀疑。最后，虽然参考函数可以准确检测三频接收机中的多路径效应，但它可能会导致双频接收机中的错误检测^[21]。

为了解决这些问题，Špánik 等人提出了最优组合估计器，它通过构建多个频率的 SNR 观测与高度角的余弦的线性组合来检测多路径效应^[21]。但此方法仅适用于双频或三频接收机。尽管低成本的单频接收机对非视距接收机的接收更敏感，但由于其成本优势和便携性，它们在市场上受到了广泛的认可^[22]。2021 年，Zhang 等人推出了一种专为峡谷环境设计的复合随机模型，提出了等效高度角的概念，并将其适用性扩展到单频接收机。该方法在检测信号衍射和多路径效应方面很有效^[10]。但该方法仅使用建筑物的方位角来限制高度角，即方位角不会直接限制卫星信号，无法充分发挥方位角在定位中的约束效果。实际上，卫星信号的非视距接收不仅可能发生在障碍物的高程方向，还可能发生在障碍物的侧面边缘，尤其

是在信号衍射效应^[23]。

由于地形特征的限制，接收机观测到的有效卫星数量减少并因此增大位置精度因子（Position Dilution Of Precise, PDOP）^[24]，是峡谷环境需要解决的另一个问题。卫星的数量决定了可用观测的数量，而 PDOP 反映了卫星之间几何图形的强度。在卫星数量相同的情况下，PDOP 的增加会导致定位精度的降低，特别是当使用角度阈值来排除卫星以减轻非视距接收时。为了在这种具有挑战性的环境中最大限度地降低不良 PDOP 条件的影响，2022 年，Li 等人提出了一种考虑 PDOP 的随机模型，并在 SPP 定位中实现了约 10% 的精度提升^[24]。目前考虑随机模型的 PDOP 研究仍然有限，主要应用于 SPP 定位。

1.3 研究意义及内容

VRS 技术具有高稳定性和高精度的优势，并且可以在多种场景中发挥作用，因此市场中得到了广泛应用，现已成为网络差分定位的主要技术^[13]。伪距差分定位不需要固定整周模糊度，所以具有定位速度快的优势。虽然伪距差分技术的定位精度远不及相位差分，但是弹载接收机因其运动速度快，巡航范围广且实时性需求较高的特点，并不适合采用相位差分技术，而是采用伪距差分定位技术。在上述前提下，考虑到弹载接收机的实时定位需求以及网络伪距差分技术在实时定位中的优势，本研究采用网络伪距差分定位技术，即融合多个基准站观测数据，生成 VRS 观测值作为基准站与流动站进行短基线伪距差分定位，进而解算定位结果^[25]。本研究基于 C++ 编程语言，设计并实现了 VRS 生成算法与差分定位自研软件，利用实测静态数据的定位结果验证了自研软件算法的正确性与可靠性，并将该软件应用在弹载接收机的差分定位中^[25]。

峡谷环境存在复杂的影响因素，且一些场景中已经不可避免地将基准站布置在峡谷环境中。以前的研究大多使用方位角作为高度角的约束，间接影响了卫星的选择。因此，本研究考虑了卫星信号在障碍物侧缘接收的可能性，并提出使用卫星方位角作为控制卫星选择的直接约束。考虑到直接对卫星进行限制将影响 PDOP 进而降低定位精度，所以引入 PDOP 随机模型以降低这种影响。

本文第一章介绍了弹载 GNSS 的网络伪距差分定位需求与相关技术研究现状，并给出了全文结构。第二章介绍了 GNSS 差分定位模型，包括时空系统、单差双差观测方程及网络伪距差分定位模型。第三章介绍了自研网络差分定位软件，并利用自研软件实现了静态和弹载接收机的 VRS 差分定位。第四章分析了峡谷环境中的参考站所面临的主要问题，峡谷参考站不仅要考虑来自障碍物上方的衍射信号，同样要剔除侧方的卫星信号，并且需要考虑剔除卫星对 PDOP 造成的影响。第五章对论文的工作内容进行总结，并对后续的工作和研究做出了展望。

第2章 GNSS 虚拟参考站差分定位

在观测条件比较复杂的情况下，单系统导航定位往往存在可见卫星数量不足的问题^[26]。随着美国的 GPS 导航系统、俄罗斯的 GLONASS(GLObal Navigation Satellite System, GLONASS)导航系统、欧盟的 Galileo 导航系统和我国的北斗导航系统的发展，多系统联合定位已成为主流的导航定位方式^[27]。这四种导航系统使用不同的时空基准。将不同的系统进行时空基准的统一是能够组合使用多系统进行定位的前提。本章先介绍各导航系统的时空基准及转换关系，随后给出差分定位的数学模型以及 VRS 技术的原理。

2.1 GNSS 多系统的时空统一

GNSS 多系统联合定位的一个重要基础是时空系统的统一^[27]。定位的测量原理即是地面接收机使用卫星信号中的测距码或载波相位测定信号的传递时间，进而确定地面接收机天线与卫星信号天线之间的距离^[3]。另一方面，对观测信息的处理与卫星位置计算高度依赖地球参考框架的信息，而不同的导航系统使用的地球参考框架并不相同。如果在解算过程中使用其他系统的地球参考框架，将会引入系统性误差甚至解算错误。因此，在利用多个 GNSS 导航系统进行定位之前，需要先对时空系统进行统一。

2.1.1 时间系统的统一

各个 GNSS 导航系统的时间系统以协调世界时(Universal Time Coordinated, UTC)或国际原子时(Temps Atomique International, TAI)为基础建立和维系的，UTC 与 TAI 之间相差 19 s，所以各个 GNSS 的时间系统可以以 UTC 为中间变量进行统一和转换^[3,28-30]。因为 GPS 时间(GPS Time, GPST)通常作为 GNSS 联合接收机的时间基准，所以其他导航系统的时间经过 UTC 转换后，可以统一为 GPST^[31]。

GPST 是 GPS 系统的时间基准，时间起点为 UTC 时间 1980 年 1 月 6 日 0 时整，秒长严格等于原子时的秒长^[3]。GPST 与协调时(UTC)的关系为：

$$GPST = UTC + n - 19s - C_0 \quad (2.1)$$

其中 n 表示 UTC 和 TAI 之间的闰秒， C_0 表示 GPST 与 UTC 之间的日偏量，尺度为纳秒级^[32]。

GLONASS 时间(GLONASS Time, GLONASST)是 GLONASS 系统的时间基准，它属于 UTC 时间系统^[28]。GLONASST 使用俄罗斯的 UTC 区时，所以 GLONASST 与 UTC 之间存在 3 小时的时间差且不存在闰秒：

$$GLONASST = UTC - C_1 + 3h \quad (2.2)$$

C_1 表示 GLONASST 与 UTC 之间的日偏量，尺度为纳秒级^[32]。

Galileo 时间(Galileo System Time, GST)是 Galileo 系统的时间基准，时间起点

为 TAI 时间 1999 年 8 月 22 日 0 时整, 是基于 TAI 的时间系统^[28,32]。因此 GST 与 UTC 之间存在闰秒, 考虑到 GST 与 GPST 的兼容性, GST 的时间原点可以设置为 GPST 的时间原点, 即可得到与 GPST 相同的 UTC 转换式:

$$GST = UTC + n - 19s - C_2 \quad (2.3)$$

C_2 表示 GST 与 UTC 之间的日偏量, 尺度为纳秒级^[32]。

北斗时间系统(The BeiDou Time, BDT)是我国北斗系统的时间基准, 是一种连续的计时系统^[28]。BDT 与 UTC 的关系为

$$BDT = UTC + n - 33s - C_2 \quad (2.4)$$

其中 n 表示 UTC 和 TAI 之间的闰秒, C_3 表示 BDT 与 UTC 之间的日偏量, 尺度为纳秒级^[32]。

因为 BDT 的起点为 UTC 时间 2006 年 1 月 1 日 0 时整, 且秒长均为原子时秒长, 因此若以周-周内秒计时法, GPST 与 BDT 之间可以不以 UTC 为中间变量直接进行转换:

$$\begin{aligned} Week_C &= Week_G - 1356 \\ SOW_C &= SOW_G - 14s \end{aligned} \quad (2.5)$$

其中 $Week_C$ 表示 BDT 周, $Week_G$ 表示 GPST 周, SOW_C 表示 BDT 周内秒, SOW_G 表示 GPST 周内秒。

2.1.2 坐标系统的统一

本研究所使用的四个导航系统均有各自对应的坐标系统。坐标系统包括直角坐标轴与地球椭球参数的选择。GPS 系统使用的坐标系为 WGS-84(World Geodetic System 1984, WGS-84)坐标系, 对应的地球椭球称为 WGS-84 地球椭球^[33]; GLONASS 系统使用的坐标系为 PZ-90(Parametry Zelmy 1990, PZ-90), 对应 PZ-90 地球椭球^[34]; Galileo 系统使用 GTRF(Galileo Terrestrial Reference Frame, GTRF)坐标^[35], GTRF 由国际地球参考框架的站点坐标和速度组成^[28]; 北斗系统使北斗坐标系(BeiDou Coordinate System, BDCS)及其地球椭球^[36]。这四种坐标系统均为地心地固坐标系。表 2-1 和表 2-2 给出了各个坐标系统的相关参数。虽然 PZ-90 的定义方式与 GTRF 相同, 但是因为轨道跟踪站的点位误差与测量误差的存在, 所以两者的具体实现存在差异^[28]。

表 2-1 各系统的直角坐标系定义

坐标系统	坐标原点	Z 轴方向	X 轴方向	Y 轴方向
WGS-84	地球质心	IERS 参考地极	IERS 参考子午面与 协议地极赤道的交 点	与 X、Z 轴构成右手 坐标系
PZ-90	地球质心	IERS 推荐的国际协	BIH 零子午线与国	与 X、Z 轴构成右手

		议地极原点	际协议地极赤道交 点	坐标系
GTRF	地球质心	IERS 推荐的国际协 议地极原点	BIH 零子午线与国 际协议地极赤道交 点	与 X、Z 轴构成右手 坐标系
BDCS	地球质心	IERS 定义的参考极	IERS 参考子午面与 对应赤道交点	与 X、Z 轴构成右手 坐标系

表 2-2 地球椭球参数

地球椭球	长半轴(m)	扁率	地球引力常数 (m ³ /s ²)	自转角速度(rad/s)
WGS-84	6378137.0	1/298.257223563	3.9860050×10^{14}	7.292115×10^{-5}
PZ-90	6378136.0	1/298.25784	$3.986004418 \times 10^{14}$	7.292115×10^{-5}
GTRF	/	/	$3.986004418 \times 10^{14}$	$7.2921151467 \times 10^{-5}$
BDCS	6378137.0	1/298.257222101	3.9860050×10^{14}	7.292115×10^{-5}

WGS-84、GTRF 和 BDCS 之间的差距目前已达到毫米级，因此对于更低精度要求的定位，三者的差距可以忽略不计^[31]。但是因为 PZ-90 与其他地球椭球的参数相差较大，所以在将坐标系统统一到 WGS-84 中时，PZ-90 与 WGS-84 的差距不可忽略。二者之间的转换一般可采用赫尔默特七参数模型完成，考虑到 GPS 系统已被各国广泛应用，所以通常将 PZ-90 的坐标转换为 WGS-84 坐标^[28,31]

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

其中 (X, Y, Z) 为相应的 WGS-84 坐标， (X', Y', Z') 为 PZ-90 中的坐标， ΔX_0 、 ΔY_0 、 ΔZ_0 分别为坐标偏移量，即 PZ-90 的原点在 WGS-84 中的坐标。 ε_x 、 ε_y 和 ε_z 为 PZ-90 绕 (X, Y, Z) 轴得到 WGS-84 坐标轴所需旋转参数， m 为尺度因子。

2.2 流动站的差分定位模型

早期的差分定位技术是流动站与单个基准站的差分定位。差分定位在数学模型中的表示是依照观测站、卫星和观测历元的不同，分别将原始观测方程相减进而得到新的观测方程。按照相减的次数分为单差观测模型和双差观测模型，对应的观测值分别称为单差观测值和双差观测值^[28,31]。差分定位的优势在于利用方程相减的方式消去对应的公共误差，从而提高定位精度^[3]。本节先介绍 GNSS 定位中的原始观测方程，进而得到双差观测模型，并引入扩展卡尔曼滤波的原理，介绍利用双差观测模型实现差分定位解算。

2.2.1 原始观测模型

根据接收机的观测值及接收机与卫星的位置关系，可以列出伪距和相位观测方程

$$P_i^p = \rho_i^p + c(\delta t_i - \delta t^p) + I_i^p + T_i^p + \varepsilon_p \quad (2.7)$$

$$\lambda \varphi_i^p = \rho_i^p + c(\delta t_i - \delta t^p) - \lambda N^p - I_i^p + T_i^p + \varepsilon_L \quad (2.8)$$

其中

$$\rho_i^p = \sqrt{(x^p - x_i)^2 + (y^p - y_i)^2 + (z^p - z_i)^2} \quad (2.9)$$

式中 P 表示伪距观测值， φ 为相位观测值； λ 为信号载波的波长， c 为光速； ρ_i^p 为接收机 i 与卫星 p 之间的几何距离，其中 (x_i, y_i, z_i) 是待求得接收机坐标， (x^p, y^p, z^p) 是卫星在地心地固坐标系中的位置，通过卫星播发的广播星历得到； I_i^p 和 T_i^p 分别为电离层和对流层延迟参数； δt_i 表示接收机的钟差参数， δt^p 表示卫星的钟差参数； N^p 为卫星载波的整周模糊度； ε_p 为伪距观测的观测噪声， ε_L 为相位观测的观测噪声^[37]。与单差观测模型和双差观测模型相比，因为原始观测方程没有进行差分运算，因此又称为非差观测模型。

2.2.2 单差和双差观测模型

单差观测模型可以在测站类型、卫星和观测历元之中选择一个变量作为差分项目。通常选择测站类型作为差分项目^[3,37]，即两个测站 i 和 j 的接收机在同一观测历元，对同一颗卫星 p 的观测方程相减得到站间单差观测方程：

$$\Delta P_{ij}^p = \Delta \rho_{ij}^p + c \Delta \delta t_{ij} + \Delta I_{ij}^p + \Delta T_{ij}^p + \varepsilon_p \quad (2.10)$$

$$\lambda \Delta \varphi_{ij}^p = \Delta \rho_{ij}^p + c \Delta \delta t_{ij} - \lambda \Delta N_{ij}^p - \Delta I_{ij}^p + \Delta T_{ij}^p + \varepsilon_L \quad (2.11)$$

其中 Δ 表示单差标识， ε_p 和 ε_L 分别表示单次差分后的伪距和相位观测噪声。可以看到，同一颗卫星的钟差在相减运算被消去，卫星钟差带来的误差因此不再对后续求解产生影响。

在得到站间单差观测方程后，在相同观测历元下在卫星 p 和 q 之间进行方程相减，得到双差观测方程：

$$\nabla \Delta P_{ij}^{pq} = \nabla \Delta \rho_{ij}^{pq} + \nabla \Delta I_{ij}^{pq} + \nabla \Delta T_{ij}^{pq} + \varepsilon_{p^*} \quad (2.12)$$

$$\lambda \nabla \Delta \varphi_{ij}^{pq} = \nabla \Delta \rho_{ij}^{pq} - \lambda \nabla \Delta N_{ij}^{pq} - \nabla \Delta I_{ij}^{pq} + \nabla \Delta T_{ij}^{pq} + \varepsilon_{L^*} \quad (2.13)$$

其中 $\nabla \Delta$ 表示双差标识， ε_{p^*} 和 ε_{L^*} 分别表示二次差分后的伪距和相位观测噪声。可以看到，在卫星间作观测方程差分运算后，接收机钟差同样作为公共误差被消去，接收机钟差不再对后续解算产生影响。

在单基准站的 RTD 或 RTK 定位解算中，测站 i 和 j 分别是已知坐标的基准站

和待求坐标的流动站，并选择高度角最大的卫星作为参考卫星进行星间差分运算^[3]。从卫星的角度来看，流动站与基准站之间的距离远小于两测站到卫星之间的距离，电离层与对流层延迟在两地的差别 ΔI_{ij}^p 和 ΔT_{ij}^p 很小。当基准站与流动站之间的距离不超过 10 km 时， ΔI_{ij}^p 和 ΔT_{ij}^p 可忽略不计，此时基准站到流动站的向量称为短基线^[38]。

2.2.3 扩展卡尔曼滤波估计

卫星定位解算过程中，观测数量通常多于待求参数个数进而构成超定方程组。因此求解流动站坐标转化为超定方程组的最优估计问题。相较于常用的最小二乘估计，卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF)估计采用递推形式，占用存储资源少且计算效率高，又考虑到了物体运动的惯性和连续性，将物体的在相邻时刻的位置信息相互联系，使得处理的定位结果显得更平滑、准确，而被 GNSS 导航定位广泛应用^[12,39]。

卡尔曼滤波由美国数学家卡尔曼提出，最初仅适用于具有线性测量方程的线性系统。随后，卡尔曼滤波被工程师发展出扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)，应用于非线性系统的动态目标位置解算^[12]。扩展卡尔曼滤波的基本思路是将非线性系统通过线性化的方式转化为瞬时线性系统^[25]。扩展卡尔曼滤波的模型如下。

