

分类号 P228

密 级 _____

U D C _____

编 号 10486

武汉大学
硕士 学位 论文

面向北斗/GNSS 非差模糊度固定的精密
钟差和相位偏差产品综合

研 究 生 姓 名 : 潘元欣

学 号 : 2018206180020

指导教师姓名、职称 : 耿江辉 教授

专 业 名 称 : 大地测量学与测量工程

研 究 方 向 : GNSS 精密单点定位

二〇二一年五月

Pan MSC Thesis 2021

BDS/GNSS Clock and Phase Bias Products Combination for Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution

Candidate : PAN Yuanxin

Student Number : 2018206180020

Supervisor : Prof. GENG Jianghui

Major : Geodesy and Survey Engineering

Speciality : GNSS Precise Point Positioning



GNSS Research Center

Wuhan University

May, 2021

Pan MSC Thesis 2021

论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已发表或撰写的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者(签名)：

2021 年 05 月 18 日

Pan MSC Thesis 2021

摘要

精密卫星钟差产品是实现精客单点定位技术（Precise Point Positioning, PPP）的重要基础。国际 GNSS 服务组织（International GNSS Service, IGS）从 1994 年开始便开始进行 GPS 的钟差综合工作，以便提供比单个分析中心（Analysis Center, AC）产品更加稳定可靠的综合产品。但是 IGS 的钟差综合策略自 2001 年修订以来，至今没有进一步的修改，已经无法满足目前繁荣发展的多系统 GNSS 的精密钟差产品综合需求，尤其是我国的北斗系统。此外，目前 IGS AC 开始提供与钟差产品配套的多系统 GNSS 相位偏差产品；可靠的相位偏差产品是实现 PPP-AR（Ambiguity Resolution）的关键，可以显著提高 PPP 的收敛速度和定位精度。但是目前国际上鲜有面向多系统 GNSS 钟差综合的研究，亦缺少多系统相位偏差的综合可行性及相应算法的研究。本文从这一迫切的实际需求出发，深入地研究了面向北斗/GNSS 非差模糊度固定的精密钟差和相位偏差综合算法，并基于多个算例验证了算法的有效性和综合产品的性能。

本文深入分析了多系统 GNSS 精密钟差的构成部分及其时变特性，除钟差基准、模型误差、初始钟偏差外重点分析了各个 AC 间系统间偏差的差异，并基于此构建了多系统 GNSS 精密钟差的数学模型，设计了相应的钟差综合策略。与 IGS 发布的 2019 全年的 GPS 钟差综合结果进行了对比，发现在 AC 钟差基准异常等 IGS 的综合策略无法处理的特殊情况下，本文的综合算法依然能够适用。此外，GPS、Galileo、GLONASS 和 BDS-2/3 的钟差综合实验显示它们分别能达到 11.6 ps、11.5 ps、45.5 ps、20.5 ps 和 26.4 ps 的 AC 间钟差一致性。使用综合产品进行 GREC 四系统 PPP 静态定位可以在东、北、高三个方向分别达到 2.3 mm、1.5 mm 和 5.6 mm 的坐标重复性精度，优于大部分 AC 的产品。同时深入分析了 GLONASS 钟差综合时 AC 间一致性不佳的原因，指出是 AC 间 GLONASS 轨道产品较大的切向和法向差异引起了钟差差值的线性及非线性变化。

在多系统钟差综合研究的基础上，本文设计了一种基于宽窄巷 UPD（Uncalibrated Phase Delay）的北斗/GNSS 多系统钟差和相位偏差的联合综合方法。将原始相位偏差统一转化为宽窄巷 UPD，同时将窄巷 UPD 和卫星钟差融合为整数钟差产品，分步综合宽巷 UPD 和整数钟差。GPS、Galileo 和 BDS-2/3 的钟差和相位偏差综合实验显示，宽巷 UPD 综合残差分别有 99.98%、98.59%、100% 和 99.80% 小于 0.1 周，一致性较好；得益于整数钟差的整数特性，其综合残差的 RMS 分别可以达到 5.9 ps、6.4 ps、10.6 ps 和 10.9 ps。使用综合产品分别可以实现 GPS、Galileo 和 BDS-2/3 平均 91.1%、98.2%、93.1% 和 94.2% 的宽巷固定率，以及 96.9%、97.5%、82.6% 和 92.7% 的窄巷固定率，产品鲁棒性优于大部分 AC。基于综合产品，GE 双系统的 PPP-AR 静态定位可以在东、北、高三个方向分别达到 1.4 mm、1.4 mm 和 4.8 mm 的坐标重复性精度，且约有 75% 的测站在

使用综合产品时能获得较原始 AC 产品更高的定位精度。全球范围内单北斗的 PPP-AR 静态定位可以在东、北、高三个方向分别达到 2.4 mm、2.5 mm 和 7.6 mm 的坐标重复性精度。单北斗动态定位受限于实验期间 AC 产品支持的 BDS-3 卫星数，在全球范围内仅能达到平均 3.4 cm、2.6 cm 和 6.7 cm 的东、北、高定位精度。此外，本文还使用部分 AC 提供的姿态产品验证了在钟差综合时改正姿态差异，可以显著地削弱甚至消除地影期 AC 间卫星姿态模型差异导致的钟差不一致。

关键词：非差模糊度固定；北斗/GNSS；钟差综合；相位偏差综合

Pan MSC Thesis 2021

Abstract

Precise satellite clock products are important for PPP (Precise Point Positioning). In order to provide more reliable products than a single AC (Analysis Center), IGS (International GNSS Service) has been conducting GPS clock combinations since 1994. However, the IGS combination strategy had no further modification since 2001, and it can no longer meet the current developing demand for multi-GNSS precise clock combination, especially for the Chinese BDS system. Besides, IGS ACs have begun providing multi-GNSS phase bias products along with clock products. Reliable phase-bias products are the key to achieving PPP-AR (Ambiguity Resolution), which can significantly shorten the convergence time and improve the positioning accuracy of PPP. Currently, there are few studies on multi-GNSS clock and phase bias products combination. To fulfill this actual demand, this paper thoroughly studies the precise clock and phase bias combination method for BDS/GNSS undifferenced PPP-AR, and evaluates the effectiveness of the proposed combination method and the performance of combined products based on multiple examples.

An in-depth analysis of the components of multi-GNSS precise clocks and their temporal characteristics is conducted. In addition to the clock datum, modeling errors and initial clock bias, the inter-system bias is also taken into account. Based on those knowledge, this paper proposed a new combination method for multi-GNSS. Compared with the IGS combined clock products of 2019, the new combined method is more robust and performs better in special cases where abnormal clock datum differences exist. It is found that the RMS of clock alignment residuals are 11.6 ps, 11.5 ps, 45.5 ps, 20.5 ps and 26.4 ps for GPS, Galileo, GLONASS and BDS-2/3, respectively. By using the combined products, multi-GNSS (GREC) PPP in static positioning mode can achieve the coordinate repeatabilities of 2.3 mm, 1.5 mm and 5.6 mm in the east, north and up components, respectively, which is generally better than the results using single AC's products. This study also discussed the causes of poor consistency between different ACs' GLONASS clocks. It is pointed out that the great tangential and normal orbit differences lead to the linear and nonlinear variation of the clock differences.