设在历元时刻 t_k 的观测向量为 \mathbf{y}_k ，满足^[25]：

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k^-)) \quad (2.14)$$

$$\mathbf{P}_k^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k^-)) \mathbf{P}_k^- \quad (2.15)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}_k^-) \left(\left(\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k^-) \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k^-) \right)^T + \mathbf{R}_k \right)^{-1} \quad (2.16)$$

其中 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 和 \mathbf{P}_k 分别为历元时刻 t_k 的状态向量估值及其协方差矩阵，上标 $-$ 和 $+$ 分别为 EKF 观测更新前和更新后的标识。 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$, $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ 和 \mathbf{R}_k 分别表示观测模型向量、偏导数矩阵和测量误差的协方差阵， \mathbf{K}_k 为卡尔曼增益矩阵^[27]。

状态向量与其协方差阵的 EKF 预测表达式为^[25]：

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- = \mathbf{F}_k^{k+1} \hat{\mathbf{x}}_k^+ \quad (2.17)$$

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = \mathbf{F}_k^{k+1} \mathbf{P}_k^+ \mathbf{F}_k^{k+1} + \mathbf{Q}_k^{k+1} \quad (2.18)$$

其中 \mathbf{F}_k^{k+1} 和 \mathbf{Q}_k^{k+1} 分别为从历元 t_k 到历元 t_{k+1} 的状态转移矩阵和系统过程噪声协方差矩阵^[27]。

在短基线差分定位解算中，观测向量 \mathbf{y}_k 为双差观测值，状态向量 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 为流动站的位置坐标和各个卫星的单差整周模糊度。

2.2.4 短基线的 EKF 更新与预测

现讨论短基线 EKF 中更新与预测相关矩阵的确定。设有共视卫星数目 $n+1$ ，对于卫星某一频率信号 f 有：

$$h(x) = (\nabla \Delta \rho_{r,b}^{ref,1}, \nabla \Delta \rho_{r,b}^{ref,2}, \dots, \nabla \Delta \rho_{r,b}^{ref,n})^T \quad (2.19)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = -\mathbf{D}\mathbf{E} \quad (2.20)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{D}\mathbf{R}_f\mathbf{D}^T \quad (2.21)$$

其中 ref 表示选定的参考卫星， r 表示流动站， b 表示基准站， \mathbf{D} 为星间单差矩阵， \mathbf{E} 为包含接收机指向卫星在地心地固系下方向向量的矩阵， \mathbf{R}_f 为对于频率 f 的测量误差协方差阵^[25]：

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & -1 \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{E} = (\mathbf{e}_r^{ref}, \mathbf{e}_r^1, \dots, \mathbf{e}_r^n)^T \quad (2.23)$$

$$\mathbf{R}_f = \begin{pmatrix} 2\sigma_f^{ref^2} & & & & \\ & 2\sigma_f^{1^2} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 2\sigma_f^{n^2} \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

其中 σ_f^i 为卫星 i 的 f 信号伪距测量标准差， \mathbf{e} 表示在地心地固系下接收机指向单个卫星的方向向量^[25]。

对于 EKF 预测表达式，设接收机为 m 频观测，状态转移矩阵和过程噪声协方差阵设置如下^[25]：

$$\mathbf{F}_k^{k+1} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & & \\ & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \\ & & \mathbf{I}_{mn \times mn} \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

$$\mathbf{Q}_k^{k+1} = \begin{pmatrix} \infty_{3 \times 3} & & \\ & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \\ & & \mathbf{I}_{mn \times mn} \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

在具体实现中，通常会在每个历元中将接收机的位置状态量设置为一先验值，并设置对应的过程噪声为一个较大的值。这是为了避免无穷大的过程噪声造成的数值不稳定性。其中接收机位置状态量先验值可以使用单点定位的计算结果^[25]。

2.3 虚拟参考站技术

虚拟参考站技术是网络 RTD 的一种实现方法，克服了单站差分定位中对基线长度的限制。网络 RTD 通常由参考站网、数据处理与控制中心、数据通信链路和

用户目标等部分组成^[12,25]。如图 2-1 所示，参考站网包括一个主参考站和若干个副参考站，共计至少需要 3 个基准站组成。数据处理与控制中心在接收到各个参考站的观测数据后，完成数据预处理和质量分析，并进行基线解算，解算结果用于参考站网范围内的各类系统误差的实时估计，并实现相应误差模型的建立，再通过数据通信链路传递给用户^[25, 39]。数据通信链路的架构设计通常需要结合实际应用场景，其核心由两大模块组成：首先是参考站网与数据处理中心之间的固定通信链路，这部分通常采用稳定的有线传输方式以确保数据质量；其次是数据中心与终端用户之间的动态通信链路，可根据用户的地理位置和使用场景灵活选择适宜的通信方案^[25]。在航天测控系统中，基准站通常采用 PDXP（Packet Data eXchange Protocol）协议，将观测数据封装为 RTCM 格式并传输至数据处理中心。同样，用户终端也可通过该协议向数据中心发送数据，并基于单点定位获取粗略坐标，再以 NMEA（National Marine Electronics Association）格式回传，以便数据中心进一步生成虚拟观测值^[13, 25]。

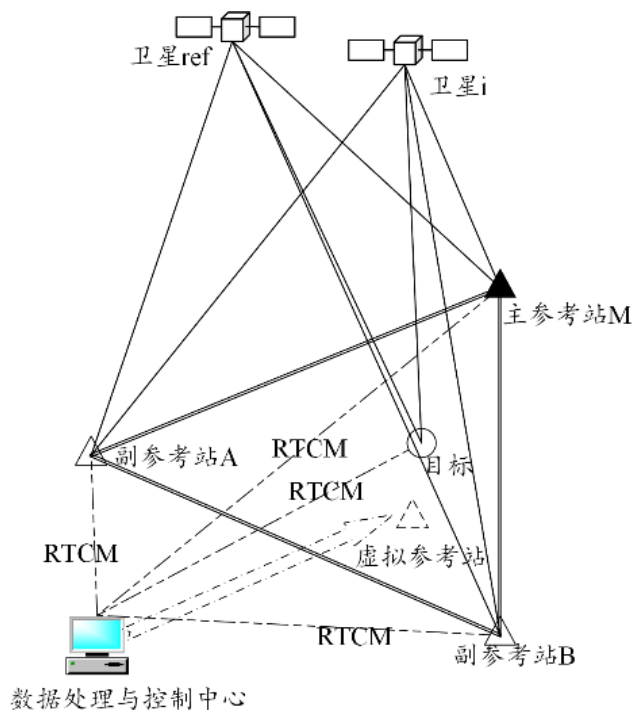


图 2-1 VRS 技术的网络结构^[25]

2.3.1 虚拟观测值模型

虚拟参考站（VRS）技术的实现流程可概括为以下步骤：首先，数据处理中心同步接收来自至少三个基准站的实时观测数据以及流动站的近似坐标。基于这些数据，系统建立区域性的空间相关误差修正模型，该模型综合考量电离层延迟、对流层延迟及多路径效应等误差源。随后，通过融合基准站观测数据、流动站近似坐标及误差修正模型，计算生成虚拟参考站的模拟观测值。最终，系统将生成的虚拟观测数据播发给终端用户，支持其进行短基线差分定位解算^[13,25]。

将(2.7)中的电离层延迟 I_i^p 和对流层延迟 T_i^p 统一表示为距离相关改正 U_i^p ，如图 2-1 所示，以三个参考站为例，即一个主参考站 M 与两个副参考站 A 和 B 构成基线 AM 和 BM ，那么距离相关误差的双差方程为^[25]

$$\nabla \Delta U_{A,M}^{ref,i} = \nabla \Delta P_{A,M}^{ref,i} - \nabla \Delta \rho_{A,M}^{ref,i} \quad (2.27)$$

$$\nabla \Delta U_{B,M}^{ref,i} = \nabla \Delta P_{B,M}^{ref,i} - \nabla \Delta \rho_{B,M}^{ref,i} \quad (2.28)$$

虚拟参考站与主参考站的关系与之类似^[25]：

$$\nabla \Delta U_{V,M}^{ref,i} = \nabla \Delta P_{V,M}^{ref,i} - \nabla \Delta \rho_{V,M}^{ref,i} \quad (2.29)$$

式中， P 表示伪距观测量， ρ 表示观测站与卫星间的几何距离， U 表示参考站间基线的距离相关误差， Δ 为站间单差标识， $\nabla \Delta$ 为站星双差标识，下标中 V 为虚拟参考站标识， M 为主参考站标识，上标 i 为卫星号标识， ref 为参考卫星标识。通常选择定位精度较高的参考站为主参考站，在实际应用中一般优先选择距离流动站较近的参考站^[25]。针对对流层和电离层的单差改正项，其计算过程通常基于主参考站与副参考站的双差观测值，通过内插展开的方式获得^[12,25]。

将(2.29)展开可以得到

$$(P_V^{ref} - P_M^{ref}) - (P_V^i - P_M^i) = \Delta \rho_{V,M}^{ref} - \Delta \rho_{V,M}^i + \nabla \Delta U_{V,M}^{ref,i} \quad (2.30)$$

由公式对应关系，可以得到非差伪距观测模型^[25]：

$$P_V^{ref} = P_M^{ref} + \Delta \rho_{V,M}^{ref} \quad (2.31)$$

$$P_V^i = P_M^i + \Delta \rho_{V,M}^i + \nabla \Delta U_{V,M}^{ref,i} \quad (2.32)$$

即生成虚拟参考站观测值需要以主参考站的观测值为基础，并加入站间-卫星间双差改正^[12]。

2.3.2 线性内插模型

获取(2.32)中的距离相关改正 U 是 VRS 技术中的关键问题。常用的方法有线性组合模型、线性内插模型、基于距离的线性内插模型和低阶曲面拟合模型等^[12,27]。其中线性内插模型（Linear Interpolation Model, LIM）由 Wanninger 于 1995 年提出，是一种用于计算内插改正数的经典建模方法。在现有的多种内插算法中，LIM 表现出较高的精度优势，其特别突出的特点在于对电离层延迟误差的有效修正能力^[25,27]。线性模型如下所示^[27]：

$$\begin{pmatrix} U_{1,M} \\ U_{2,M} \\ \vdots \\ U_{n,M} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X_{1,M} & \Delta Y_{1,M} \\ \Delta X_{2,M} & \Delta Y_{2,M} \\ \vdots & \vdots \\ \Delta X_{n,M} & \Delta Y_{n,M} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

其中下标 $1, 2, \dots, n$ 表示 n 个副参考站， $\Delta X_{i,M}$ 和 $\Delta Y_{i,M}$ 分别表示第 i 个副参考站与主参考站 M 的平面坐标之差， a 和 b 分别为相应的内插系数^[25]。

流动站处的残差项可通过内插模型的系数和基线误差之间的线性关系得到^[27]

$$U_{u,M} = a\Delta X_{u,M} + b\Delta Y_{u,M} \quad (2.34)$$

其中 $U_{u,M}$ 表示流动站与主参考站之间的综合误差的改正数, $\Delta X_{u,M}$ 、 $\Delta Y_{u,M}$ 和 a 和 b 分别表示流动站与主参考站的平面坐标差和相应的内插系数^[25]。

当副参考站数量不少于两个时,可以使用最小二乘法平差计算求得内插系数 a 和 b 的值:

$$\mathbf{p} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{U} \quad (2.35)$$

其中

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \Delta X_{1,M} & \Delta Y_{1,M} \\ \Delta X_{2,M} & \Delta Y_{2,M} \\ \vdots & \vdots \\ \Delta X_{n,M} & \Delta Y_{n,M} \end{pmatrix}, \mathbf{U} = \begin{pmatrix} U_{1,M} \\ U_{2,M} \\ \vdots \\ U_{n,M} \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

2.3.3 大气延迟改正模型

虽然短基线的大气延迟改正可以忽略不记,但是网络 RTD 参考站之间构成的基线往往并非短基线。此时的大气延迟不能忽略^[27]。大气延迟通过改正模型计算,得到(2.36)中的 \mathbf{U} 项。

2.3.3.1 电离层延迟模型

目前基准站的接收机通常为双频接收机,因为不同频率的电磁信号对电离层的敏感程度不同,所以可以利用同一个卫星的两个频率信号得到信号传播路径上的电离层延迟^[3]。无电离层组合是长基线电离层解算中最常用的方法^[27]。其数学模型为

$$P_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2 \quad (2.37)$$

其中 P_1 和 P_2 分别表示频率为 f_1 和 f_2 的观测值, P_{IF} 为 P_1 和 P_2 的线性组合。这种线性组合消除了一阶电离层延迟影响^[3]。

2.3.3.2 对流层延迟模型

对流层对导航卫星信号的影响可以表示为天顶方向的对流层延迟和投影函数的乘积,投影函数是卫星高度角的函数^[12]。对流层延迟分为流体静力学分量和湿分量。其中流体静力学分量又称为干分量,是 90% 的对流层误差来源^[3]。

霍普菲尔德通过高空气象资料,总结干延迟系数经验公式

$$H_d = 40136 + 148.72 \times (T_k - 273.16) \quad (2.38)$$

其中 T_k 为测站热力学温度。通过 H_d 可得测站天顶方向的对流层延迟干分量

$$T_{zd} = 1.552 \times 10^{-5} \frac{P_0}{T_{k0}} H_d \quad (2.39)$$

其中 P_0 和 T_{k0} 分别表示大地水准面处气压与热力学温度。

天顶方向的对流层延迟湿分量为

$$T_{zw} = 0.0746 \frac{e_{00}}{T_{k0}^2} H_w \quad (2.40)$$

其中 e_{00} 表示大地水准面水汽分压, $H_w=11000$ m。

综上所述可以通过霍普菲尔德经验模型与投影函数得到卫星的对流层延迟

$$T = T_{zd} F_d + T_{zw} F_w \quad (2.41)$$

其中 F_d 和 F_w 即为干分量和湿分量的投影函数。

$$F_d = \frac{1}{\sin \sqrt{\theta^2 + \left(\frac{2.5\pi}{180}\right)^2}} \quad (2.42)$$

$$F_w = \frac{1}{\sin \sqrt{\theta^2 + \left(\frac{1.5\pi}{180}\right)^2}} \quad (2.43)$$

其中 θ 表示卫星的高度角。

2.3.4 几何相关改正

由于卫星信号传播存在时延, 而虚拟参考站与主参考站具有不同的空间坐标, 导致信号到达两站的传播时间存在差异。这种时空差异会引起对应观测时刻卫星空间位置的显著变化, 特别是在长基线双差解算中, 该效应会对几何距离项产生显著影响, 可能引入分米量级的定位误差。^[25]

此外, 由于卫星轨道运动与地球自转存在相对运动, 在信号传播延迟期间, 地球自转导致地心地固坐标系 (ECEF) 发生旋转, 使得卫星发射时刻与信号接收时刻对应的坐标系产生偏移。这种坐标系旋转效应会同时影响主参考站和虚拟参考站的观测值。因此在计算几何距离项 $\Delta\rho$ 时必须引入地球自转改正, 以确保数据的精确性和可靠性^[12,13]:

$$\begin{pmatrix} X^i(t) \\ Y^i(t) \\ Z^i(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\omega\tau) & \sin(\omega\tau) & 0 \\ -\sin(\omega\tau) & \cos(\omega\tau) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^i(t-\tau) \\ Y^i(t-\tau) \\ Z^i(t-\tau) \end{pmatrix} \quad (2.44)$$

其中 ω 为地球自转角速度。 X^i 、 Y^i 和 Z^i 表示卫星 i 在地心地固系下的坐标。

2.3.5 VRS 中的双差观测模型

在数据处理中心于目标附近生成虚拟参考站后, 目标与虚拟参考站之间便可进行短基线的单参考站差分定位^[25]。双差观测模型如下:

$$\nabla \Delta P_{R,V}^{ref,i} = \nabla \Delta \rho_{R,V}^{ref,i} + \nabla \Delta U_{R,V}^{ref,i} \quad (2.45)$$

其中下标 R 为流动站标识, V 为 VRS 参考站标识。双差改正项 $\nabla\Delta U_{R,V}^{ref,i}$ 在短基线差分的情形中通常可以忽略, 虚拟参考站与卫星之间的几何距离可通过目标在该时刻给出的单点定位结果求得, 进而求得流动站的改正数^[12]。

在算法实现时需同步考虑流动站采样率与系统间偏差问题。针对站间差分处理, 当虚拟站与流动站采样率不一致时, 应选取最小差分龄期作为基准, 并设置适当的龄期阈值以保证定位精度。需特别注意的是, 受接收机硬件延迟差异影响, 即使不同导航系统信号频率相同, 其观测值仍不具备星间差分条件^[25]。这一特性要求在实际操作中需特别注意系统兼容性问题, 以避免因信号处理不当而影响整体性能。

2.4 本章总结

本章对比了四种卫星导航系统的时空基准及其转换关系, 为后续的多系统联合定位的实现提供了底层支撑。同时, VRS 生成原理和双差定位的基本原理为下一章 VRS 弹载 GNSS 差分技术的实现和程序设计提供了理论基础。

第3章 弹载接收机 VRS 差分定位算法

结合上述原理和方法，本研究设计了针对弹载接收机的 VRS 差分定位算法，并使用 C++ 程序开发和实现一套具备网络伪距差分处理功能的软件，并基于实测数据对自研软件处理性能进行系统验证。首先，本章介绍了弹载接收机 VRS 差分定位程序开发的技术路线，包括实时数据获取、数据预处理、伪距单点定位、利用多基站生成 VRS 和使用 VRS 与弹载接收机实现差分定位解算。其中最重要的工作内容是结合伪距单点定位结果利用多基站观测数据生成 VRS。

本研究通过以下方法验证算法模型的正确性：首先利用已知坐标的 CORS 基准站静态观测数据，将网络伪距差分定位解算结果与基准站的高精度坐标进行对比验证。考虑到弹道运动状态下难以获取精确的弹体坐标真值，且其他测量手段的精度相比 GNSS 定位无明显优势，因此对弹载接收机的精度评估以内符合精度为主要评价指标，同时以多源数据融合解算的综合轨迹作为外符合参考基准进行辅助验证^[25]。

3.1 GNSS 融合差分软件介绍

本研究所使用的自研软件是依托中国科学院上海天文台 GNSS 融合差分处理软件项目开发的。该软件可运行于中标麒麟操作系统，支持实时和事后两种模式的伪距和相位的 VRS 差分处理，实现 GNSS 差分增强，提升弹道测量精度。软件界面如下图所示。



图 3-1 融合差分软件界面

程序在接收到地面基准站数据与遥测设备转发来的弹载 GNSS 数据后，先对数据进行可用性预处理。随后处理基准站数据生成网络差分定位基线网，实现基准站区域误差建模；并对弹载接收机进行伪距单点定位，即获取流动站的概略坐

标作为 VRS 的坐标真值。通过区域误差模型与流动站概略坐标，内插出距离相关改正，进而生成虚拟观测值。得到虚拟观测值后，与弹载接收机进行短基线差分定位解算。若生成虚拟观测值或差分定位解算失败，则直接输出伪距单点定位结果作为定位解算结果结束程序。VRS 差分定位软件的流程如下图所示。

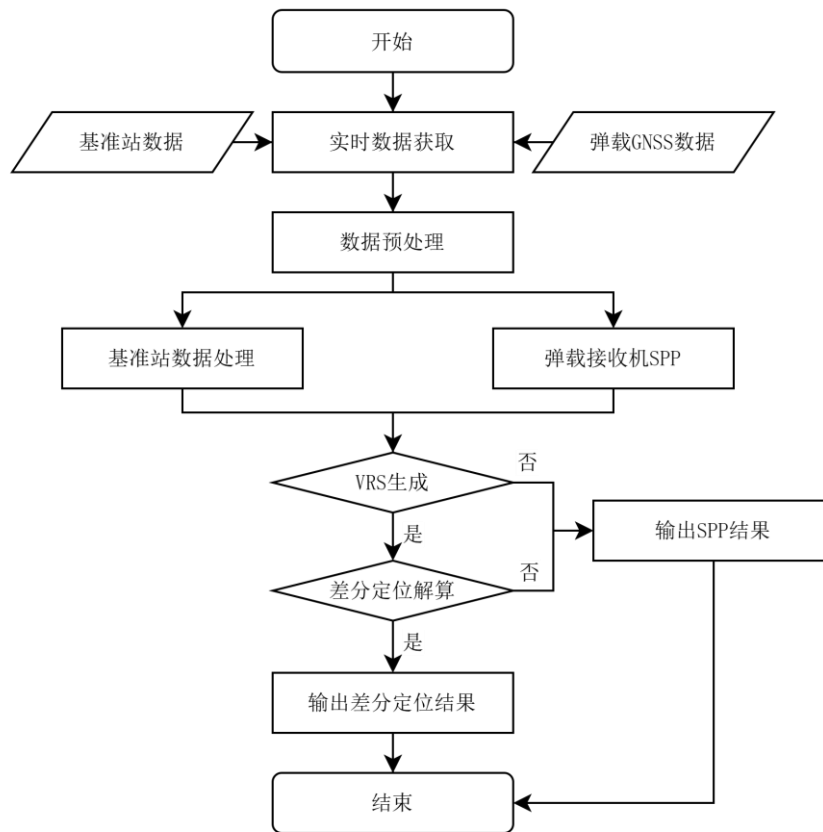


图 3-2 自研 VRS 网络差分定位程序流程图

3.1.1 实时数据获取

观测数据获取功能为根据系统配置，从数据库或文件中加载观测数据、导航电文以及气象等信息，然后按参考站、星等索引将数据保存到内存中，供后面数据处理模块使用。

观测数据获取的输入信息包括：

- 1) 原始观测数据，主要包括 GNSS 接收机多频伪距相位观测数据；
- 2) 导航电文信息，主要包括 GNSS 卫星导航电文信息；
- 3) 气象数据、设备工况等信息。

观测数据获取除了正常获数据外，还具备数据合理性检验，主要包括异常数据标识、无效数据剔除等初步检验功能。数据初步检验功能是对原始数据进行初步合理性和有效性检验，主要包括异常数据标识、无效数据剔除等。数据初步检验功能能及时发现不符合协议要求的数据，向业务监视发出告警报告。

3.1.2 数据预处理

对于弹载 GNSS 差分实时数据流，为保证解算的顺利和正确性，需要对数据进行预处理。主要包括两个模块，其一是弹载 GNSS 数据的解析与拼接模块，另一个是异常数据处理模块。

弹载实时 GNSS 数据通过多个遥测站接收并回传至处理中心。处理中心得到数据后，需要根据数据协议按位解析出各段数据流的含义。为获得完整轨迹，需对原始 GNSS 数据进行拼接。数据拼接以 GNSS 观测时间为索引，对同一台接收机在相同时刻仅保留一路回传数，冗余数据剔除前还进行一致性检验，保留测量数据较多的一路，并将其转换为通用的 RTCM 格式以便解算处理。若原始测量数据出现不一致，则发出告警并记录日志。

异常数据处理模块能够根据外部协议，判别数据包是否符合协议规定，若不符合，则进行告警处理。另外通过对数据质量差、数据输出率低、非整秒节点等类型数据进行剔除及告警处理。

3.1.3 伪距单点定位

自研程序中的伪距单点定位采用单频伪距作为观测值，采用 GPST 和 WGS-84 坐标系作为时空基准，使用最小二乘法估计弹载接收机位置和钟差在观测历元的最优解。解算流程如图 3-3。

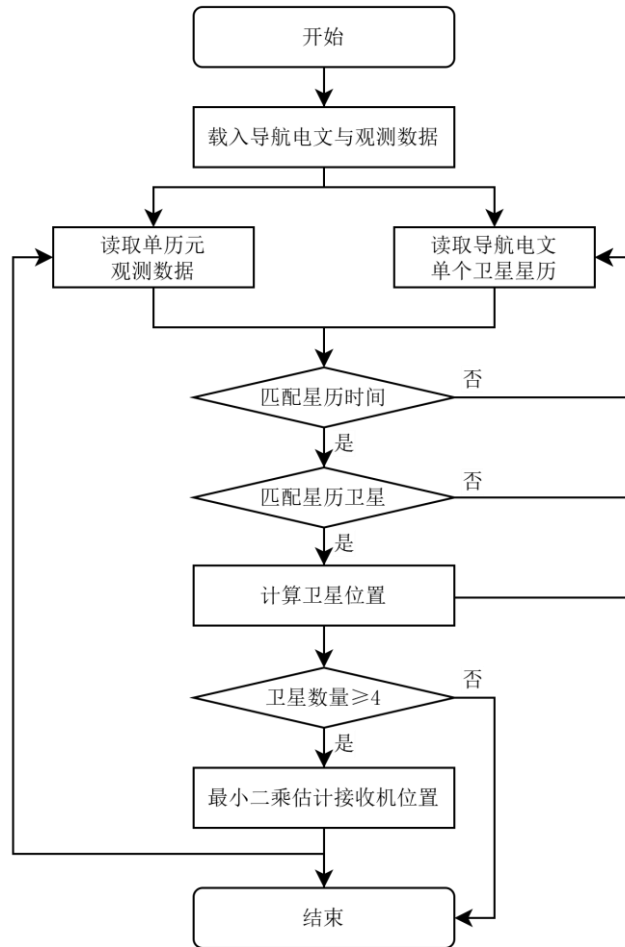


图 3-3 单点定位流程图

3.1.4 多基站融合 VRS 生成

VRS 技术利用多个参考站建立网络，实现网络区域内的距离相关误差建模，并内插出流动站概略坐标处的改正数，进而生成虚拟观测值。VRS 差分解算流程如下图所示。

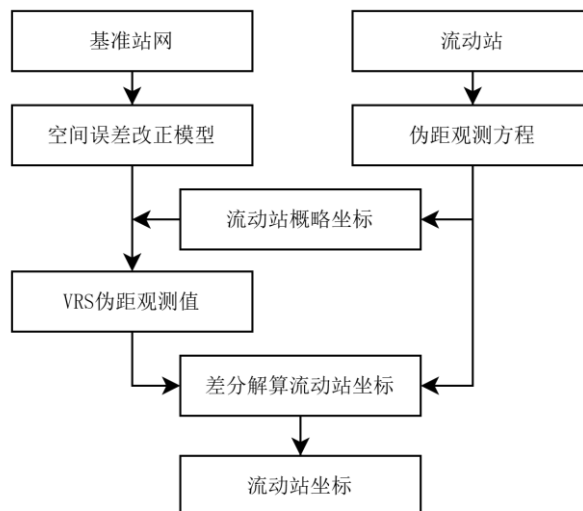


图 3-4 多基站融合差分解算工作原理

3.1.4.1 测站选取

连续采集基准站网各个参考站实时数据流,传输到综合分析中心的数据库,进行网络计算,并将测站划分成不同的三角形观测网。每个观测三角形边长 150 km,内角不超过 165° 。实时数据流要求包含观测数据、参考站精确坐标、广播星历、气象参数等。

3.1.4.2 VRS 生成

VRS 的生成是整个 VRS 差分定位系统中最关键的一个环节。本算法中 VRS 的生成流程如图 3-5。

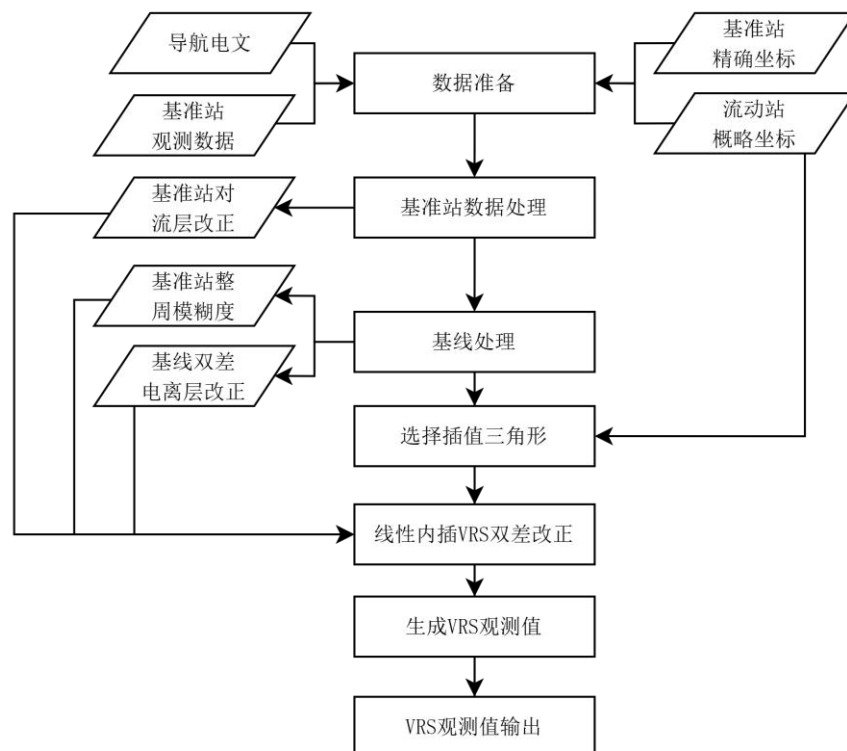


图 3-5 VRS 生成的技术构成

3.1.5 软件使用

现以香港卫星定位参考站网中的 CORS 测站为例,介绍融合差分软件的主要功能。

3.1.5.1 添加基准站

进入基准站配置,打开界面如图 3-6。在区域 2 中添加基准站的地心地固直角坐标等基本信息。

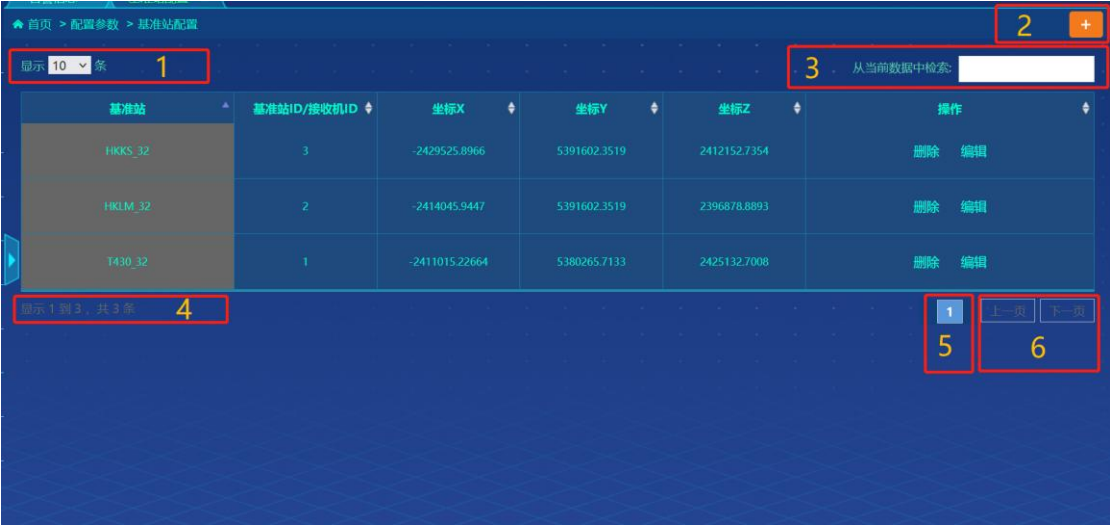


图 3-6 基准站配置界面

3.1.5.2 基准站状态查看

进入基准站状态查看界面，查看基准站数据链路状态。如图 3-7 所示，若基准站标志为绿色，表示融合差分软件已经和该基准站建立数据链路；若标志为红色，表示数据链路未建立。



图 3-7 基准站数据链路状态

3.1.5.3 实时任务建立与启动

在任务管理中完成任务配置，以实现差分定位的实时解算。配置界面如图 3-8 所示，软件可实现单点定位、伪距差分定位和相位差分定位三种定位模式。其中差分定位使用 VRS 定位技术。保存配置后，执行任务即可查看定位信息。以香港 CORS 网中测站为定位目标执行任务后，可在状态监视界面中查看各类信息，定位目标的星空图如图 3-9 所示，定位信息如图 3-10 所示。



图 3-8 新建任务



图 3-9 卫星天空图

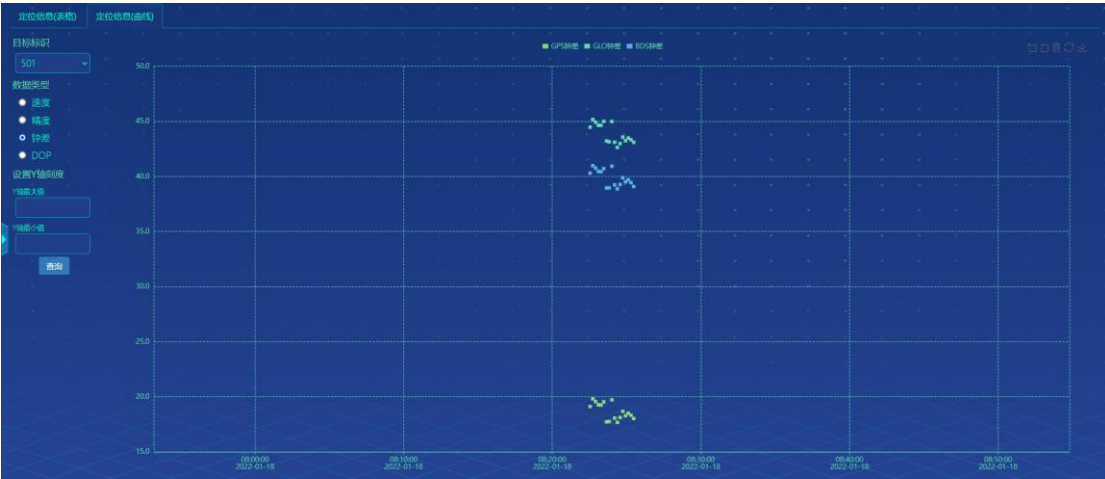


图 3-10 测站定位信息

3.2 静态数据验证

本研究采用的静态数据源自香港卫星定位参考站网发布的实时 RTCM 数据流。该参考站网自 2010 年投入运行以来,持续提供全天候不间断的高精度定位服

务。目前，其网络由 18 个分布合理的连续运行参考站（CORS）构成，能够同步接收并处理 GPS、GLONASS、Galileo 和北斗等全球四大卫星导航系统的观测数据。这些实时数据通过标准化的 NTRIP（Networked Transport of RTCM via Internet Protocol，基于互联网协议的 RTCM 网络传输）协议公开发布，用户只需完成简单的网络参数配置，即可便捷地接入并使用这些高质量的原始观测数据^[25]。