Based on the multi-GNSS clock combination strategy, this paper proposed a combination algorithm for BDS/multi-GNSS clock and phase bias products. Phase biases are first converted to wide-lane and narrow-lane UPDs (Uncalibrated Phase Delay) and then reconciled with satellite clocks. Finally, the wide-lane UPDs and the reconstructed clocks are combined in turns. The combination results show that about 99.98% of wide-lane UPD alignment residuals are smaller than 0.1 cycle for GPS. The counterparts of Galileo, GLONASS and BeoDou-2/3 are

98.59%, 100% and 99.80%, respectively. The RMS of clock alignment residuals are 5.9 ps, 6.4 ps, 10.6 ps and 10.9 ps. By using the combined products, the average wide-lane fixing rates of GPS, Galileo, GLONASS and BDS-2/3 are 91.1%, 98.2%, 98.2% and 93.1%, respectively. The average narrow-lane fixing rates can reach 96.9%, 97.5%, 82.6% and 92.7%, respectively. Generally, the combined products are more robust than single AC's products. Based on the combined products, GPS and Galileo combined PPP-AR in static positioning mode can achieve the coordinate repeatabilities of 1.4 mm, 1.4 mm and 4.8 mm in the east, north and up components, respectively. Besides, about 75% of stations perform better by using the combined products rather than single AC's products. Coordinate repeatabilities of global BDS-only PPP-AR in static positioning mode can reach 2.4 mm, 2.5 mm and 7.6 mm for the east, north and up components, respectively. BDS-only kinematic positioning can only achieve the average accuracy of 3.4 cm, 2.6 cm and 6.7 cm in the east, north and up components, respectively, which is currently limited by the number of BDS-3 satellites supported by ACs' products. Furthermore, this study demonstrates the effects of attitude products for correcting inter-AC clock differences, which significantly mitigate clock inconsistencies caused by differences among AC's attitude models during the eclipse.

Keywords: PPP-AR; BDS/multi-GNSS; clock combination; phase bias combination

目录

摘要	I
Abstract.....	III
1 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状及趋势	2
1.2.1 精密钟差产品综合	2
1.2.2 钟差和相位偏差产品综合	4
1.3 本文的研究目标及内容	5
1.3.1 研究目标	5
1.3.2 研究内容	5
2 非差模糊度固定理论基础.....	7
2.1 精密单点定位	7
2.1.1 函数模型	7
2.1.2 误差改正	8
2.2 非差模糊度固定	11
3 北斗/GNSS 精密钟差综合	15
3.1 精密钟差的数学模型	15
3.2 精密钟差综合算法	26
3.2.1 钟差综合流程	26
3.2.2 质量控制算法	27
3.3 精密钟差综合算法验证	29
3.3.1 IGS 钟差综合对比	29
3.3.2 PPP 定位对比	33
3.4 北斗/GNSS 钟差综合实验	36
3.4.1 钟差综合分析	36
3.4.2 PPP 定位性能	39
3.4.3 GLONASS 钟差综合讨论	43
4 北斗/GNSS 钟差和相位偏差综合	48
4.1 钟差和相位偏差综合算法	48
4.1.1 宽巷 UPD 综合方法	48

4.1.2 钟差和窄巷 UPD 综合方法	50
4.2 GPS/Galileo 综合实验	51
4.2.1 宽巷 UPD 综合	52
4.2.2 钟差和窄巷 UPD 综合	53
4.2.3 PPP-AR 定位分析	57
4.2.4 姿态改正讨论	60
4.3 BDS-2/3 综合实验	62
4.3.1 宽巷 UPD 综合	62
4.3.2 钟差和窄巷 UPD 综合	63
4.3.3 单北斗定位分析	66
5 结论与展望.....	72
5.1 主要工作与研究成果	72
5.2 今后研究展望	74
参考文献	75
致谢	80

1 結論

1.1 研究背景及意义

继美国的 GPS (Global Positioning System) 和俄罗斯的 GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System) 之后, 我国在 2000 年成功发射了自主研制的北斗一号卫星, 并按照“三步走”的规划, 分别在 2012 年和 2020 年建成了北斗二号和北斗三号系统 (Yang et al., 2018)。目前, 北斗导航定位系统已经广泛应用于国防建设和国民经济建设之中, 创造了巨大的社会价值。此外, 欧盟的 Galileo 系统于 2016 年开始提供初始服务, 日本的 QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) 系统和印度的 IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) 系统目前也在建设之中。各国卫星导航系统的繁荣建设, 标志着 multi-GNSS (Global Navigation Satellite System, GNSS) 时代的到来。

精�单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 技术 (Zumberge et al., 1997) 是使用 GNSS 卫星实现全球单站高精度定位的重要手段。从上世纪 90 年代诞生至今, 由于其低成本、高精度的特点, 它有效促进了大地测量学和地球物理学等研究领域的发展。PPP 技术的实施依赖于 IGS (International GNSS Service) 分析中心提供的精密轨道和钟差产品, 因此精密产品的精度和可靠性直接决定了 PPP 的定位质量 (Kouba, 2009a)。另一方面, 高精度 GNSS 用户对于 PPP 技术的应用需求也直接促进了 IGS 官方产品的多样性以及产品综合的发展。

继 GPS 精密产品之后, IGS 分析中心 CODE(Center for Orbit Determination in Europe)、ESA (European Space Agency)、GFZ (German Research Center for Geosciences)、CNES (National Centre for Space Studies)、WHU (Wuhan University) 等于 2014 年开始陆续提供日常运行的 multi-GNSS 精密产品。但是目前 IGS 没有对 multi-GNSS 的产品进行综合和评估, 这在一定程度上限制了 multi-GNSS 在高精度 PPP 定位中的作用, 尤其是限制了北斗系统在国际导航定位领域中的影响力。因此, 为了推动北斗/GNSS 的应用与发展, 我们亟需对各分析中心提供的 multi-GNSS 产品进行综合和评估。

PPP-AR (Ambiguity Resolution) 是进一步提升 PPP 定位精度和收敛速度的重要方法 (Ge et al., 2008)。由于卫星端和接收机端未校准硬件延迟 (Uncalibrated Phase Delay, UPD) 的存在, 用户必须额外使用服务端提供的相位偏差产品 (Geng et al., 2011; Geng et al., 2013) 才能实现 PPP-AR。目前, 国内外已有多家机构提供相位偏差产品, 例如 CNES 从 2012 年起提供整数恢复钟 (Integer Recover Clock, IRC) 产品以实现用户端的 PPP-AR (Collins et al., 2008; Laurichesse et al., 2008); 武汉大学测绘学院的张小红教授团队亦于 2014 年起提供 GPS 的宽窄巷 UPD 产品 (Li et al., 2015), 并从 2019 年

开始提供包含北斗二代卫星的 multi-GNSS UPD 产品 (Hu et al., 2019); 武汉大学的耿江辉教授团队在 2019 年开始提供 GPS 的精密钟差和相位偏差产品，并在 2020 年开始提供包含北斗二、三代卫星的 multi-GNSS 精密钟差和偏差产品 (Geng et al., 2019; Pan et al., 2020); CODE 于 2019 开始提供包含 GPS 和 Galileo 的相位偏差产品 (Prange et al., 2020); TUG (Graz University of Technology) 在参与 IGS 第三次重处理时也提交了 GPS 和 Galileo 的相位偏差产品 (Strasser et al., 2019)。各机构提供的精密钟差和相位偏差产品虽然为用户实现 PPP-AR 提供了便利，但各家产品的精度和质量存在差异，相应评估机制的缺失不利于用户进行选择，亦不利于促进 PPP-AR 的实际应用。针对这一情况，在 2018 年武汉召开的 IGS Workshop 上成立了 PPP-AR 工作小组，其任务之一便是解决相位偏差的综合问题 (Banville et al., 2020)。目前，有关相位偏差产品综合的研究较少，尤其是 multi-GNSS 相位偏差综合。因此，我们亟需研究现有的 multi-GNSS 相位偏差产品综合的可行性，并评估产品的精度和可靠性，促进 PPP-AR 技术在大地测量及地球物理研究中的应用。