在本次定位算法验证中，所选取的参考站包括 T430、南丫岛和涠洲，流动站则选定为沙田^[25]。这些站点的具体分布位置已在图 3-11 所示的香港地图中标出，同时，参考站之间的基线长度也在图中明确标注。各站点的详细信息可参见表 3-1。

实验所使用的数据采样率为 1 Hz，观测时间选取为 UTC 时间 2022 年 11 月 6 日的 00:00:00 至 06:00:00。实验采用 GPS、GLONASS 以及北斗三系统进行联合定位^[25]。定位过程中，利用各接收机接收到的广播星历数据，卫星的截止高度角设定为 15° 。各系统采用基于高度角的定权方法，其中 GPS 系统和北斗系统的误差因子均设为 1.0，而 GLONASS 系统的误差因子则设为 1.5^[25]。

此外，实验中各接收机针对不同系统采用双频模式进行观测。具体而言，GPS 系统使用 L1 和 L2 信号，GLONASS 系统使用 G1 和 G2 信号，北斗系统则使用 B1 和 B2 信号^[25]。上述配置确保了实验数据的高精度与可靠性，为定位算法的验证提供了基础。

表 3-1 测站位置信息^[25]

站点名称	X(m)	Y(m)	Z(m)	天线高(m)
T430	-2 411 015.226 4	5 380 265.713 3	2 425 132.700 8	1.568 0
南丫岛	-2 414 045.944 7	5 391 602.351 9	2 396 878.889 3	0.008 3
涠洲	-2 429 525.896 6	5 377 816.636 0	2 412 152.735 4	0.008 3
沙 田	-2 417 142.871 8	5 382 345.473 0	2 415 036.945 9	0.008 3

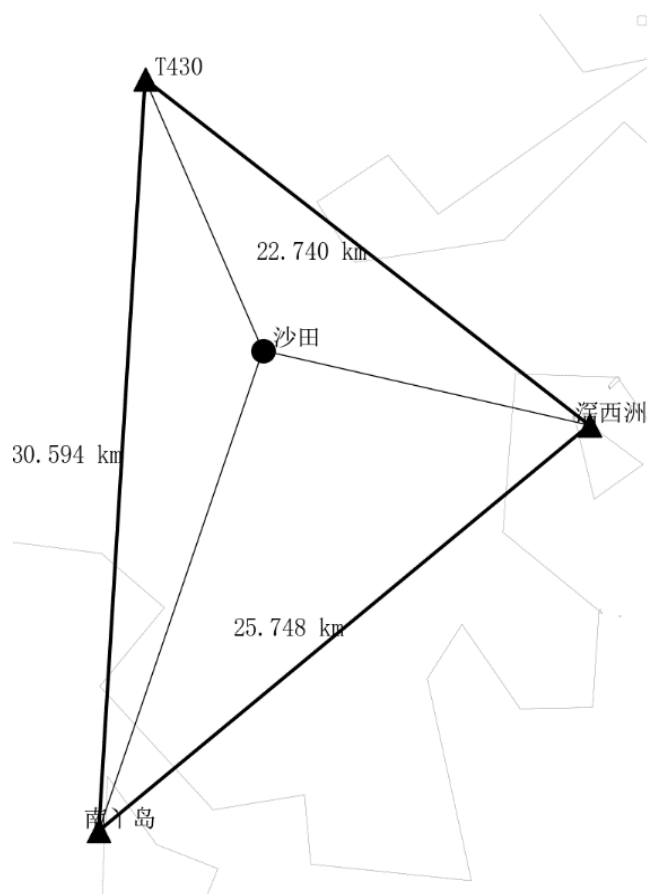
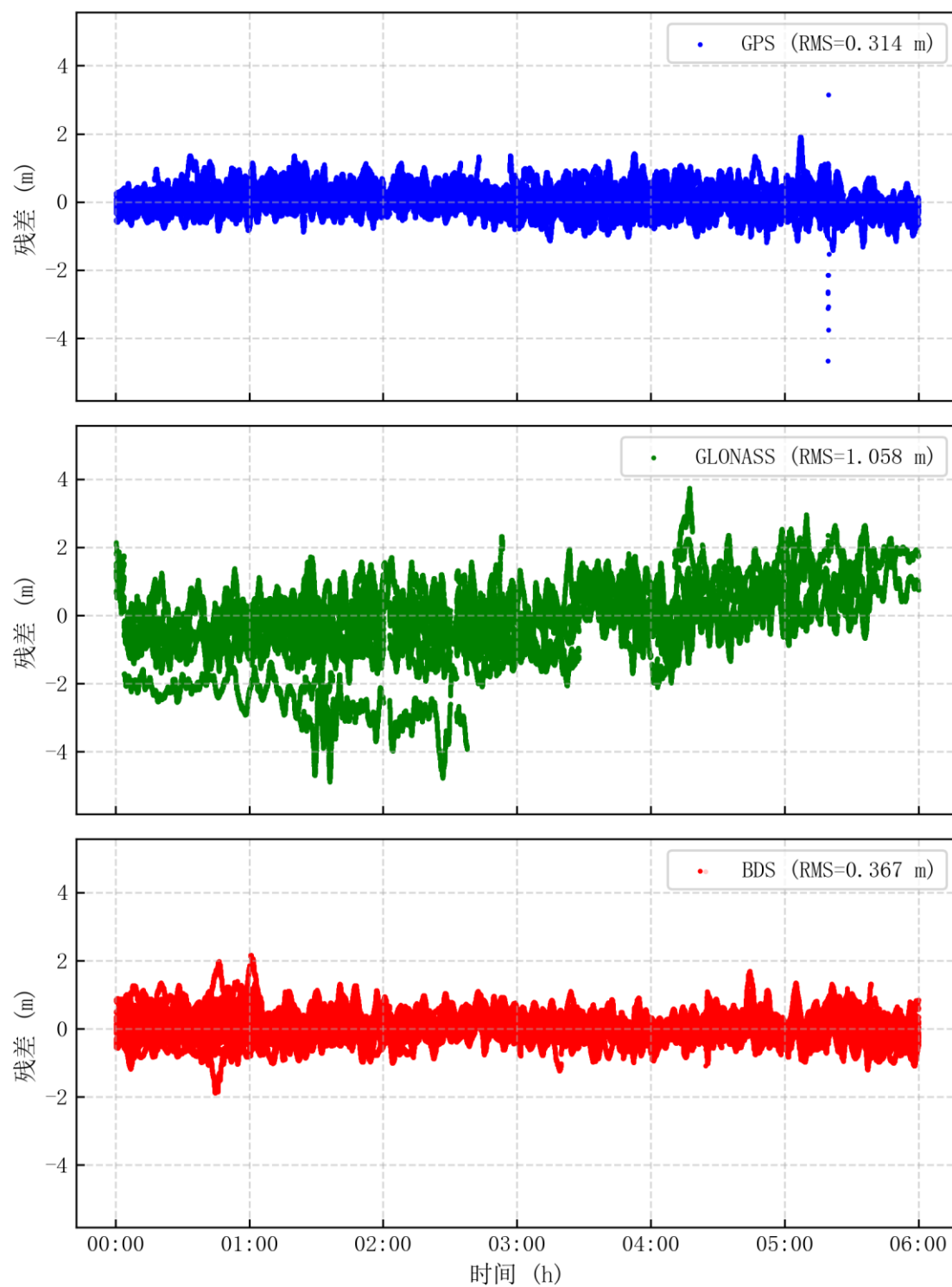
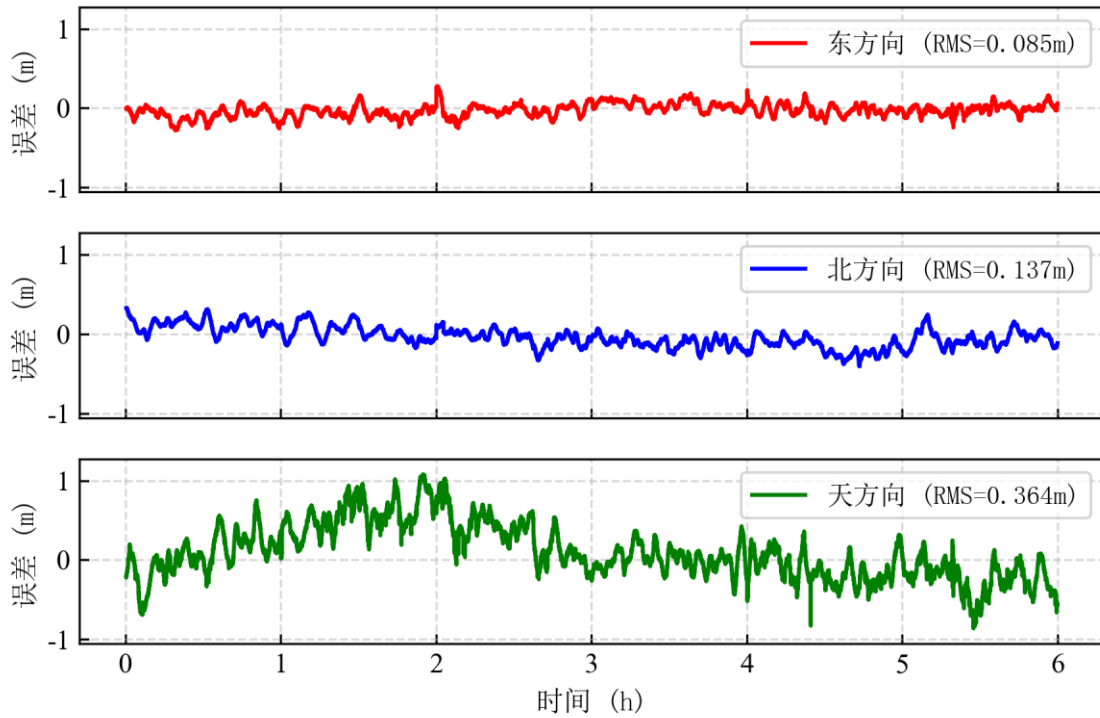


图 3-11 静态定位基线示意图

在解算过程中，共视卫星数量始终保持在 20 颗以上，PDOP 值稳定在 1.5 以内，数据完整性表现良好，未出现任何丢包现象。解算结果的伪距残差如图 3-12 所示，坐标误差则如图 3-13 所示。从结果可以看出，在以沙田真实坐标为原点建立的站心坐标系中，东、北和天三个方向的定位精度分别达到了 0.257 米、0.146 米和 0.267 米，三维均方根误差为 0.398 米^[25]。这一结果符合伪距差分定位技术所预期的分米级定位精度^[25]，充分验证了系统的可靠性和性能表现。

图 3-12 静态测站的伪距残差^[25]

图 3-13 静态站坐标误差^[25]

3.3 弹载接收机数据测试

对于弹载接收机而言，其特殊的运行环境与自身特性往往会导致数据质量显著下降。一方面，弹载接收机以极高的速度运动，并且当飞行高度远超地面站时，大气环境随高程的变化幅度远远超过水平距离上的变化。这种情况下，目标所在位置的大气状况与地面参考站的差异已十分显著，使得参考站间基线的空间误差相关模型难以准确反映目标的真实改正信息^[25]。另一方面，在实际测量中，实时数据流常因各种原因出现丢包现象，同时地面参考站的数据采样率与目标设备的采样率也存在不一致的情况^[25]。这些问题共同加剧了数据处理的复杂性，给精确分析带来挑战^[25]。

地面参考站的相对位置关系如图 3-14 所示。各参考站之间的基线长度均不超过 150 公里，且两条基线的夹角控制在 165° 以内^[25]。地面参考站的采样间隔为 30 秒，目标采样率设定为 0.2 秒。目标的运动总时长约为 7 分 16.2 秒。为确保数据的完好性，选取目标开始运动后 7 秒至结束前 30 秒的数据进行分析。蓝色实线表示目标投影在平面上的运动轨迹，其水平方向的投影向南延伸并超出图示范围。目标接收机支持 GPS 及北斗二代系统的信号接收^[25]。

伪距残差的具体分布如图 3-15 所示，每一历元的中误差则展示于图 3-16 中。以发射点为站心坐标系的原点，目标在站心坐标系下东、北、天三个方向的分量分别用红色、绿色和蓝色表示。从图 3-17 可以看出，位置中误差与可用共视卫星的数量密切相关。图中左侧纵轴表示可用共视卫星数量，以黑色曲线呈现；右侧纵轴则表示三维空间中的中误差，以红色曲线表示。数据分析表明，当可用卫星

数量不少于 6 颗时，三维空间的定位中误差可控制在 2.75 米以内。

进一步观察 PDOP 随时间的变化趋势（如图 3-18 所示），可以发现，随着动态目标逐渐远离地面参考站，共视卫星的 PDOP 值呈现出上升的趋势^[25]。这一现象反映了卫星几何分布对定位精度的重要影响。

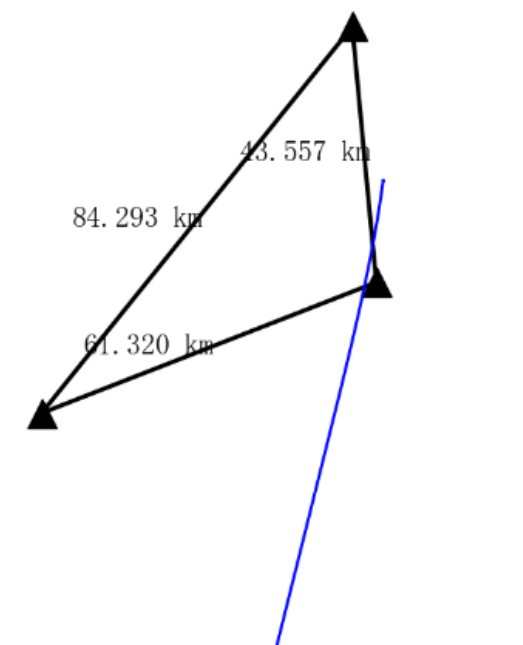


图 3-14 动态目标轨迹与基线^[25]

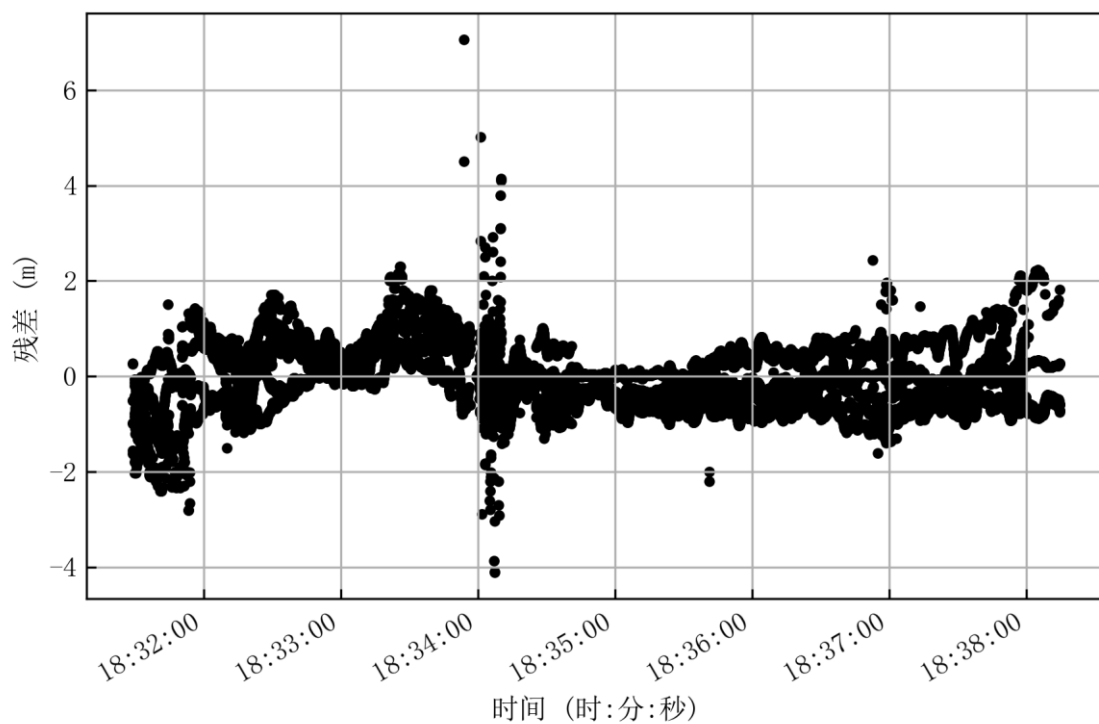


图 3-15 动态目标差分定位的伪距残差^[25]

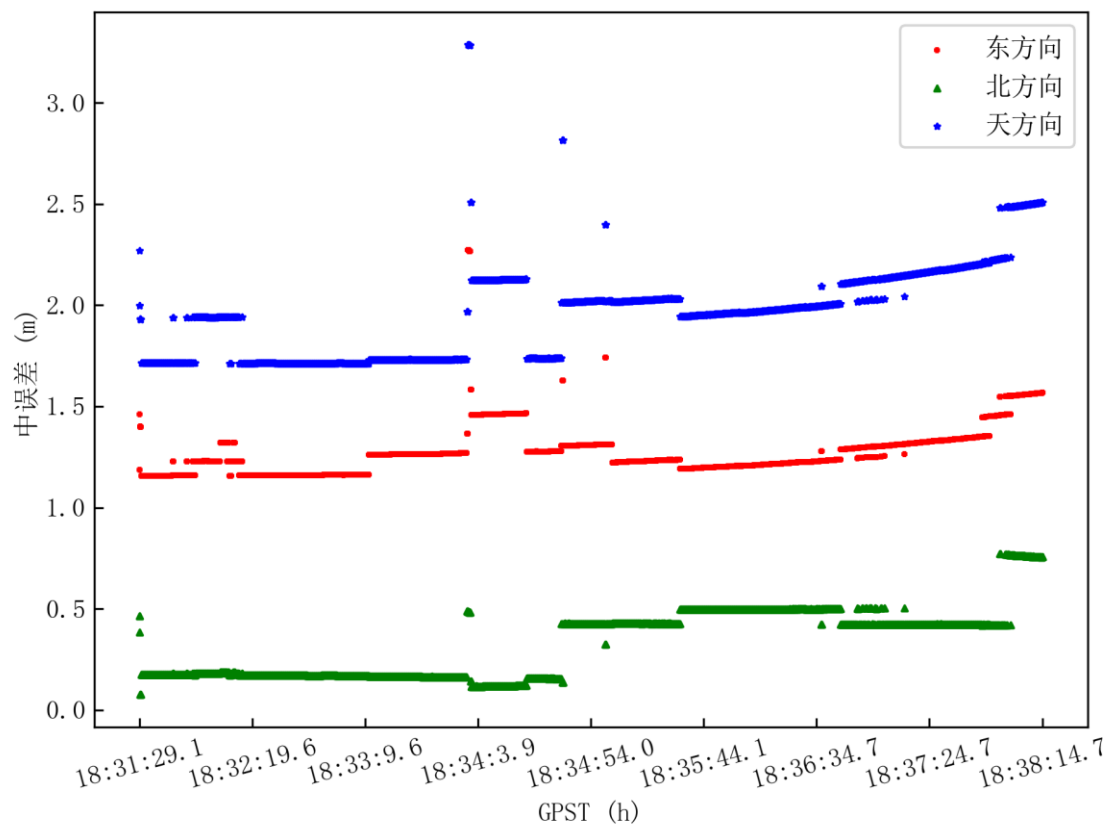


图 3-16 动态目标的定位中误差^[25]

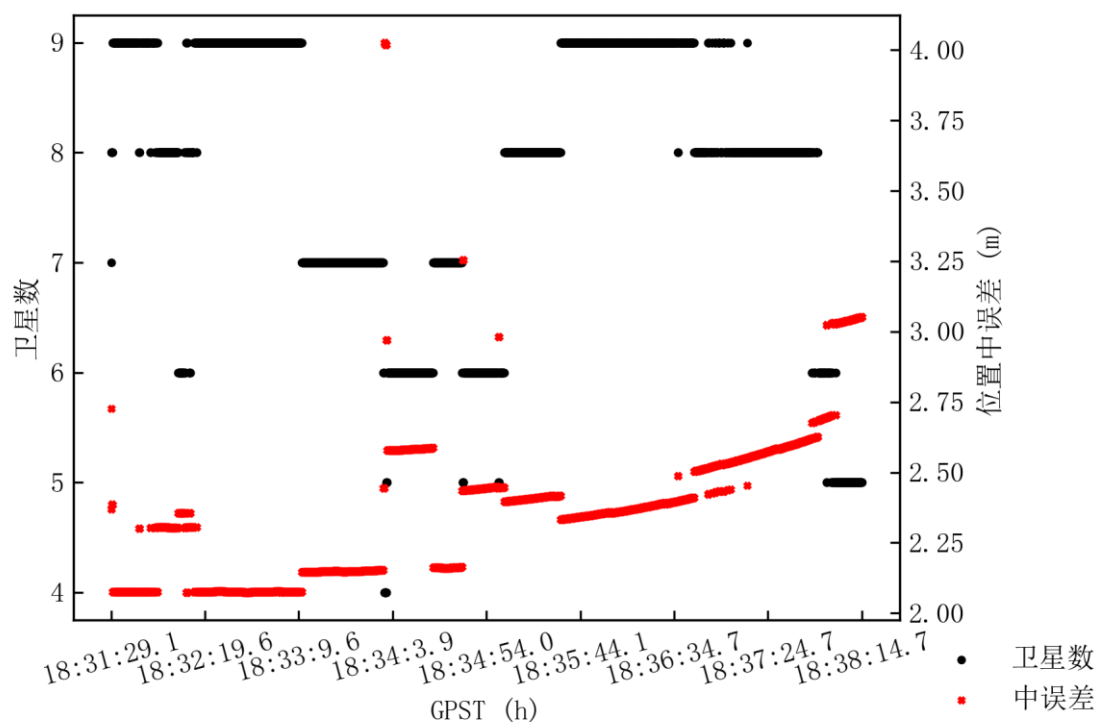


图 3-17 共视卫星与定位中误差的分布^[25]

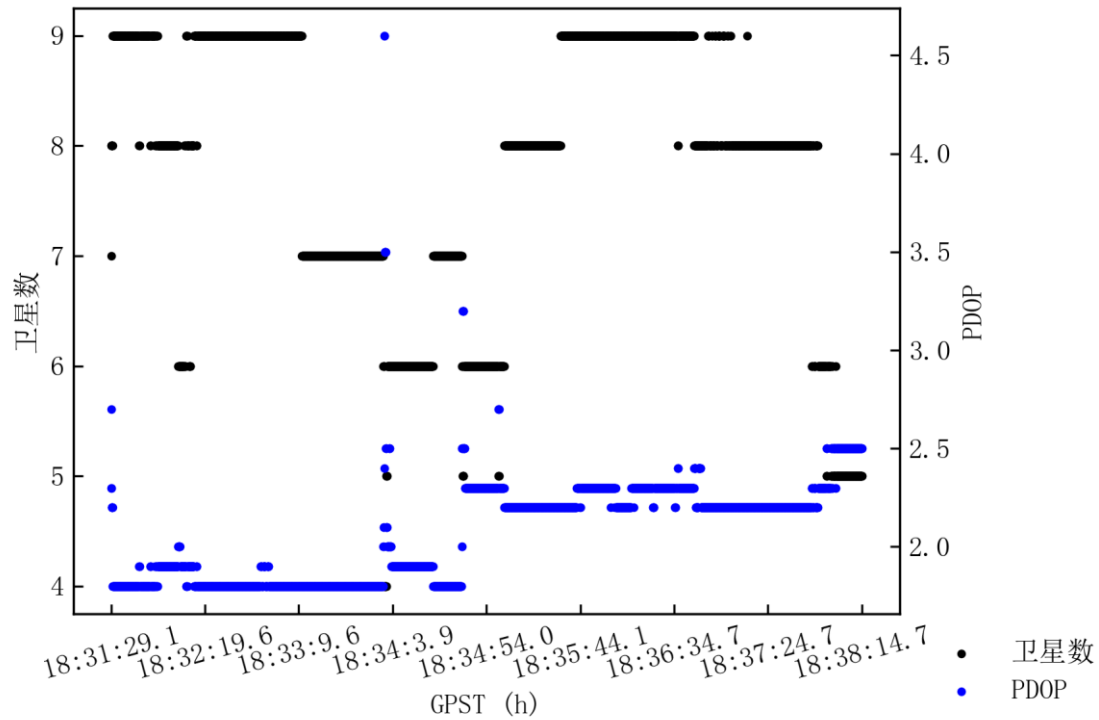
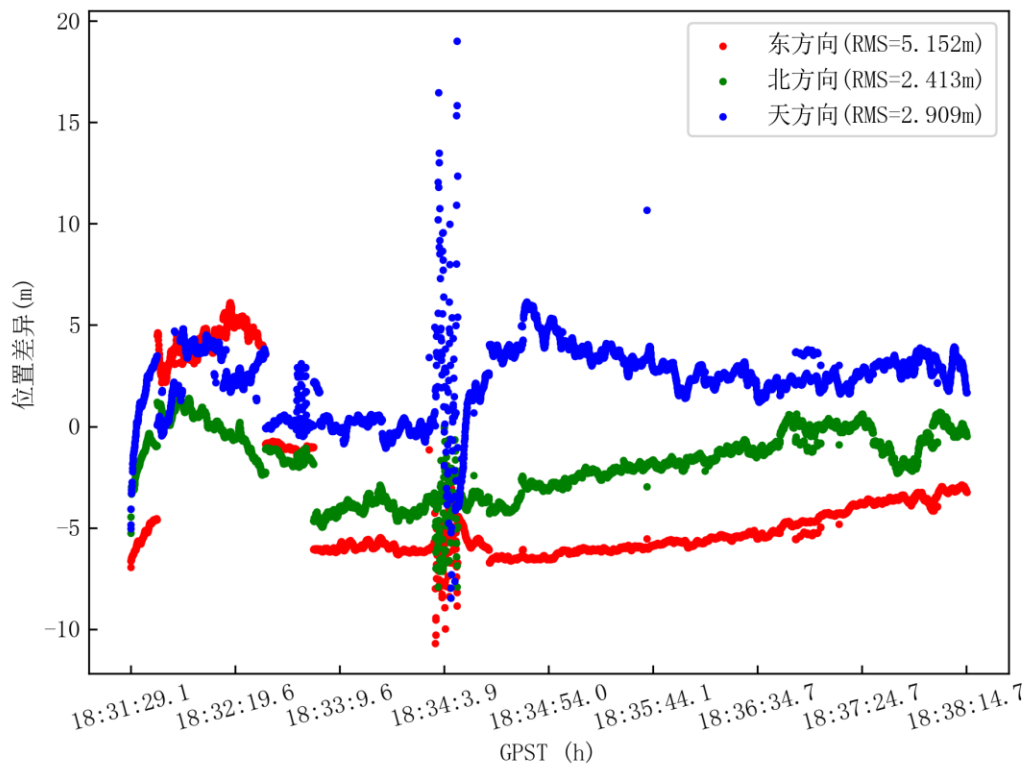


图 3-18 共视卫星与 PDOP 分布

在目标的实际运动过程中，现场还配备了光学雷达、测速雷达等多种外部测量手段对目标进行实时跟踪。通过选取不同阶段适用的外测数据，可以拼接生成一条综合轨迹。该综合轨迹的精度范围为 2~10 米。为进一步验证其准确性，将该综合轨迹与 VRS 差分解算轨迹进行对比，得到的对比结果如图 3-19 所示^[25]。

图 3-19 外测定位结果对比^[25]

从图 3-19 中可以观察到,通过对 VRS 差分与综合轨迹数据在三个方向上的对比分析,其均方根误差值均处于米级水平,而三维空间位置互差的均方根值为 6.390 米。考虑到综合轨迹测量误差同样处于米级范围,相较于 GNSS 并无显著优势,因此该结果主要作为参考依据。此外,在约 18:34:03.9 时刻附近,互差位置出现了明显突变。结合图 3-16 和图 3-17 进一步分析,这一突变的主要原因在于共视卫星数量骤降至 4 颗,恰好达到定位解算所需的最低要求^[25]。

深入探讨该时刻观测卫星数量减少的原因,可以发现这与目标在该时刻发生的机动行为密切相关。同时,在目标运动的后期阶段,卫星数量呈现下降趋势,且 PDOP (位置精度因子) 逐渐升高,这与目标运动路径以及路线上测站分布稀疏存在一定关联。上述现象充分表明,GNSS 定位方式对共视卫星数量具有较强的依赖性^[25]。

3.4 本章小结

本章详细阐述了 VRS 差分软件的设计思路,并通过静态数据定位验证,论证了虚拟参考站生成与网络伪距差分算法的正确性与可行性。实验结果表明,网络伪距差分技术能够实现分米级的定位精度。结合实测弹载数据的解算结果进一步分析发现,定位精度与目标及参考站之间的共视卫星数量密切相关。当共视卫星数量不少于 6 颗时,定位中误差可控制在 2.75 米以内。然而,相较于静态目标,弹载接收机在共视卫星数量受限的情况下,其定位精度在网络伪距差分模式中会出现一定程度的衰退^[25]。这一现象揭示了共视卫星数量对定位性能的关键影响。

第4章 峡谷 GNSS 参考站的非视距接收抑制

GNSS 差分定位解算高度依赖地面基准站的信息，弹载接收机运动速度快，对地面基准站的先验信息有着更高的精度要求。由于对定位服务覆盖范围的需求日益增加，许多地面基准站不得不建立在峡谷环境中。然而，在峡谷环境中使用 GNSS 接收机面临着很大问题。主要问题源于峡谷环境中障碍物引起的非视距接收，这会导致导航卫星信号的多路径效应、信号遮挡和衍射。这些因素大大恶化了峡谷环境中基准站的服务性能，从而降低了定位精度^[42]。对于非视距接收，一个简单且有效的方法就是直接剔除对应的导航信号。但剔除卫星又会带来新的问题，即提高 PDOP 进而降低定位精度。本章将对上述问题设计了一种针对地面基准站所处环境的定位随机模型来降低峡谷环境中非视距接收的影响，进而提高定位性能。

4.1 等效高度角随机模型

高度角随机模型是为导航卫星观测分配权重的常用方法。该模型根据当前历元各卫星对接收机的高度角，为每个观测卫星分配不同的权重。随机模型表达式如下^[42]

$$\sigma = \frac{a}{\sin^2 \theta} \quad (4.1)$$

其中 σ 表示非差非组合 GNSS 观测值的精度， a 为常数项系数， θ 表示观测卫星的高度角。

通常情况下，为了最大限度地减少来自低高度角卫星的多路径效应和来自地平线以下卫星的衍射信号的影响，GNSS 数据处理通常使用自然截止高度角剔除这些卫星。然而，在峡谷环境中，尤其是在城市峡谷中，障碍物也会遮挡 GNSS 信号，导致多路径效应和衍射，进而影响 GNSS 接收机的观测。因此，在这种情况下，障碍物可以被视为水平线的一部分。从 GNSS 接收机的角度来看，障碍物边界的高度角与其方位角相关。因此，有必要建立障碍物的高度角和方位角之间的关系，其中高度角称为地理高度角，随后与自然截止高度角相加。表达式如下^[10]

$$\tau' = \tau + \theta_{geo}(\omega_r^s), \quad \omega_r^s \in [0, 2\pi] \quad (4.2)$$

其中 ω_r^s 表示卫星 s 相对于接收机 r 的方位角， $\theta_{geo}(\omega_r^s)$ 表示地理截止高度角，对于特定地点是卫星方位角的函数， τ' 表示考虑到障碍物影响的截止高度角。另外， $\theta_{geo}(\omega_r^s)$ 蕴含着接收机附近障碍物的边界信息。因此 $\theta_{geo}(\omega_r^s)$ 的表达式应当基于接收机的周围环境来建立^[10]。

卫星相对于建筑物的高度角称为约束高度角^[10]，其表达式为

$$\bar{\theta}_{r,i}^s = \theta_{r,i}^s - \theta_{geo}(\omega_r^s) \quad (4.3)$$

其中 $\bar{\theta}_{r,i}^s$ 表示卫星 s 的 i 频点信号相对于接收机 r 的约束高度角, $\theta_{r,i}^s$ 表示卫星 s 的 i 频点信号相对于接收机 r 的高度角。卫星高度角必须大于自然截止高度角 τ , 同样地, 约束高度角同样也要大于自然截止高度角^[10]。

得到约束高度角后, 需要使用 SNR 对其进行评估和调整, 以得出最终的等效高度角^[10]。此评估方法的基础是模板函数。模板函数是在低 NLOS 环境中为指定接收机建立的 SNR -高度角函数关系。它包含相对于此函数的 SNR 观测的标准差 (STD), 其中 STD 也是高度角的函数。 SNR -高度角函数和 STD -高度角函数共同构成了模板函数。Zhang 等人使用三次多项式来拟合 SNR 观测值和 STD 以获得以下模板函数^[10]

$$SNR^*(\theta_{r,i}^s) = \alpha_1 + \alpha_2 \times \theta_{r,i}^s + \alpha_3 \times (\theta_{r,i}^s)^2 + \alpha_4 \times (\theta_{r,i}^s)^3 \quad (4.4)$$

$$STD^*(\theta_{r,i}^s) = \beta_1 + \beta_2 \times \theta_{r,i}^s + \beta_3 \times (\theta_{r,i}^s)^2 + \beta_4 \times (\theta_{r,i}^s)^3 \quad (4.5)$$

其中 $SNR^*(\theta_{r,i}^s)$ 与 $STD^*(\theta_{r,i}^s)$ 分别是 $\theta_{r,i}^s$ 的 SNR 及其 STD 的模板函数, $\alpha_i (i=1,2,3,4)$ 和 $\beta_i (i=1,2,3,4)$ 分别是三次多项式的拟合系数。

模板函数可以作为先验信息用于检测峡谷环境中 GNSS 接收机接收到的卫星信号中非视距接收, 并确定相应的等效高度角。如果在峡谷环境中观察到的 SNR 满足以下条件

$$\left| SNR(\bar{\theta}_{r,i}^s) - SNR^*(\bar{\theta}_{r,i}^s) \right| \leq k \cdot STD^*(\bar{\theta}_{r,i}^s) \quad (4.6)$$