1.2 国内外研究现状及趋势

1.2.1 精密钟差产品综合

产品综合是 IGS 的重要任务之一，而精密卫星钟差产品是实现 PPP 的重要基础 (Springer et al., 1993; Kouba et al, 2000; Kouba et al., 2001; Dowa et al., 2005; Ferland and Piraszewski, 2009)。IGS 从 1994 年开始便开始进行 GPS 15 min 的轨道和钟差综合工作，以便提供比单个分析中心 (Analysis Center, AC) 更加稳定可靠的综合产品 (Kouba et al., 1995)，同时评估并反馈各个 AC 的产品质量，促进 AC 数据处理策略的改进。基于早期轨道综合的成功经验，IGS 确定了钟差综合的基本方法为各 AC 加权平均和基于一次范数最小准则的抗差估计 (Beutler et al., 1995)。为了满足早期 PPP 用户对精密卫星钟差产品的需求，AC 向 IGS 日常提交卫星钟差产品精度在 1996-1997 年间得到了显著的提升。但因为最初版本的钟差综合策略没有顾及钟差和轨道间的一致性，导致使用综合产品进行 PPP 定位解算时测站的坐标重复性较原始 AC 的产品略差 (Springer et al. 1998)。随着 PPP 技术的普及，为了满足用户对高频卫星钟差以及低轨卫星定轨的需求，IGS 分析中心逐渐开始提供 30 s 采样率的卫星钟差。此外，新的钟差产品还包含了测站钟差，以满足 IGS/BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) 对 GNSS 时频传递的需要 (Dach et al., 2003; Senior et al., 2003; Dach et al. 2006; Petit et al., 2015)。针对这一新的综合需求，Kouba et al. (2001) 在总结之前 IGS 钟差综合策略的基础上提出了新的综合策略，基本确定了先综合轨道产品和测站坐标产品，再综合卫星和测站钟差产品的

基本流程。该方法顾及了卫星轨道径向和卫星钟差、测站坐标和测站钟差间的耦合关系，并明确给出了相应的钟差一致性改正公式，同时使用线性拟合的方法对齐不同 AC 钟差产品的基准，并采用一次范数最小准则的抗差策略，显著提高了综合钟差的精度。

国内钟差产品综合相关的研究工作相对欠缺。陈康慷 (2014) 研究了 AC 卫星轨道和钟差产品综合的理论，介绍了多种抗差算法，着重分析了不同的加权策略对于综合产品精度的影响，并且使用抗差最小二乘代替一次范数最小估计进行钟差基准对齐参数拟合，但是基本的钟差综合策略仍然采用 Kouba et al. (2001) 提出的方法。其基于 IGS 最终钟差产品的综合实验显示，GPS 的综合钟差相对于 IGS 的综合解可以达到 30-40 ps 的一致性，PPP 静态定位坐标重复性精度较 IGS 产品略低。陈康慷等 (2016) 基于 iGMAS (International GNSS Monitoring and Assessment System) 的钟差产品综合需求，针对钟差综合中钟差基准对齐时的非线性差异以及残余的线性偏差等问题进行了研究，提出了基于钟差一次差的“三步法”基准校准策略，并且使用一次多项式拟合钟差的残余偏差。其基于 iGMAS 最终产品的钟差综合实验显示，GPS 综合钟差相对于 IGS 可以达到 55 ps 的一致性，而 GLONASS 相对于 ESA 的一致性为 149 ps。基于综合产品的单北斗 PPP 静态定位相对于 IGS 在东、北、高三个方向的精度为 1.40 cm、1.01 cm 和 3.38 cm，略低于个别参与综合的 AC。Chen L. et al. (2017) 研究了实时 GPS 钟差产品的综合，针对实时钟差产品常见的数据中断、跳变以及粗差等钟差改正数异常的问题进行了分析，研究了相应的质量控制算法。结果显示其综合产品具有 99.9% 的历元可用性，显著高于单个 AC 的产品。

目前，multi-GNSS 钟差综合的研究较为欠缺。IGS 的钟差综合策略自 2001 年修订以来，至今没有进一步的修改，已经无法满足目前繁荣发展的 multi-GNSS 的精密钟差产品综合需求，尤其是我国的北斗系统。Sakic et al. (2020) 提出了 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 和 QZSS 轨道产品综合的初步策略，并更新了 IGS 的轨道综合软件以满足第三次重处理产品综合的需要 (Griffiths, 2019)。尽管有不少学者分析过 multi-GNSS 钟差产品的精度情况 (计国锋等, 2019)，但是目前没有相关文献对 multi-GNSS 钟差综合算法进行具体研究，亦缺少 multi-GNSS 钟差综合相对于单 GPS 的特殊性的分析。Chen K. et al. (2015) 和陈康慷等 (2016) 基于 iGMAS 钟差产品的综合实验虽然包含了 Galileo、BDS-2 等 GNSS 系统，但是采用的依然是适用于单 GPS 的钟差综合算法，没有针对多系统钟差进行额外的精细化处理，亦没有对 multi-GNSS 综合钟差的效果进行详尽的分析。Chen K. et al. (2017) 研究了顾及 GLONASS 的钟差综合方法，发现 GLONASS 钟差综合时 AC 间存在呈线性变化的差异，但没有研究这一现象的成因，文中采用一次多项式拟合的方法对每颗卫星分别消除这一线性差异，但是这是否破坏了 AC 原始钟差产品内部的一致性仍然存在疑问；实验结果显示其综合的 GPS 钟差与 IGS 具有 25ps 的一致性，但是其 GLONASS 钟差产品的综合结果缺少有效的验证方式。

1.2.2 钟差和相位偏差产品综合

国内外关于钟差和相位偏差产品综合的研究较少。虽然, Ge et al. 在 2008 年前已经基于传统的 IGS 卫星钟差和通过参考站解算的相位偏差产品(宽窄巷 UPD)实现了 PPP-AR, 并且同时期出现了诸如整数恢复钟(Laurichesse et al., 2008) 和解耦钟(Collins et al., 2008) 等不同形式的 PPP-AR 产品(钟差和相位偏差的统称), 但是当时相关领域的学者们更加关注不同的 PPP-AR 模型在理论上的等价性(Geng et al., 2010; Shi, 2012; Shi and Gao, 2014), 而没有考虑不同的 PPP-AR 产品间互操作可行性的研究。

Seepersad et al. (2016; 2017) 首次对 GPS 钟差和相位偏差产品综合的可行性进行了研究, 通过实验发现可以实现 UPD 产品、整数钟和解耦钟之间的转换, 即三者间的互操作是可行的; 并且指出不同的 PPP-AR 产品间进行互操作的前提是提供产品的服务端必须保持各改正模型的一致性, 例如卫星姿态的不一致引起的非整数周的相位缠绕差异会破坏 PPP-AR 产品间的互操作性。Banville et al. (2020) 基于观测值特定的相位偏差(Observable Specific Bias, OSB), 将整数钟、解耦钟和 UPD 等 PPP-AR 产品转换为统一的形式, 并明确指出卫星钟差和相位偏差产品具有耦合性, 综合时必须一同考虑; 且使用各 AC 内部提供的 1 周的 GPS PPP-AR 产品进行了综合实验。其结果显示基于该转换模型, 不同 AC 的 GPS PPP-AR 产品具有良好的一致性, 转换后的钟差综合时可以达到 mm 级的对齐精度, 并且综合产品的精度和可靠性优于单个 AC, 但是没有研究卫星姿态差异对综合的影响。陈星宇(2020)提出了一种基于二次差的整数钟综合方法, AC 间对齐后的钟差产品可以达到 10-20 ps 的一致性。其 PPP-AR 定位实验显示综合的产品在模糊度固定率和静态定位精度方面优于大部分 AC, 并且举例验证了卫星姿态差异会对钟差一致性产生影响, 但没有给出相应的解决方案。而在国内外暂时没有 multi-GNSS 钟差和相位偏差产品综合相关的研究。

目前, 国内外已有 COD、GRG、TUG 和 WHU 等多家 AC 开始提供 multi-GNSS 的钟差和相位偏差产品, 均支持 GPS 和 Galileo 系统 PPP-AR, 而 WHU 能够提供 BDS-2/3 卫星的 PPP-AR 产品。可靠的钟差和相位偏差产品是实现 PPP-AR 的关键, 而 PPP-AR 产品的综合基于合适的质量控制方案可以显著地提高产品的鲁棒性。但是迄今为止国际上鲜有面向 multi-GNSS 钟差综合算法的研究, 亦缺少多系统相位偏差的综合可行性及相应算法的研究。基于国内外的相关研究成果, 其实目前已经初步具备了多系统钟差和相位偏差产品综合研究的理论基础, 并且 PPP-AR 产品的发布情况也可以支持开展 multi-GNSS 钟差和相位偏差产品综合的研究, 符合当前多频多系统融合定位的 PPP-AR 发展趋势。

1.3 本文的研究目标及内容

1.3.1 研究目标

基于对国内外研究现状及趋势的分析，本文旨在实现完善的北斗/GNSS 多系统精密钟差和相位偏差产品的综合理论，以满足 PPP-AR 用户对于高精度、高可靠性的多系统精密产品的发展需求。具体的研究目标如下：

1. 建立北斗/GNSS 精密钟差的综合理论与方法。着重分析在多系统 GNSS 情况下 AC 间钟差系统性差异的改正方法，例如轨道差异、卫星姿态差异、钟差基准差异、系统间偏差等引起卫星钟差不一致性的因素；同时建立完整的质量控制算法，能够正确处理钟差综合时的粗差、跳变等异常情况。
2. 分析 GPS、Galileo、BDS-2/3 和 GLONASS 钟差的综合情况。重点分析 AC 间上述系统钟差产品的一致性情况，探究提升钟差一致性的方法，并且通过 PPP 定位实验验证综合钟差产品的精度。
3. 建立北斗/GNSS 钟差和相位偏差的综合理论与方法。着重分析 Galileo 和 BDS-2/3 的相位偏差产品综合的可行性，促进北斗系统在高精度定位领域的应用。
4. 分析 GPS、Galileo 和 BDS-2/3 钟差和相位偏差的综合情况。重点分析 AC 间 Galileo 和 BDS-2/3 产品的一致性情况，并且通过 PPP-AR 验证综合产品的精度，尤其是目前单北斗定位的精度。

1.3.2 研究内容

围绕上述研究目标，本文的主要研究内容为建立北斗/GNSS 多系统精密钟差和相位偏差产品的综合理论，开发北斗/GNSS 精密钟差和相位偏差综合软件，综合考虑轨道差异、卫星姿态差异、钟差基准差异、系统间偏差等引起 AC 间钟差不一致的因素，形成体系完整的北斗/GNSS 精密钟差和相位偏差综合流程。使用 COD、ESA、GFZ、GRG、TUG 和 WHU 等多家 AC 提供的北斗/GNSS 多系统钟差和相位偏差进行综合实验，评估各 AC 的产品质量及各系统的综合情况。同时，使用综合的产品进行全球范围内的 PPP 和 PPP-AR 定位实验，验证基于本文理论方法得到的综合产品的有效性，为 PPP 及 PPP-AR 用户提供北斗/GNSS 产品选择的参考依据。

本文具体的章节内容安排如下所示：

第 1 章：绪论。回顾了 IGS 精密钟差综合理论的发展过程，以及国内外学者在钟差综合方面的后续研究成果；然后重点介绍了北斗/GNSS 多系统钟差和相位偏差产品综合的研究现状；针对目前北斗/GNSS 多系统产品综合研究的匮乏，确立了本文的主要研

究目标，即完善的北斗/GNSS 精密钟差和相位偏差产品综合的理论和方法。

第 2 章：非差模糊度固定理论基础。概要地介绍了 PPP 的函数模型和各项误差的处理策略；随后在此基础上，介绍了基于宽窄巷分步固定的非差模糊度固定理论。

第 3 章：北斗/GNSS 精密钟差综合。详细介绍了精密钟差产品综合中 AC 间钟差的基准差异、轨道误差等模型差异、系统间偏差、初始钟偏差等系统性误差的时变特性和相应的改正模型，并介绍了多系统 GNSS 钟差综合的流程和质量控制算法；通过对 IGS 的钟差综合结果验证了该算法的有效性；随后使用多个 AC 提供的多系统 GNSS 产品，进行了 GPS、Galileo、GLONASS 和 BDS-2/3 的钟差综合实验，并使用 PPP 定位实验验证了综合产品的精度。

第 4 章：北斗/GNSS 钟差和相位偏差综合。在上一章的基础上，详细介绍了精密钟差和相位偏差联合综合的理论基础及综合流程；使用多个 AC 提供的 PPP-AR 产品，分析了目前 GPS、Galileo 和 BDS-2/3 宽窄巷 UPD 的稳定性和一致性，并进行了整数钟差的综合，使用 PPP-AR 定位实验验证了综合产品的精度，并展示了单北斗定位的精度。

第 5 章：结论和展望。对本文的主要工作和研究成果进行总结，并对后续相关研究的开展方向进行展望。

2 非差模糊度固定理论基础

2.1 精密单点定位

2.1.1 函数模型

PPP 技术是指利用单台双频接收机在全球范围内实现动态分米级、静态厘米级的定位，不依赖于基准站，具有操作灵活、作业成本低的特点，是目前 GNSS 导航定位领域的研究热点。在使用的观测值和产品上不同于伪距标准单点定位，PPP 主要利用高精度的载波相位观测值以及 IGS 提供的精密卫星轨道和精密卫星钟差产品来实现高精度的绝对定位。在定位模型上不同于基于双差观测值的相对定位，PPP 采用非差观测值，卫星端和接收机的误差、信号传播路径上产生的误差在数据处理时需要严格处理，因而 PPP 需要更加精细化的各类误差改正模型（叶世榕, 2002; 李博峰等, 2015）。

一般地，基于原始观测值的单点定位具有如下简化形式的函数模型：

$$\begin{aligned} P_i &= \left| X_r - X^S \right| + c \left(dt_r - dt^S \right) + T + I_i + e_i \\ L_i = \lambda_i \phi_i &= \left| X_r - X^S \right| + c \left(dt_r - dt^S \right) + T - I_i + \lambda_i N_i + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (2.1)$$

其中，下标 i 表示 GNSS 信号所处的频段；下标 r 表示接收机，上标 s 表示不同的卫星； P 和 L 分别表示伪距和载波相位观测值，以米为单位； ϕ 是以周为单位的载波相位观测量， λ 为频段 i 的载波波长； X_r 和 X^S 分别为测站天线相位中心和卫星天线相位中心的三位坐标； dt_r 和 dt^S 分别为接收机钟差和卫星钟差，对于多系统而言，地面站需要额外估计相对于 GPS 系统的系统间偏差或者额外估计单独的接收机钟差参数（Cai and Gao, 2013; Paziewski et al., 2014）； T 为星站间斜路径上的对流层延迟量； I 为星站间斜路径上的电离层延迟量； N 为相位观测值的整周模糊度； e 和 ε 分别为伪距观测值和相位观测值的噪声，包含多路径误差等。为了公式的简洁，观测值中包含的硬件延迟误差不在此进行讨论。