其中 k 表示中误差的倍数, 取值为 1, 2, 或 3, 等效高度角便可取值为约束高度角^[10]。否则, 需要对约束高度角作出如下调整

$$\begin{cases} \bar{\theta}_{r,i}^s = \bar{\theta}_{r,i}^s - \delta, & SNR(\bar{\theta}_{r,i}^s) \leq SNR^*(\bar{\theta}_{r,i}^s) \\ \bar{\theta}_{r,i}^s = \bar{\theta}_{r,i}^s + \delta, & SNR(\bar{\theta}_{r,i}^s) > SNR^*(\bar{\theta}_{r,i}^s) \end{cases} \quad (4.7)$$

其中 δ 是调整常量, 根据模板函数的分辨率而确定。通过(4.7)的调整, 直到满足(4.6)为止, 便可得到最终的等效高度角。若调整到高度角的最小值 τ 或最大值 90° 依然不满足(4.6), 那么等效高度角便取值为这个最小值或最大值。将最终的等效高度角视为高度角定权方法的自变量, 通过(4.1)求得每个卫星在同频点的信号的权重^[10]。

4.2 顾及 PDOP 的随机模型

建立 PDOP 随机模型的一个主要思路是增加关键卫星的权重, 关键卫星即对 PDOP 值具有显著贡献的卫星。首先需要计算 PDOP 的基函数^[24]

$$f(PDOP) = \begin{cases} \frac{1}{k_i^\beta}, & k_i^\beta \leq \gamma \\ \frac{1}{\gamma}, & k_i^\beta > \gamma \end{cases} \quad (4.8)$$

其中 β 是调节参数, 可根据实际需要取值 1, 2 或 3, γ 是为防止过度放大而设置的阈值, k_i 表示卫星 i 对于 PDOP 的贡献, 其可通过下式计算^[24]

$$k_i = \frac{PDOP_i}{PDOP_{all}} \quad (4.9)$$

其中 $PDOP_i$ 表示剔除卫星 i 之后的 PDOP 值, $PDOP_{all}$ 表示未剔除卫星的 PDOP 值。

PDOP 的计算需要估计参数的协方差矩阵, 由以下公式给出^[31]

$$PDOP = \sqrt{Q_{xx} + Q_{yy} + Q_{zz}} \quad (4.10)$$

其中不同的下标表示三个坐标参数对应的方差。

顾及 PDOP 的随机模型便可表达为^[24]

$$\sigma_{PDOP}^2 = f(PDOP) \times \sigma^2 \quad (4.11)$$

其中 σ_{PDOP}^2 表示顾及 PDOP 的观测精度, σ^2 表示未顾及 PDOP 的观测精度。其中 σ^2 的值可在计算等效高度角之后, 利用(4.1)来求得。

4.3 方位角阈值

在 GNSS 定位中, 需要设置一个自然截止高度角作为所有导航卫星的最小高度角。高度角低于此阈值的卫星应被剔除。由于信号衍射和大气折射, 一些地平线以下的导航卫星信号可能仍被 GNSS 接收机接收到, 导致观测出现较大误差, 从而降低定位精度。在峡谷环境中, 峡谷内障碍物的上边缘实际上成为新的地平线, 使截止高度角等于(4.2)中定义的 τ' 。

然而, 峡谷环境中障碍物的情况更为复杂。图 4-1 说明了由障碍物上边缘和侧边缘的衍射信号引起的错误观测, 特别是在多个障碍物之间存在显著高度差异的情况下。需要适当处理来自障碍物侧面边缘的衍射信号。因此, 考虑到截止高度角可以有效抑制衍射信号的影响, 本研究考虑了在峡谷环境中为导航卫星信号设置方位角阈值的方法。需要注意的是, 与截止高度角不同, 障碍物有两条边, 而不仅仅是一条边。因此, 阈值需要同时考虑左方向和右方向^[42]

$$\begin{cases} \alpha_{left} = \omega_{obstruction}^- - m \\ \alpha_{right} = \omega_{obstruction}^+ + m \end{cases} \quad (4.12)$$

其中 α_{left} 和 α_{right} 分别表示接收机可用的方位角范围边界, $\omega_{obstruction}^-$ 和 $\omega_{obstruction}^+$ 分别是接收机视角下的建筑物边界方位角。 m 表示方位角阈值。若卫星方位角满足条件

$$\alpha_{left} < \omega < \alpha_{right} \quad (4.13)$$

则剔除该卫星。

然而，设置方位角阈值可能会导致 PDOP 的增加，从而由于排除卫星而使定位精度恶化。相反，如果不应用方位角阈值，PDOP 随机模型可能会增加受衍射信号影响的卫星的权重，这也可能会对定位精度产生负面影响。因此，方位角阈值和 PDOP 随机模型的使用可能会相辅相成，建议同时使用这两种方法。

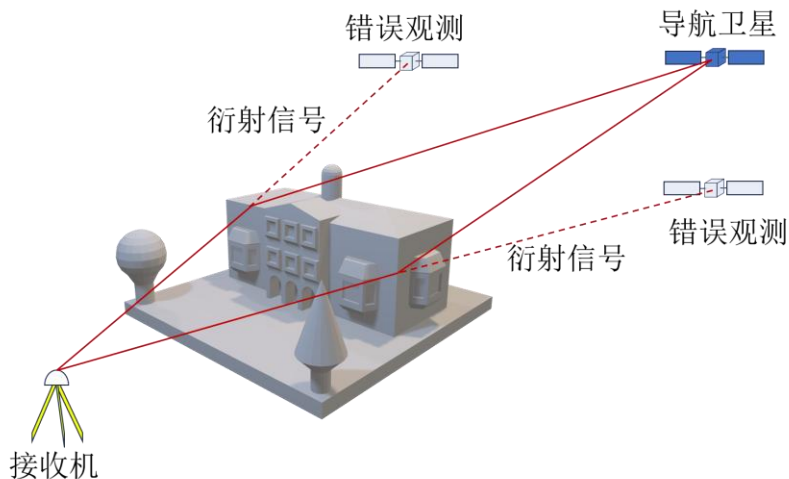


图 4-1 衍射信号示意图

4.4 计算验证

此实验需要在有信号障碍物的环境中进行测量。本研究选择了香港卫星定位参考站网络(SatRef)的大老山站(TCHK)进行实验。该站是香港 CORS 网络的一部分，该测站使用带有 Leica AR25.R4 天线的 Trimble Alloy 接收机^[41]。TCHK 位于大老山气象站香港天文台附近，如图 4-2 所示。

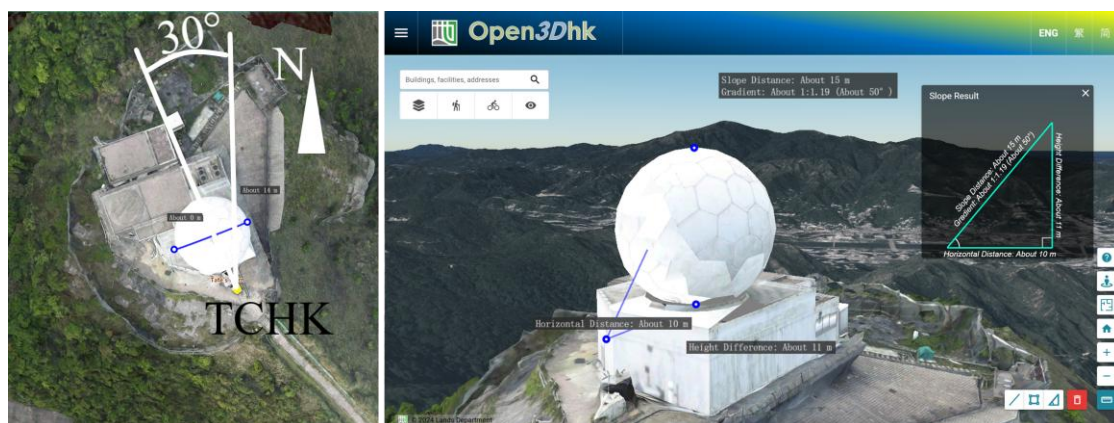


图 4-2 TCHK 的障碍物信息^[45]

4.4.1 障碍物方位角函数

首先，需要根据 TCHK 附近的建筑物建立地理高度角的函数表达式。TCHK 周围障碍物的资料可参阅香港地政署公开发放的三维数码地图。三维地图显示 TCHK 站附近唯一的障碍物是一座球形建筑，其他方位为开放的视野。球形建筑

具体信息如图 4-2 所示，左图中 TCHK 用黄色标记表示，障碍物中心的方位角为 330° ；通过右图可知，球体半径 R 约为 7 m，球心到接收机的水平距离 D 为 10 m，球心与接收机高差 H 为 4 m。

假设这个球形建筑物是唯一的障碍物，并且是一个规则的球体。当从接收机到卫星的视线与球体相切时，认为切点连线是被遮挡区域的边界。根据几何关系，从接收机到遮挡区域边界上的点的距离 r 为：

$$r = \sqrt{H^2 + D^2 - R^2} \quad (4.14)$$

将(4.14)代入球体的球坐标方程中，可以得到障碍物的遮挡区域边界方程

$$f(\theta, \omega) = \frac{H^2 + D^2 - R^2}{(D \cdot \cos \theta \cdot \cos(\omega - \omega_0) + H \cdot \sin \theta)^2} - 1 \quad (4.15)$$

其中 θ 为建筑物的高度角， ω 为建筑物的方位角， ω_0 为球心的方位角。方程 $f(\theta, \omega) = 0$ 表示接收机视角下的建筑物边界。若满足 $f(\theta, \omega) < 0$ ，则说明处于 (θ, ω) 位置的卫星处于被建筑物遮挡的范围内。

4.4.2 模板函数的建立

在确定接收机和天线的类型后，必须为特定的接收机和天线建立模板函数。模板函数的确定需要在低 NLOS 环境中收集 SNR 观测数据。为此，使用位于澳大利亚塞杜纳的 IGS 站 CEDU00AUS，它配备了相同的 Trimble Alloy 接收机和 Leica AR25.R4 天线。使用 2024 年第 183 天的连续 24 小时 SNR 观测值，采样间隔为 1 s。数据包括对 GPS L1(1572.42 MHz)和 L2(1227.60 MHz)频率以及 Galileo E1(1572.42 MHz)和 E5b(1207.14 MHz)频率的观测。

在确定模板函数时，应该分别考虑不同的导航星座。即使在同一个导航星座中，也要根据卫星天线的不同分别建立不同的模板函数。例如，在 Zhang 等人的研究中，注意到在 GPS 星座中，Block IIR 卫星的 L2 频率的模板函数和其他类型卫星的模板函数存在差异。随着导航星座的发展，对于 GPS 星座，L2 信号已经不能简单地根据卫星是否为 Block IIR 类型来区分，因为 SNR-高度角分布现已表现出多种不同的趋势。这意味着应该为各种类型的 GPS 卫星建立模板函数。本研究将 GPS 卫星分为四类：Block IIR、Block IIR-M、Block IIF 和 Block III。对于伽利略星座，卫星分为两种类型：在轨验证(IOV)卫星和完全能力(FOC)卫星。目前，在轨有 3 颗 IOV 卫星，伪随机噪声(PRN)代码为 E11、E12 和 E19，其余为 FOC 卫星。观察到 IOV 和 FOC 卫星的模板函数在 E1 和 E5b 频率上不同。因此，有必要为伽利略系统中 E1 和 E5b 频率的 IOV 和 FOC 卫星建立单独的模板函数。

基于模板函数的分类原则，本研究还应用最小二乘法，使用三次多项式在低 NLOS 环境中拟合数据，从而获得拟合系数。表 4-1 给出了(4.4)和(4.5)的系数。

表 4-1 模板函数的系数

分类	α_1	α_2	α_3	α_4	β_1	β_2	β_3	β_4
GPS L1	35.694	0.362	2.943×10^{-3}	1.650×10^{-6}	2.528	-0.125	2.853×10^{-3}	-1.937×10^{-5}
GPS Block IIR L2	15.667	0.493	4.913×10^{-4}	-3.958×10^{-5}	2.771	-0.075	1.108×10^{-3}	-6.542×10^{-6}
GPS Block IIR-M L2	28.193	0.377	1.387×10^{-3}	-4.629×10^{-5}	2.374	-0.107	1.944×10^{-3}	-1.165×10^{-5}
GPS Block IIF L2	27.791	0.396	1.397×10^{-3}	-3.977×10^{-5}	2.867	-0.139	3.089×10^{-3}	-2.154×10^{-5}
GPS Block III L2	17.015	0.618	-6.119×10^{-3}	2.404×10^{-5}	2.604	-0.107	1.863×10^{-3}	-1.092×10^{-5}
Galileo FOC E1	39.502	0.277	-1.219×10^{-3}	-9.247×10^{-6}	1.835	-0.085	1.854×10^{-3}	-1.232×10^{-5}
Galileo FOC E5b	41.188	0.202	-9.095×10^{-4}	-2.055×10^{-5}	1.417	-0.060	1.081×10^{-3}	-6.404×10^{-6}

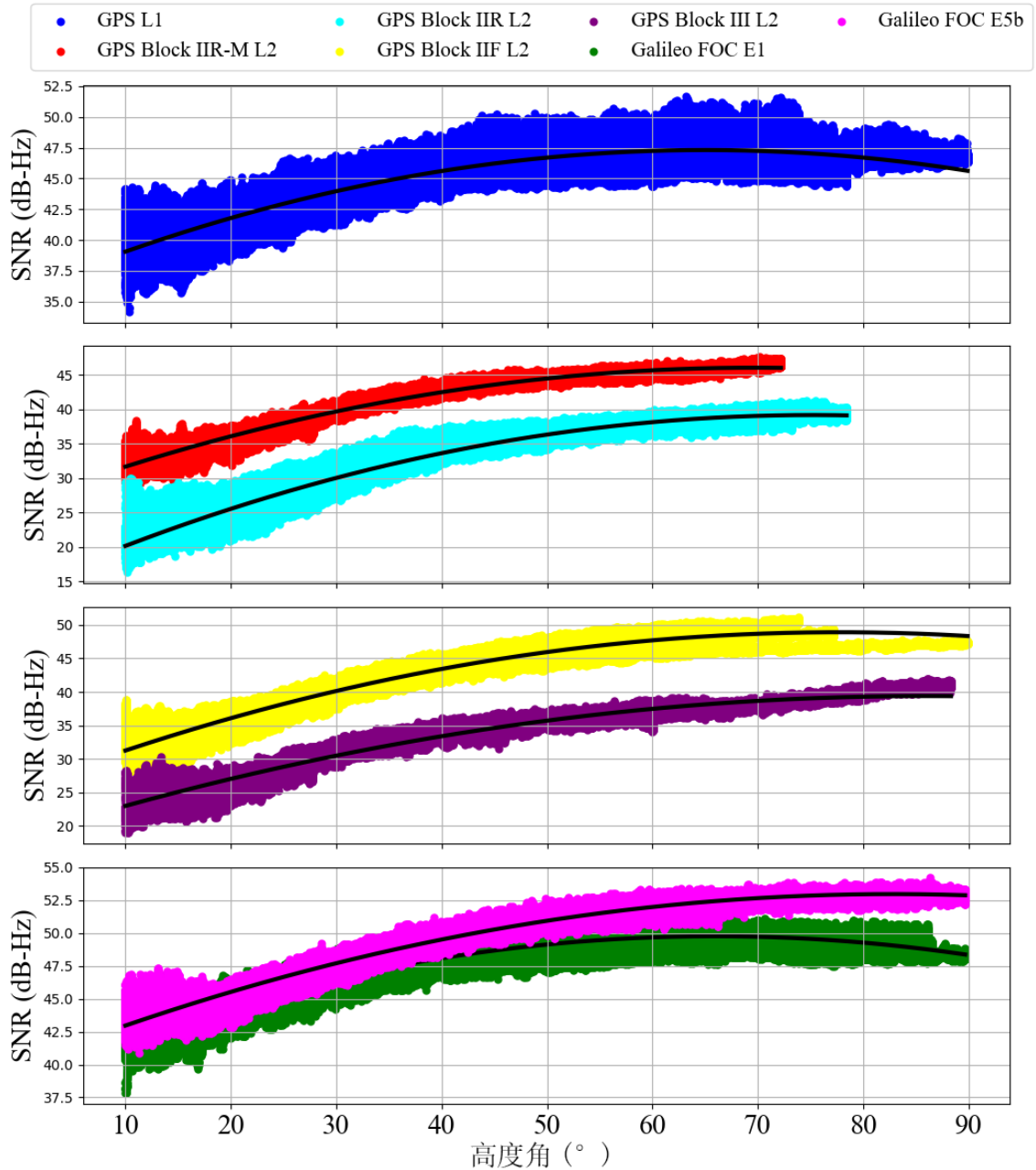


图 4-3 SNR 模板函数曲线

表 4-1 中没有给出伽利略星座中 IOV 卫星的模板函数的原因是, IOV 卫星

只有三颗，且它们的模板函数不一致。排除 IOV 卫星对定位结果的影响很小，因此，本研究不考虑 IOV 卫星。图 4-3 给出了低 NLOS 环境中的 SNR 观测结果，以及 GPS 和 Galileo 星座中各种类型卫星的模板函数。可以看到，对于 GPS L1 信号，所有卫星在 SNR-高度角关系中表现出相同的趋势。但是，对于 L2 信号，趋势因卫星类型而异。具体来说，被归类为 Block IIR、Block IIR-M、Block IIF 和 Block III 的卫星各自表现出不同的趋势，表明需要不同的模板函数。同样，Galileo 的 FOC 卫星需要为 E1 和 E5b 信号提供单独的模板函数。