式(2.1)中的伪距观测值噪声一般可达亚米级，而载波相位观测值的噪声在毫米级，故在 PPP 数据处理中载波相位观测值的权重远远大于伪距观测值，一般根据经验值可以设为伪距观测值权重的 50 至 100 倍。主要使用载波相位观测值是 PPP 定位精度远高于 SPP (Single Point Positioning) 的根本原因。此外对于 PPP 而言，天线相位缠绕、地球潮汐等误差的影响也必须加以考虑，式(2.1)为了公式的简洁不对这些误差进行显式的

表示，后一小节会对这些误差的改正方式进行详细的阐述。

2.1.2 误差改正

在基于双差的相对定位模型中，卫星端的轨道误差和钟差通过站间单差消除，接收机端的钟差则通过星间单差消除，而传播路径上的绝大部分的对流层和电离层误差在短基线处理时亦可以通过站间单差消除。在精客单点定位中，这些误差分别需要使用精密产品消除、精细的误差改正模型进行改正或者作为未知参数在平差模型中进行估计。下面对这些误差的来源以及处理方式进行详细的阐述：

(1) 卫星轨道误差

PPP 采用 IGS 发布的精密卫星轨道产品（文件后缀为.sp3），其中包含卫星在 IGS 坐标参考框架下的三维位置坐标 (Ray et al., 2004)，在数据处理时被视为真值，即轨道产品给定了 PPP 定位的坐标基准。sp3 文件一般每隔 15 min 或 5 min 给出每颗卫星的三维位置，用户可以使用拉格朗日多项式内插出产品起止时间段内任意时刻的卫星位置。需要注意的是，通过 sp3 文件确定的卫星坐标是其质心位置，还需要改正天线相位中心偏差以获取信号发射处的相位中心坐标。

(2) 卫星钟差

PPP 采用 IGS 发布的精密卫星钟差产品（文件后缀为.clk），其中包含卫星以双频 P 码伪距观测值为基准的卫星钟差，一般每隔 30s 给出每颗卫星的钟差估值，用户可以采用简单线性内插的方式获得产品起止时间内任意时刻的卫星钟差。目前 IGS 最终产品的钟差精度能够达到 25 ps 左右（对应的测距误差为 0.75cm），可满足 PPP 厘米级定位精度的需求，因而在数据处理时将卫星钟差固定为真值。

(3) 接收机钟差

不同于星载的原子钟，一般接收机所使用的是相对廉价的石英钟。石英钟的计时精度取决于晶振振荡器频率的稳定性，其值一般易受环境温度等因素的影响，容易产生频偏，因而远远不能满足高精度计时的需求。与卫星钟差类似，接收机钟亦与标准 GPS 时之间存在一个差值，即接收机钟差；但不同于卫星钟差，由于石英钟的晶体振荡器的稳定性较差，接收机钟差的变化没有规律，呈现出随机性，无法像卫星钟那样可以在短时间内使用多项式进行拟合，因而在 PPP 数据处理时一般将接收机钟差作为白噪声参数进行估计。

(4) 对流层延迟

50 km 以下中性的的大气层一般被称为对流层，GNSS 信号在其中传播由于受大气折射的影响并不以光速传播，因而会产生额外的延迟量。斜路径对流层延迟的量级一般可以达到数米乃至十几米。对流层延迟的大小直接与大气折射系数 n 相关，而大气折射

系数又由大气的气象参数（大气温度、大气湿度以及大气压强）决定，且一般认为 n 在水平方向是均一对称的。因而在 PPP 处理中，我们一般采用高精度的对流层模型获得天顶方向的总对流层延迟，并假定对流层延迟与卫星的方位角无关，而只与高度角相关，使用投影函数便能得到每颗卫星方向斜路径上的对流层延迟。常用的对流层模型有霍普菲尔德(Hopfield)模型、萨斯塔莫宁(Saastamoinen)模型等，高精度的投影函数有 VMF1 模型、GMF 模型等。但是对流层延迟的湿分量无法进行准确的建模，因而在 PPP 数据处理时，一般还将对流层延迟的湿分量作为分段的随机游走参数进行估计，以弥补模型的不准确性。

(5) 电离层延迟

在太阳紫外线以及高能粒子的作用下，大气层中高度大于 60 km 且小于 1000 km 范围的大气被部分电离，所以被称之为电离层。电磁波信号穿过电离层时，其传播速度会受到影响，由此产生额外的传播时延，其量级一般可达数十米，且随电离层活跃程度的不同会产生相应的变化，是测距信号中除钟差外主要的误差来源。电离层是色散的介质，即其对不同频率的电磁波信号产生的延迟量是不同的，因而可以利用这一特点选择恰当的系数构成组合观测值以消除电离层延迟的高阶项。其中 PPP 处理中最为常用的无电离层组合观测值具有如下的形式：

$$\begin{aligned} P_{IF} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2 \\ \phi_{IF} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_1 - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

其中， f_1 和 f_2 分别为 GNSS 卫星双频信号对应的频率。

(6) 地球潮汐

地球并非一个理想的刚体，在太阳及月球引力的作用下，地球表面会产生周期性的涨落（固体潮汐），且占地球表面面积 71% 的海洋也会受到日月引力的影响而产生周期性的潮汐现象，由此海洋对地球表面的负载产生周期性的影响，从而间接地使地壳表面产生起伏（海洋潮）。固体潮和海潮的存在会使测站的坐标尤其是高方向产生长周期的变化，如果对此不加考虑那么将会影响 PPP 定位时测站坐标的估计，因而必须采用相应的模型加以改正。对于前者，一般采用美国 JPL 发布的 jpleph 星历文件计算出日月的位置并使用引力潮公式对每个历元的测站坐标进行改正；对于后者，目前广泛采用 FES2004 模型及测站对应的海潮系数进行改正。

(7) 相对论效应

由于接收机和卫星所处位置间的引力差以及卫星的高速运动的存在，卫星上搭载的

原子钟的实际振荡频率与其标称频率之间存在一个差值，从而对观测值产生偏差，需要用模型加以改正 (Kouba, 2004)。

$$\Delta\rho = -\frac{2}{c} \mathbf{X} \cdot \dot{\mathbf{X}} \quad (2.3)$$

其中， $\Delta\rho$ 为相对论效应对观测值产生的误差； \mathbf{X} 为卫星的位置矢量； $\dot{\mathbf{X}}$ 为卫星的速度矢量。

(8) 天线相位中心

GNSS 信号实际测定的是接收机端天线瞬时相位中心到卫星端天线瞬时相位中心的几何距离。但是接收机天线的瞬时相位中心不与天线参考点 (Antenna Reference Point, ARP) 重合，卫星端亦是如此，因而天线相位中心的改正分为接收机端和卫星端两部分。对于卫星端的天线相位中心，由于 IGS 发布的精密卫星轨道产品中包含的是卫星质心的坐标，而平均天线相位中心与卫星质心间存在一个固定的偏移量，称之为天线相位中心偏差 (Phase Center Offset, PCO)，其值在径向可达数米，必须加以改正；此外，瞬时天线相位中心与上述平均天线相位中心之间还存在一个随高度角变化的偏差量，称之为天线相位中心变化 (Phase Center Variation, PCV)，其数值相对较小，一般只有数毫米，可以从 IGS 发布的 atx 文件中通过查表以及线性内插的方式获取相应的改正数。需要注意的是，目前 Galileo 卫星以及 GPS III 卫星的 PCO 和 PCV 改正信息是卫星制造厂商提供的地面标定值，因此更加精细，即卫星不同频的信号具有不同的 PCO、PCV 改正值，且 PCV 也随方位角相关。接收机端的天线相位中心改正同卫星端类似，但是接收机端的 PCO 和 PCV 的值还与接收的信号频率以及 GNSS 系统类型相关，且 PCV 的值还与水平方位角相关，常用天线的 PCO 和 PCV 的值亦可在 IGS 发布的 atx 文件中获得。但是目前大部分地面站天线缺少 BDS 信号的 PCO 和 PCV 改正信息，在实际计算时使用 GPS 的改正数进行替代。

(9) 相位缠绕

GNSS 信号采用右旋极化波，但卫星在实际运行时，为了最大程度的获取太阳能，卫星会在运行过程中会缓慢地进行旋转以使太阳光能垂直入射至太阳能帆板，因而天线也会产生缓慢的旋转。尤其是在地影期间，天线的旋转会更加快速，从而使载波相位的观测值产生变化，其值最大可以达到一倍波长，在 PPP 定位中必须加以考虑，一般使用相位缠绕模型加以改正 (Wu et al., 1993)：

$$\Delta\varphi = sign(\zeta) \arccos \left(\frac{\mathbf{D}' \cdot \mathbf{D}}{|\mathbf{D}'| \cdot |\mathbf{D}|} \right) \quad (2.4)$$

式中,

$$\begin{aligned}\zeta &= \hat{k} \times (D' \times D) \\ D' &= \hat{x} - \hat{k}(\hat{k} \cdot \hat{x}') - \hat{k} \times \hat{y}' \\ D &= \hat{x} - \hat{k}(\hat{k} \cdot \hat{x}) + \hat{k} \times \hat{y}'\end{aligned}$$

其中, $\Delta\varphi$ 是相位缠绕误差; sign 是取符号函数; \hat{k} 是卫星至接收机方向的单位向量; D' 是卫星星固系下的单位向量 $(\hat{x}', \hat{y}', \hat{z}')$ 确定的卫星有效偶极向量, 由卫星姿态确定; D 是测站地方系下的单位向量 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 确定的测站有效偶极向量, 由测站所处的位置确定。需要注意的是上式相位缠绕误差计算时用到了反三角函数, 因此 $\Delta\varphi$ 会存在不连续性, 实际使用时需要在连续历元间进行对齐。

(10) 卫星端测距码的硬件延迟

由于卫星端信号发射的过程受硬件延迟 (即信号在卫星内部电路中的传播时延) 的影响, IGS 发布的精密卫星钟差产品并非卫星的物理钟偏差 (卫星钟钟面时间和标准 GPST 之间的差值), 而是吸收了 P1/P2 无电离层组合观测值信号硬件延迟的钟差。对于不同的测距码而言, 由于其产生、调制和发射的线路不同, 对应的硬件延迟量亦不相同 (Hakansson et al., 2017); 对于 GPS 而言, 现有的部分类型的接收机获取的观测量中不含 P1 观测值, 而只有 C1 观测值, 此时在使用 IGS 发布的精密卫星钟差产品时, 必须先将 C1 码包含的硬件延迟改到 P1 的硬件延迟, 其数值之差一般可达 1-2ns, 一般采用 CODE 每月发布的 DCB 产品进行改正, 以消除钟差基准的不一致性。

(11) 多路径

GNSS 信号并非只以直射的方式到达接收机天线, 因为电磁波信号具有反射的特性, GNSS 信号还可在测站周围的物体表面或者地面经过反射后被接收机天线捕获; 由于反射信号和直射信号具有相同的频率和恒定的相位差, 满足波的干涉条件, 从而对原始直射信号产生干扰。反射信号对伪距和相位的影响不同, 一般对相位观测值的影响不超过波长的四分之一周, 对伪距的影响可达数十厘米。由于实际环境下电磁波反射的机理十分复杂, 目前尚没有有效的多路径建模方法, 而是一般从硬件手段达到抑制多路径信号的目的, 较长的观测时间也可以在静态数据处理时削弱多路径的影响, 如利用卫星轨道的重复周期进行恒星日滤波 (Geng et al., 2018a)。

2.2 非差模糊度固定

不同于基于双差观测值的相对定位, 由于卫星端和接收机端存在未校准相位延迟 (Uncalibrated Phase Delay, UPD), 基于非差或单差观测值的精室断点定位估计所得的

模糊解参数因为吸收了 UPD 而失去了整周特性，因而无法像相对定位那样直接将模糊度固定为整数以进一步提高定位的精度。

但是基于相对定位可以固定模糊度的事实，我们可以推断出用于组成双差模糊度的两个单差模糊度的小数部分必然是相等或者至少是相当接近的。倘若单差模糊度的小数部分能够事先估计出来，然后播发给 PPP 用户，那么用户端即可实现单站的模糊度固定。基于这个思路，Ge et al (2008) 首先实现了基于星间单差的单站非差 PPP 模糊度固定，下面简单介绍 PPP-AR 的实现流程。

电离层误差是非差精密单点定位时主要的误差来源，为了消除电离层误差的影响，PPP 一般采用式(2.2)所示的双频无电离层组合观测值，由于无电离层组合的系数本身并非整数，因而其对应的载波相位的模糊度亦不是整数。为了能够将 N_{IF} 固定到 N_1 、 N_2 整数解对应的值，一般采用宽、窄巷的分步固定模式，将 N_{IF} 拆分成式所示的宽窄巷组合的形式 (Ge et al., 2008; 李盼, 2016)。

$$N_{IF} = \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_w + \frac{f_1}{f_1 + f_2} N_n \quad (2.5)$$

但是不同于基于双差观测值的相对定位，PPP 数据处理时卫星端和接收机端的硬件延迟无法通过双差的方式消除，载波相位的整周模糊度本身已经失去了整数特性，即使使用宽窄巷的固定模式，亦不能直接将模糊度固定为整数。在顾及卫星端和接收机端的硬件延迟时，简化的式(2.1)具有如下的形式：

$$\begin{aligned} P_i &= \rho + I_i + d_{r,i} - d_i^s + e_i \\ L_i &= \rho - I_i + b_{r,i} - b_i^s + \lambda_i N_i + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (2.6)$$

其中， ρ 为与频率无关的总延迟量，包含星站间的几何距离、钟差以及对流层误差； d 为伪距观测值中包含的未校准硬件延迟； b 为载波相位观测值中包含的未校准硬件延迟。其中 b^s 的存在是星间单差模糊度失去了整数特性的直接因素，而 d^s 也会通过卫星钟差影响模糊度的估值。因而为了实现用户端的 PPP 模糊度固定，需要服务端事先提供 UPD 产品。在假定已经获得了基于参考网估计的 UPD 估值的前提下，基于双频无电离层组合的 PPP 模糊度固定的流程分为宽巷模糊度固定和窄巷模糊度固定。

1. 宽巷模糊度固定

以 GPS 为例，其宽巷模糊度具有 86cm 的波长，远大于 L_1 载波 19.04 cm 的波长，因而能够相对较为容易的固定为整数。HMW 组合是估计宽巷模糊度的常用方法，但是由于其使用了伪距观测值，本身噪声较大，需要采用多历元平滑的方式获取一般不具有整数特性的浮点的宽巷模糊度估值。张小红等人 (2012) 的研究指出使用 30 个历元的