4.4.3 定位性能分析

本研究使用了大老山站在 2024 年年积日 183 天 02:00:00 到 22:00:00 共 20 小时，采样间隔为 30s 的数据进行了分析。实验的处理策略见表 4-2，其中部分模糊度固定使用较为简单的高度角选择原则，即卫星高度角在高于 35° 时才固定整周模糊度。而 STD 计算的高度角分辨率为 0.01° ，高度角定权模型中 a 的值取为 0.005，(4.6)中 k 取值为 3，(4.7)中 δ 取值为 1，(4.8)中 β 取值为 2， γ 取值为 10。

表 4-2 处理策略

项目	描述
定位模式	RTK
TCHK 参考坐标	(-2421068.4081,5382639.8524,2411312.1769)
HKST 参考坐标	(-2417143.6676,5382345.2053,2415036.6620)
差分基线长度	5.419 km
使用信号	GPS L1, GPS L2, Galileo E1, Galileo E5b
自然截止高度角	10°
方位角阈值	10°
电离层模型	单层模型
对流层模型	Niell 映射函数与全球映射函数
Ratio 值	2.0

卫星星空图与建筑物关系如图 4-4。其中红色区域为障碍物遮挡区域，蓝色虚线表示考虑方位角阈值的卫星剔除边界。可以看出，阴影区域的卫星信号信噪比强度明显弱于同高度角的其他区域，并且信号强度不稳定。而阴影区域之外、蓝色虚线以内同样存在 SNR 值不稳定的现象。说明建筑物区域及其边界附近出现了 NLOS 接收，例如接收机因为信号的衍射现象仍然可以接收到被遮挡的卫星信号，以及经过建筑物反射而抵达接收机的多路径效应。

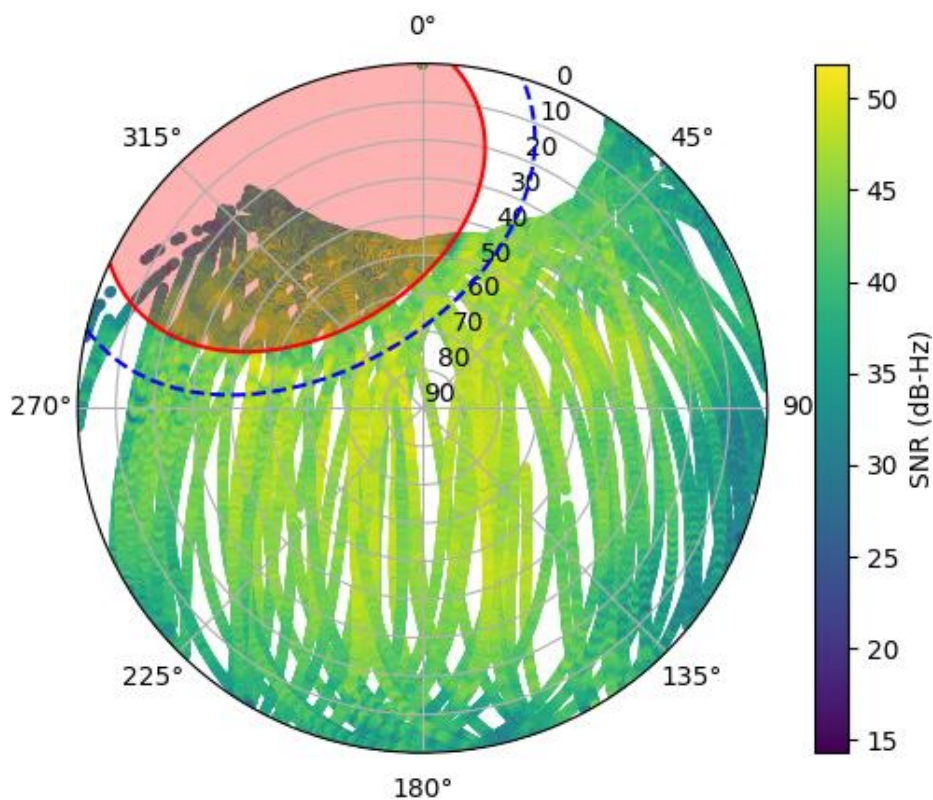


图 4-4 卫星轨迹与遮挡区域天空图

TCHK 站的实测 SNR-高度角分布如所示。可以看到，因为存在障碍物的遮挡引起的 NLOS 现象，SNR 出现了较大的波动，明显与低 NLOS 下的 SNR-高度角分布不同。这种不正常现象在高度角低于 60° 时十分显著，甚至于 Galileo 系统而言，即使是在更高的高度角范围，SNR 分布随高度角变化趋势本应不同的 E1 与 E5b 信号却出现了重合。因此，在低 NLOS 环境中通过 SNR 观测值建立模板函数对存在遮挡环境中的 NLOS 效应修正具有极大的意义。

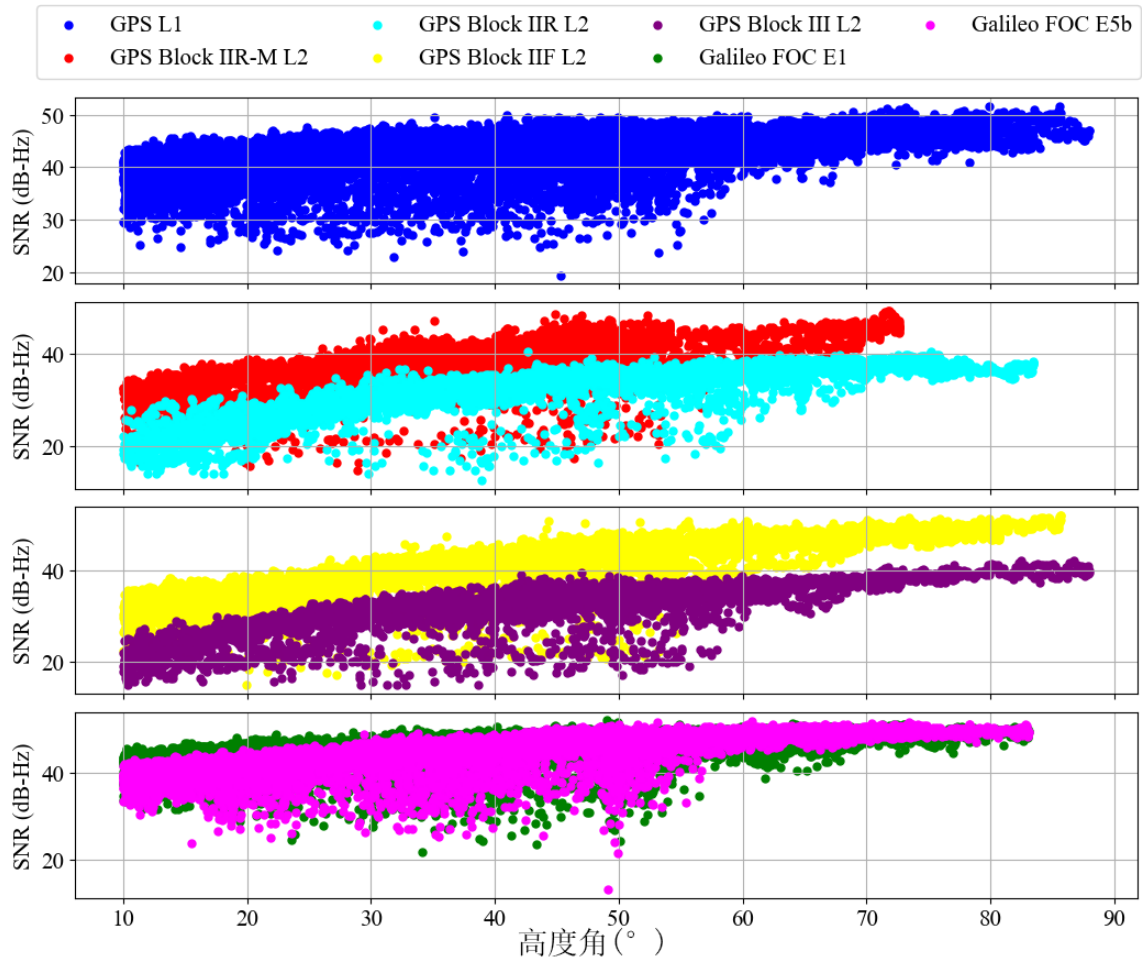


图 4-5 TCHK 实测 SNR 与高度角关系

为了对比本文提出的考虑到方法与先前方法的差异，本研究使用了定位算法常用的高度角随机模型(ELEM)，即(4.1)所确定的，由卫星高度角决定各卫星在定位解算中的权重；Zhang 等人利用三次多项式建立模板函数的等效高度角随机模型(COPM)，该方法可以视为 ELEM 方法的扩展；在 COPM 方法的基础之上，本研究设置了方位角阈值的随机模型(COAM)，通过添加方位角阈值以增强峡谷环境中的鲁棒性；在 COPM 方法基础之上又设置了考虑 PDOP 随机模型的方法(DOPM)；以及在 COPM 基础之上同时考虑方位角阈值和 PDOP 随机模型的方法(CAPM)。并将这五种方法的定位结果进行了对比，用于验证本文提出的方法的有效性，重点关注了方位角阈值的效果以及考虑了 PDOP 随机模型之后对于精度的改进。表 4-3 与图 4-6 给出了本文提出的方法与先前方法得到的定位误差的对比。图 4-7 给出了不同方法使用的卫星数量 NSAT 与 PDOP 分布，紫色表示 NSAT，洋红色表示 PDOP 值。CAPM 和 COAM 共享相同的 NSAT 和 PDOP 值，因此它们显示在同一个子图中。

表 4-3 ELEM, COPM, DOPM, COAM 和 CAPM 方法的精度对比

	ELEM	COPM	DOPM	COAM	CAPM
东方向误差(mm)	12.160	1.995	2.288	2.508	2.661
北方向误差(mm)	6.359	6.018	6.916	5.887	5.919

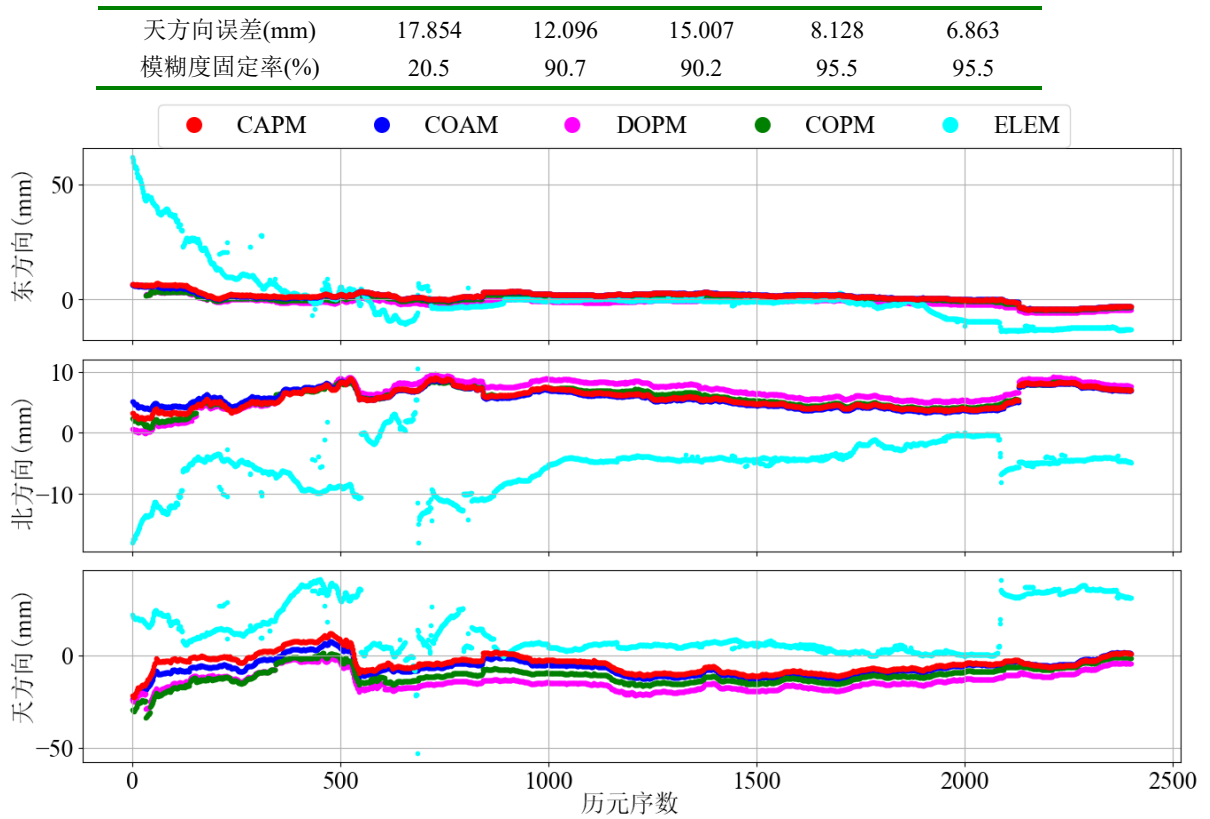


图 4-6 不同定位方法的误差分布

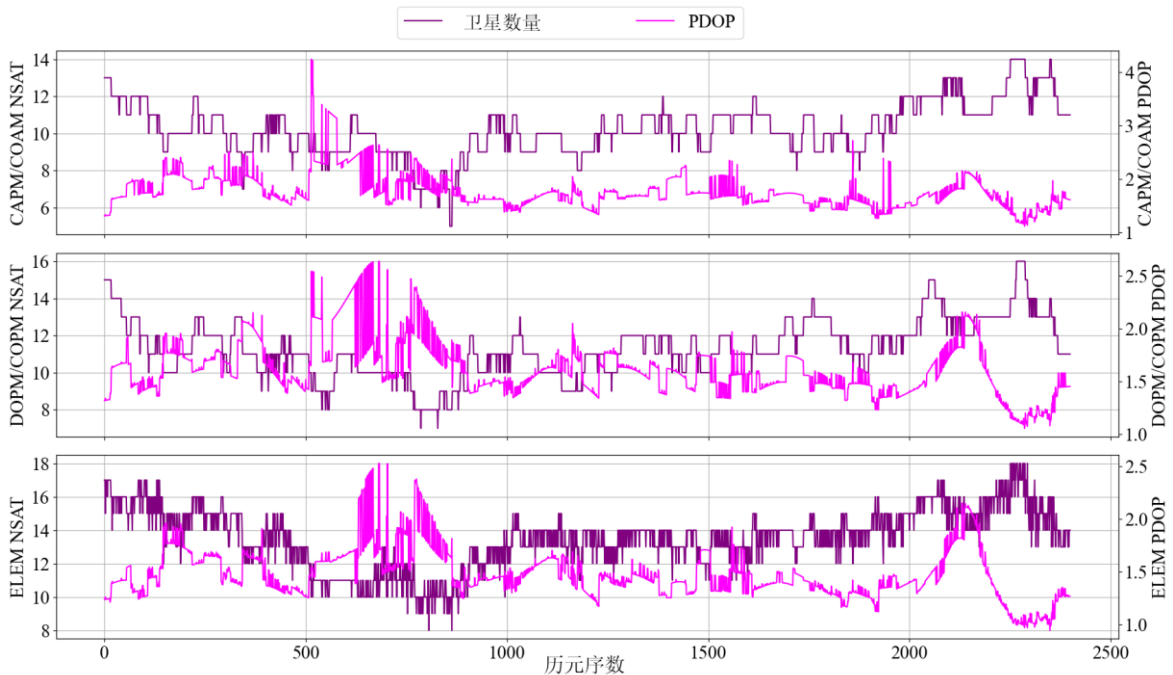


图 4-7 各方法卫星数量与 PDOP 时序分布

可以看到, CAPM, COAM, DOPM, COPM 和 ELEM 这五个方法在三维方向的均方根误差分别为 9.445mm, 10.345mm, 16.682 mm, 13.657 和 22.518mm。模糊度固定率分别为 95.5%, 95.5%, 90.7%和 20.5%。说明综合考虑方位角、高度角、SNR 和 PDOP 的方法相较于传统的只考虑高度角的定权方法具有较大的提升。具体来

说 COPM 与 ELEM 相比, 三维精度提高了约 39.35%, 这与 Zhang 在其研究中的结果基本一致, 说明 COPM 方法是有显著效果的。在设置截止方位角之后, 可以看到, COAM 的定位精度相比于 COPM 有了一定的提升, 说明设置截止方位角可以降低临近障碍物侧方边缘带来的 NLOS 接收的影响, 进而提升定位精度约 24.25%。对比 CAPM 和 COAM 的定位精度可以看出, 在尽可能去除 NLOS 接收之后, PDOP 随机模型能够通过调整现有卫星的权重, 来降低因为剔除卫星带来的较高 PDOP 值的影响, 进而提高定位精度约 8.69%。

DOPM 方法作为一种包含 PDOP 随机模型 COPM 方法, 与 COPM 相比表现出更差的定位精度。然而, 在纳入方位角阈值后, 定位精度得到了提高, 这表明了使用方位角阈值来排除错误观测的重要性。换句话说, 应在有效消除错误观测后使用随机模型。