HMW 组合观测值进行平滑，即可获得可靠的宽巷模糊度浮点值 \tilde{N}_w 及其中误差 σ_w 。

$$\begin{aligned} N_{w,i} &= \frac{f_1 P_{1,i} + f_2 P_{2,i}}{f_1 + f_2} \cdot \frac{1}{\lambda_w} - (\phi_{1,i} - \phi_{2,i}) \\ \tilde{N}_w &= \frac{1}{n} \sum_i^n N_{w,i} \\ \sigma_w &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (N_{w,i} - \tilde{N}_w)^2} \end{aligned} \quad (2.7)$$

其中， $N_{w,i}$ 为第 i 个历元的 HMW 组合观测值； \tilde{N}_w 为平滑后的宽巷模糊度浮点解； σ_w 为宽巷模糊度估计值的中误差； n 为平滑所用的总历元数。

在获得浮点的 \tilde{N}_w 后，我们可以在单站构建星间单差的宽巷模糊度 \hat{N}_w^{ij} ，但是由于卫星端 UPD 的存在，其值亦非整数，必须从中扣除事先估计的单差宽巷 UPD。

$$\begin{aligned} \hat{N}_w^{ij} &= (\tilde{N}_w^j - b_w^j) - (\tilde{N}_w^i - b_w^i) \\ \sigma_{b_w^{ij}} &= \sqrt{\sigma_{b_w^i}^2 + \sigma_{b_w^j}^2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

其中，上标 i, j 代表参与单差的卫星； $\tilde{N}_w^i, \tilde{N}_w^j$ 为 i, j 卫星共同观测时段内宽巷模糊度的浮点值； \hat{N}_w^{ij} 为单差宽巷模糊度的整数估计值； b_w^i, b_w^j 为服务端提供的宽巷 UPD 产品； $\sigma_{b_w^{ij}}$ 为单差宽巷 UPD 的中误差。

为了验证 \hat{N}_w^{ij} 是否能够固定为整数，需要进行(2.9)式所示的假设检验。一般地，给定置信度 $\alpha = 0.01\%$ ，倘若 $P_0 \geq 1 - \alpha$ ，则将 \hat{N}_w^{ij} 固定为离它最近的整数 N_w^{ij} 。

$$\begin{aligned} P_0 &= 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \left[erfc\left(\frac{i - |\tilde{N}_w^{ij} - N_w^{ij}|}{\sqrt{2}\sigma_{b_w^{ij}}}\right) - erfc\left(\frac{i + |\tilde{N}_w^{ij} - N_w^{ij}|}{\sqrt{2}\sigma_{b_w^{ij}}}\right) \right] \\ erfc &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \end{aligned} \quad (2.9)$$

2. 窄巷模糊度固定

在宽巷成功固定的情况下，对式(2.5)做如下变换：

$$\tilde{N}_n^{ij} = \frac{f_1 + f_2}{f_1} \tilde{N}_{IF}^{ij} - \frac{f_2}{f_1 - f_2} N_w^{ij} \quad (2.10)$$

同宽巷单差模糊度固定的方式类似，在获得星间单差的浮点窄巷模糊度 \tilde{N}_n^{ij} 后，从中扣除服务端提供的窄巷 UPD 即可得到单差窄巷模糊度的整数估值 $\hat{N}_n^{ij} = \tilde{N}_n^{ij} - b_n^{ij}$ ，

并进行假设检验，倘若 $P_0 \geq 1 - \alpha$ ，则将 \hat{N}_n^{ij} 固定为离它最近整数 N_n^{ij} 。若宽巷和窄巷同时固定，则该星间单差的模糊度固定成功。

需要注意的是，在多系统 GNSS 的情况下星间单差模糊度需要在各系统内部进行构建才能消除接收机端的硬件延迟，对于不同的 GNSS 系统而言接收机端还额外存在系统间的相位偏差 (Geng et al., 2018b)。

Pan MSC Thesis 2021

3 北斗/GNSS 精密钟差综合

3.1 精密钟差的数学模型

高频率稳定性的时间基准对于实现高精度的 GNSS PNT (Positioning, Navigation and Timing) 服务至关重要。目前, GNSS 卫星大多搭载了高精度的铷原子钟或铯原子钟, Galileo 卫星则是搭载了频率稳定性更高的氢原子钟, 以获取更优的系统服务性能。原子钟的频率稳定性一般可以达到 10^{-14} /天至 10^{-15} /天 (Gonzalez, 2013; Jaduszliwer et al. 2021), 因此可以采用多项式和三角函数对其进行近似的建模。目前, 对 GNSS 钟差的研究一般基于公式(3.1)拟合精密钟差产品, 用于钟差的外推预报等应用, 在短时间内可以达到厘米级精度的预报精度。

$$clk^s(t) = a_0^s + a_1^s \cdot t + a_2^s \cdot t^2 + \sum_{i=1}^n A_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_i}t + \varphi_i\right) + \varepsilon^s \quad (3.1)$$

其中, $clk^s(t)$ 为卫星 s 在 t 时刻的钟差; a_0^s 、 a_1^s 、 a_2^s 为卫星 s 特定的钟差多项式拟合系数; A_i 、 T_i 、 φ_i 分别为第 i 项正弦三角函数的幅度、周期和初始相位; ε^s 为拟合残差。

但是上述钟差建模的方式只是描述了 GNSS 钟差随时间变化的表现形式, 并且它只能描述钟差长期的低频变化, 而无法精确描述短期内的高频变化。为了直观地说明这一问题, 我们使用 ESA 提供的 2020 年 001 天的多系统精密钟差产品分别绘制了 G01、E01、R01、C08 (BDS-2) 和 C33 (BDS-3) 这 5 颗卫星的时间序列图。图 3.1 左边一列绘制的是原始的精密钟差文件中的数值, 右边一列绘制的是使用一次多项式拟合去除趋势项后的钟差序列。从图中可以发现 G01、E01、C08 和 C33 的原始钟差序列接近一条直线, 而 R01 虽然大体上也呈现线性变化的趋势, 但是局部出现了许多不规则的变化。在去除线性趋势后, 所有卫星的钟差都呈现出了显著的非线性时变特征, 尤其是局部高频的钟差变化。G01 卫星更是在历元 1500 附近出现了明显不符合前后变化规律的异常情况 (后续研究发现其他分析中心提供的精密产品也表现出了这一异常变化), 显然这些细微的高频变化趋势是无法使用二次多项式和三角函数多项式进行精确描述的。

因此, 目前公式(3.1)对钟差的建模精度无法匹配 IGS 提供的精密钟差产品 75 ps 量级的标称精度 (IGS, 2008)。但是, 倘若式(3.1)能够精确地描述卫星钟差的变化, 那么钟差综合将会容易得多, 只需要综合各个分析中心对应的多项式系数即可, 但这有赖于将来原子钟频率稳定性的进一步提升 (Batori et al., 2020)。