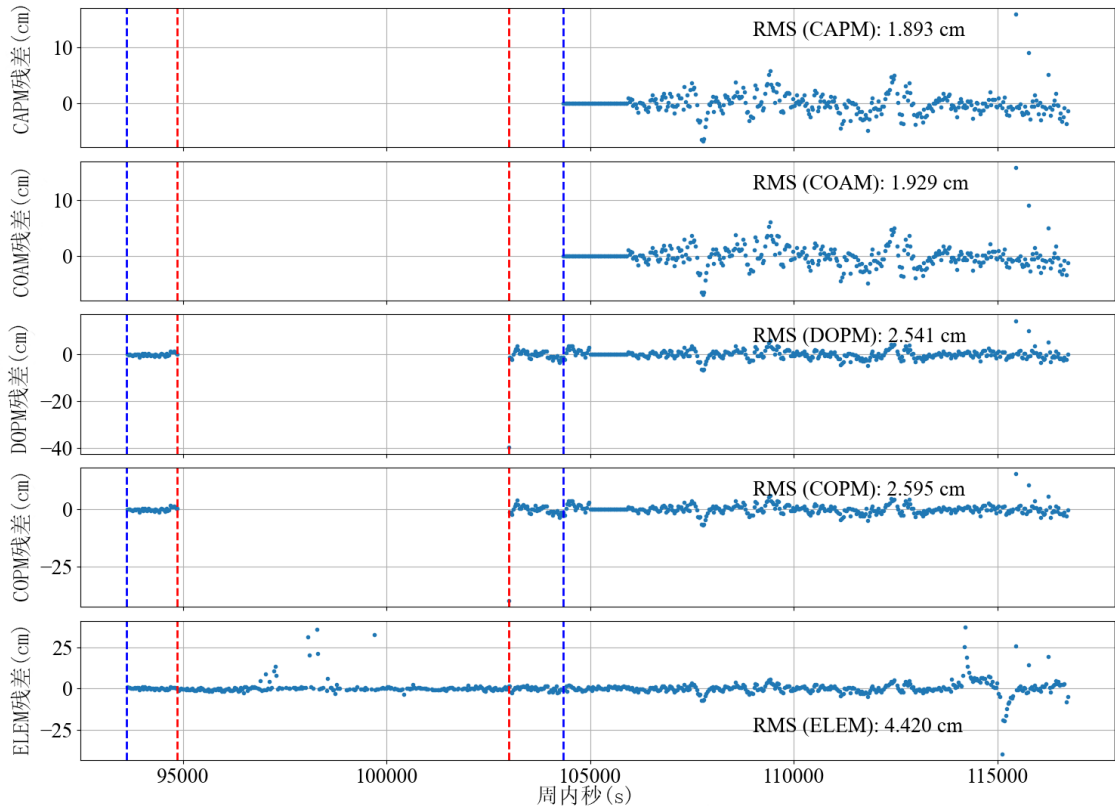


图 4-8 G11 卫星的双差残差分布

以 GPS G11 卫星为例, 图 4-8 给出了该卫星的载波相位双差(Double Difference, DD)的分布。双差残差为零时则表示该卫星在当前历元作为参考卫星使用。左侧的红色虚线表示卫星穿过障碍物边界的时刻及其截止高度角, 而右侧的虚线则表示卫星离开这些边界的时刻。左侧的蓝色虚线表示卫星进入障碍物的截止高程和方位角边界的时间, 右侧的线条表示卫星离开这些边界的时间。CAPM、COAM、DOPM、COPM 和 ELEM 方法的双差残差均方根值分别为 1.893 cm, 1.929 cm、2.541 cm、2.597 cm 和 4.420 cm。ELEM 方法显示较大的双差残差, 特别是在遮挡的区域, 其双差残差超过 25 cm。这是因为接收机接收到了来自卫星的衍射信号, 产生较大的观测误差。由于 PDOP 统计模型的作用, 与 COPM 相

比, DOPM 体现的双差残差较小。这证明了随机模型在提高内部一致性方面的作用。COAM 和 CAPM 方法都通过排除在方位角阈值相位中具有较大残差的卫星来补偿来自障碍物附近卫星的 NLOS 接收, 从而导致与 COPM 方法相比, 双差残差较低。

4.5 本章小结

本章讨论了降低 GNSS 接收机在峡谷环境中接收 NLOS 影响的方法。首先, 利用基于模板函数的等效高度角随机模型, 通过考虑不同星座中的 8 种卫星类型进行适当分类; 然后, 使用方位角阈值来排除障碍物边缘周围的卫星, 这些卫星可能会存在 NLOS 接收, 例如反射和衍射。最后, 使用考虑 PDOP 的随机模型来减轻剔除卫星后的 PDOP 影响。

短基线 RTK 实验表明, 与高度角随机模型相比, 在 NLOS 接收的环境中使用等效高度角随机模型是有效的。定位误差为 13.657 mm, 表示精度提高了约 39.35%。当对等效高度角随机模型施加方位角阈值时, 定位误差降低到 10.345 mm, 与不使用方位角阈值时相比, 精度提高了约 24.25%。此外, 结合 PDOP 随机模型以减轻 PDOP 对定位精度的影响, RMSE 减少到 9.445 mm, 从而将定位精度提高了约 8.69%。这是 PDOP 随机模型在 RTK 定位场景中的首次应用。对照实验表明, 在应用 PDOP 随机模型之前, 应通过采用本研究中提出的方位角阈值方法, 在站位上有效消除错误观测。

第5章 总结与展望

本文围绕弹载 GNSS 虚拟参考站差分定位技术展开研究，针对弹载接收机定位中的长基线实时解算、复杂环境下的信号误差抑制等关键问题，提出了一系列方法，并通过实测数据验证了其有效性和可行性。主要研究成果如下：

1. 虚拟参考站生成与网络伪距差分算法

基于多基站融合技术，结合线性内插模型（LIM）生成虚拟参考站（VRS）的伪距观测值，实现了长基线条件下的高精度差分定位。通过香港 CORS 站的静态数据验证，三维定位均方根误差达到 0.398 米，证明了算法的正确性和可行性。

2. 弹载接收机的扩展卡尔曼滤波（EKF）定位方法

应用了适用于非线性系统的 EKF 算法，实时更新目标的位置和速度状态，有效提升了高动态环境下的定位稳定性。弹载接收机实测数据表明，在共视卫星不少于 6 颗的情况下，定位中误差不超过 2.75 米，基本满足弹载接收机的定位需求。

3. 复杂环境下的方位角阈值与 PDOP 随机模型

提出了一种基于方位角阈值的卫星选择方法，直接排除受非视距影响的卫星，定位精度提升约 24.25%。引入 PDOP 随机模型，通过调整关键卫星的权重，降低因卫星排除导致的 PDOP 增加对定位精度的影响，进一步提升了 8.69% 的定位精度。

4. 综合实验验证

与其他外测设备（如光学雷达、测速雷达）的综合轨迹相比，位置差异的均方根值为 6.390 米，验证了 GNSS 定位的可靠性。对于峡谷环境中的测站定位，设计了五个方法的对比实验，证实了提出方法的有效性，体现在在已有工作的基础上，对定位精度有了进一步的提升。

尽管本文在弹载 GNSS 虚拟参考站差分定位技术方面取得了一定成果，但仍存在一些值得深入研究的方向：

1. 实时动态误差建模优化

现有电离层和对流层误差模型在长基线条件下仍存在局限性，未来可探索基于机器学习的动态误差预测方法，进一步提高模型精度。针对弹载接收机的快速运动特性，研究自适应滤波算法，优化 EKF 的状态转移和噪声建模。

2. 复杂环境下的智能信号处理

进一步细化方位角阈值和 PDOP 随机模型的参数优化策略，使其能够自适应不同遮挡环境（如城市峡谷、森林等）。结合深度学习技术，实现 NLOS 信号的自动检测与抑制，减少人工干预。

3. 实际应用场景的扩展验证

在更多复杂环境（如山地、海上等）中开展实测验证，评估算法的普适性。结合军事和民用需求，探索该技术在无人机、自动驾驶等领域的应用潜力。

综上所述，本文的研究为弹载接收机定位提供了重要的理论支撑和技术方案，但仍需在算法优化、多源融合和实际应用等方面进一步探索。未来，随着 GNSS 技术的不断发展和硬件性能的提升，弹载接收机的定位精度和可靠性将迎来更大的突破。

参考文献

- [1] 徐兵. 弹载 GNSS 软件接收机基带信号处理关键技术研究[D]. 南京理工大学, 2018.
- [2] 范晓曼. 整体 GNSS RTK 模型及方法研究[D/OL]. 武汉大学, 2022.
- [3] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 第三版. 武汉大学出版社, 2016.
- [4] 陈振. BDS/GPS 网络伪距差分定位方法研究[D]. 中国测绘科学研究院, 2016.
- [5] 张晶晶. BDS 网络 RTK 虚拟参考站数据生成的算法研究[D]. 中国测绘科学研究院, 2014.
- [6] 汪文韬, 申宇瑶, 王永庆, 等. 高动态场景下 GNSS 信号自适应载波跟踪算法[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2021, 51(1): 179-186.
- [7] 赵树强, 张栋, 许爱华, 等. 箭载 GNSS 数据融合处理及精度分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(6): 52-55+71.
- [8] 张晶晶. 弹载 GNSS / SINS 组合导航定位技术研究[D]. 东南大学, 2022.
- [9] 白钰皓. MEMS-IMU/GNSS 弹载微型组合导航系统设计[D]. 南京理工大学, 2023.
- [10] Zhang Z, Li Y, He X, et al. A composite stochastic model considering the terrain topography for real-time GNSS monitoring in canyon environments[J]. Journal of Geodesy, 2022, 96(10): 79.
- [11] Parkinson B W, Enge P, Axelrad P, et al. Global Positioning System: Theory and Applications, Volume II[M]. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.
- [12] 张绍成. 基于 GPS/GLONASS 集成的 CORS 网络大气建模与 RTK 算法实现[D]. 武汉大学, 2010.
- [13] 张晶晶. BDS 网络 RTK 虚拟参考站数据生成的算法研究[D]. 中国测绘科学研究院, 2014.
- [14] 林瑜滢. 主辅站技术定位原理及算法研究[D]. 解放军信息工程大学, 2010.
- [15] 吴星华, 吕振业, Joel VanCranenbroeck, 等. 徕卡最新主辅站技术在昆明市 GPS 参考站网中的应用[J]. 现代测绘, 2005(S1): 256-263.
- [16] Wen W, Zhang G, Hsu L T. GNSS Outlier Mitigation via Graduated Non-Convexity Factor Graph Optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(1): 297-310.
- [17] Wanninger L, Hesselbarth A. GNSS code and carrier phase observations of a Huawei P30 smartphone: quality assessment and centimeter-accurate positioning[J]. GPS Solutions, 2020, 24(2): 64.
- [18] Li Y, Zhang Z, He X, et al. An elevation stochastic model constrained by C/N0 for GNSS real-time kinematic positioning in harsh environments[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(1): 015011.
- [19] Strode P R R, Groves P D. GNSS multipath detection using three-frequency signal-to-noise measurements[J]. GPS Solutions, 2016, 20(3): 399-412.
- [20] Zhang Z, Li B, Gao Y, et al. Real-time carrier phase multipath detection based on

- dual-frequency C/N0 data[J]. GPS Solutions, 2019, 23(1): 7.
- [21] Špánik P, García-Asenjo L, BASELGA S. Optimal combination and reference functions of signal-to-noise measurements for GNSS multipath detection[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(4): 044001.
- [22] Zhou H, Li Z, Liu C, et al. Assessment of the performance of carrier-phase and Doppler smoothing code for low-cost GNSS receiver positioning[J]. Results in Physics, 2020, 19: 103574.
- [23] Xi R, Xu D, Jiang W, et al. Elimination of GNSS carrier phase diffraction error using an obstruction adaptive elevation masks determination method in a harsh observing environment[J]. GPS Solutions, 2023, 27(3): 139.
- [24] Li Y, Zhang Z, He X, et al. Realistic stochastic modeling considering the PDOP and its application in real-time GNSS point positioning under challenging environments[J]. Measurement, 2022, 197: 111342.
- [25] 吴庆丰, 宋叶志, 闫正洲, 等. 弹载 GNSS 虚拟参考站差分定位技术研究[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(8): 67-73.
- [26] 宁津生, 姚宜斌, 张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 3-8.
- [27] 杜文选. 基于 GNSS 的 VRS 技术算法研究[D]. 安徽理工大学, 2018.
- [28] 黄丁发, 张勤, 张小红, 等. 卫星导航定位原理[M]. 1 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2015.
- [29] Odijk D, Arora B S, Teunissen P J G. Predicting the Success Rate of Long-baseline GPS+Galileo (Partial) Ambiguity Resolution[J]. Journal of Navigation, 2014, 67(3): 385-401.
- [30] 吴黎荣. GNSS 网络 RTK 定位原理及算法研究[D]. 桂林电子科技大学, 2020.
- [31] 谢钢. 全球导航卫星系统原理——GPS、格洛纳斯和伽利略系统[M/OL]. --, 译. 电子工业出版社, 2019[2025-04-04]. <https://book.cppinfo.cn/Encyclopedias/home/index?id=3364079>.
- [32] 刘金健. 多系统 GNSS 联合定位的精密单点模型研究[D]. 安徽理工大学, 2019.
- [33] RE Tony Anthony. Interface Specification Document (IS-GPS-2000)[DB/OL].[2025-04-05]. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200N.pdf>
- [34] Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС. 关于格洛纳斯卫星导航系统 [DB/OL].[2024-04-05].https://glonass-iac.ru/chi/about_glonass/
- [35] European Union 2016. the European GNSS (Galileo) open Service Signal-in-Space interface control document[S/OL]. https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2015/12/Galileo_OS_SIS_ICD_v1.2.pdf
- [36] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件: BDS-SIS-ICD-B1C-1.0[S]. 北京, 2017.
- [37] 李壮. 基于非差观测模型的 BDS/GPS 长基线 RTK 定位算法研究[D]. 辽宁工程技术大学, 2023.

- [38] 谢钢. GPS 原理与接收机设计(修订版)[M]. 电子工业出版社, 2022.
- [39] Lands Dept. Hong Kong. CORS Stations Details, Geodetic Survey of Hong Kong. [DB/OL].[2024-08-20].<https://www.geodetic.gov.hk/en/satref/>
- [40] Ren H, Li G, Geng J, et al. Multipath hemispherical map model with geographic cut-off elevation constraints for real-time GNSS monitoring in complex environments[J]. GPS Solutions, 2023, 27(4): 188.
- [41] Kaloop M R, Yigit C O, EL-Mowafy A, et al. Evaluation of multi-GNSS high-rate relative positioning for monitoring dynamic structural movements in the urban environment[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11(1): 2239-2262.
- [42] Wu Q, Wang X, Zhou H. Mitigation of Diffraction Effect in GNSS Positioning Considering Azimuth and PDOP in Canyon Environment[J]. IEEE Access, 2025, 13: 16352-16361.
- [43] Lands Dept. Hong Kong. Open3Dhk. [DB/OL]. [2024-08-24].<https://3d.map.gov.hk/?l=en-US>

致谢

三年硕士时光即将结束，感谢我的祖国给了我读书的机会。感谢我的父母对我近三十年的养育之恩。感谢我的导师李静老师和闫正洲老师对我如同父母一般的关照。感谢我的上海天文台联培导师宋叶志老师的辛勤栽培，指明了我前进的方向。感谢上海天文台的胡小工老师提供的平台，让我有机会提高自己的能力。感谢上海天文台的周善石老师在工作中的默默付出，为我提供了大量支持与帮助。感谢上海天文台张益泽老师和小亚老师在专业问题上的答疑解惑。感谢罗鹏和周厚香两位学长，你们是我研究生道路上的明灯。感谢神州天鸿公司的陈建兵工程师和叶永添工程师对我在计算机技术上的指导。感谢太原卫星发射中心的武建兵总工程师、马树林总工程师、王华润主任、裴小强主任、张香成工程师、吕华平参谋和黄建荣参谋，在工作过程中给予我莫大的帮助。感谢香港地政总署测绘处大地测量组李兆麟主任，为我提供了大老山测站的观测数据，让我能完成后续的科研实验。

关于学位论文原创性的声明

本人郑重声明：本人所呈交的学位论文，是在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。学位论文中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等，均已明确注明出处。除文中已经注明引用的内容外，不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或科研成果，也不包含为获得西华师范大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。对本文的研究成果做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

本人郑重承诺：已提交的学位论文电子版与论文纸本的内容一致。如因不符而引起的学术声誉的损失由本人自负。

论文作者签名：_____

指导教师签名：_____

日 期： 年 月 日

关于学位论文使用授权的声明

本人在导师指导下完成的本硕士学位论文，知识产权归本人和西华师范大学共有。

本人完全了解西华师范大学有关收集、保存、使用学位论文的规定，同意学校保存或向国家有关部门或机构送交论文的纸质版和电子版，允许论文被查阅和借阅。

本人授权西华师范大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用任何复制手段保存和汇编本学位论文。

本人离校后发表本学位论文中的成果时，第一署名单位应为西华师范大学。

保密论文在解密后应遵守此规定。

论文作者签名：_____

指导教师签名：_____

日 期： 年 月 日

在学期间的科研情况

[1] 吴庆丰. 弹载 GNSS 虚拟参考站差分定位技术研究[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(8): 67-73.

.....