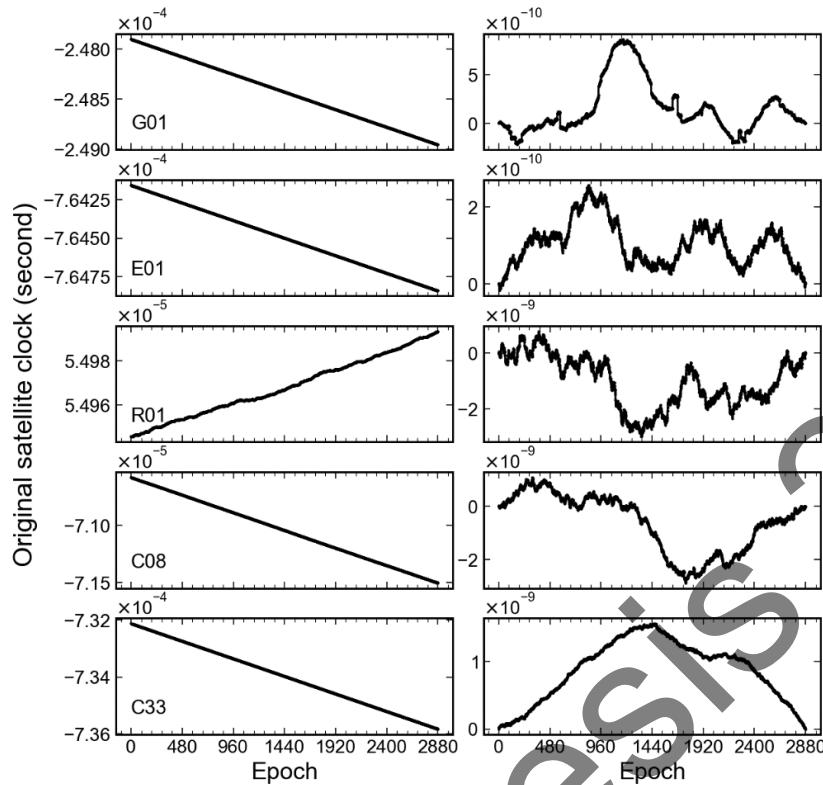


图 3.1 GNSS 卫星精密钟差的时间序列图

IGS 各分析中心提供的精密钟差产品并不是严格物理意义上的星载原子钟钟差，而是使用地面 GNSS 观测站网的数据同卫星轨道、地球自转参数、测站坐标等一起估计得到的内部自洽的钟差改正值 (Weiss et al., 2017)。为了实现 IGS 精密卫星钟差产品的综合，首要的任务是从精密钟差的估计策略出发确定钟差产品的构成，即明确各个 AC 钟差产品间的差异有哪些组成部分，各个部分需要如何处理。

目前，尚没有相关文献明确给出 IGS 精密钟差构成的数学模型。本文在 Chen L. et al. (2017) 实时钟差综合研究成果的基础上，结合本文后续对 IGS 各 AC 提供的多系统精密钟差产品的分析，给出如下形式的 IGS 精密钟差构成的数学模型：

$$clk^s(t) = D_t^G + B_t^{G,\text{sys}} + m_t^s + b^s + \varepsilon_t^s \quad (3.2)$$

其中， $clk^s(t)$ 为精密钟差产品中卫星 s 在 t 时刻的钟差值； D_t^G 为 t 时刻精密钟差产品在 GPST 下的时间基准，由钟差估计时使用的地面参考站（一般外接原子钟）决定，亦可以通过线性拟合的方式事后对齐到 GPS 广播星历所确定的 GPST； $B_t^{G,\text{sys}}$ 为卫星系统 sys 相对于 GPS 系统钟差基准的系统间偏差，包含不同 GNSS 系统间时间基准的差异以及地面参考站接收机对不同系统的伪距信号硬件延迟的差异 (Cai et al., 2013)； m_t^s 为钟差估计时所吸收的轨道误差以及其他模型误差 (Lou et al., 2014)； b^s 为初始钟偏差，包含卫星端伪距硬件延迟的影响，是不随时间变化的常量； ε_t^s 为精密

钟差的估计误差，主要由载波相位观测值的精度决定 (Guo and Geng, 2017)。

特别地，在实际运用上述公式时，绝对的钟差基准、模型误差、初始钟偏差等是无法获取的，也不是钟差综合所必须的。钟差综合的首要任务是协调不同 AC 提供的精密钟差产品间的系统性差异，在此基础上进行粗差探测和加权平均，输出相对单个 AC 更加稳健、可靠的综合产品。因此，AC 间钟差的差异是本文的主要研究对象，对它的正确认识也是钟差综合的基础。对于同一颗卫星，基于式(3.2)可以得到如下形式的 AC 间精密钟差的差值：

$$\Delta clk_{ij}^s(t) = \Delta D_{ij,t}^G + \Delta B_{ij,t}^{G,sys} + \Delta m_{ij,t}^s + \Delta b_{ij}^s + \Delta \varepsilon_{ij,t}^s \quad (3.3)$$

其中，i、j 代表不同分析中心的编号，其余参数的定义同式(3.2)。

为了制定针对钟差差异的各个构成部分的综合策略，本文使用 2020 年 001 天 COD、ESA、GFZ、GRG 和 WUM 等 5 家 AC 提供的多系统精密产品进行研究，详细地分析了 AC 间钟差差异各个构成部分的特性。

1. 钟差基准

精密钟差估计时，测站的接收机钟差和卫星钟差之间存在强耦合关系，两者同时估计会导致秩亏。一般固定某一外接原子钟的测站接收机的钟差参数以解决该秩亏问题，引入的这一基准站的接收机钟差便是最终所得的精密钟差的基准 (Weiss et al., 2017)。由于绝对的钟差基准是无法获取的，我们采用下式估计不同 AC 间 GPS 系统钟差基准的差值。

$$\Delta D_{ij,t}^G = \frac{1}{n} \sum_s^n (clk_{j,t}^s - clk_{i,t}^s) \quad (3.4)$$

其中， $\Delta D_{ij,t}^G$ 为 t 时刻 i、j 分析中心间 GPS 钟差基准的差值；s 为不同分析中心间共有的 GPS 卫星；n 为共有的 GPS 卫星个数。特别地，在只有 GPS 卫星时，式(3.3)中 $B_t^{G,sys}$ 为 0，且 $\Delta m_{ij,t}^s$ 的主要部分可以通过模型事先进行改正， $\Delta b_{ij}^s + \Delta \varepsilon_{ij,t}^s$ 经多颗卫星平均后的值接近于 0，相对于 AC 间钟差基准差值的量级可以忽略不计。

为了直观地分析不同分析中心间 GPS 系统钟差基准的差异，图 3.2 绘制了依据式(3.4)计算所得的各个分析中心相对于 COD 的钟差基准差异。图 3.2 中左边展示的是原始的基准差异，右边展示的是各个 AC 分别去除均值后的基准差异。从左图可以发现，不同 AC 间的钟差基准存在最大约 3 ns 的相对差异 (ESA 与 GRG)，且除了 GFZ 外其余分析中心间的基准差异总体呈线性变化的趋势。但是从 Y 轴范围更小的右图可以发现，尽管 AC 间钟差基准的差异总体呈线性变化，但是仍然存在量级较小的非线性变化。因此传统的 IGS 钟差综合策略中通过线性拟合对齐各个 AC 钟差基准的方法并不是完

善的，因为它无法实现最高精度的基准对齐，从而对后续的综合产生一定的影响。

GFZ 的情况更加印证了上述观点，GFZ 相对于 COD 的钟差基准差异呈现显著的非线性变化，变化的幅值大约在 0.4 ns，这显然是无法通过简单的线性拟合对齐的。通过对各个 AC 的解算策略和钟差文件头部的说明信息，本文发现 GFZ 的钟差基准之所以呈现出明显不符合原子钟时频特性的不规则变化，是因为 GFZ 在估计精密卫星钟差时固定了 6-9 个外接原子钟的基准站，而在估计过程中各个测站对钟差基准的贡献不是均等的，同时也是时变的，因此多个基准的非线性叠加导致了最终钟差基准的异常变化。后续我们使用 PANDA 软件 (Liu and Ge, 2003) 分别固定一个基准站的钟差和固定多个基准站的钟差进行卫星钟差估计实验，也成功地复现了这一现象。

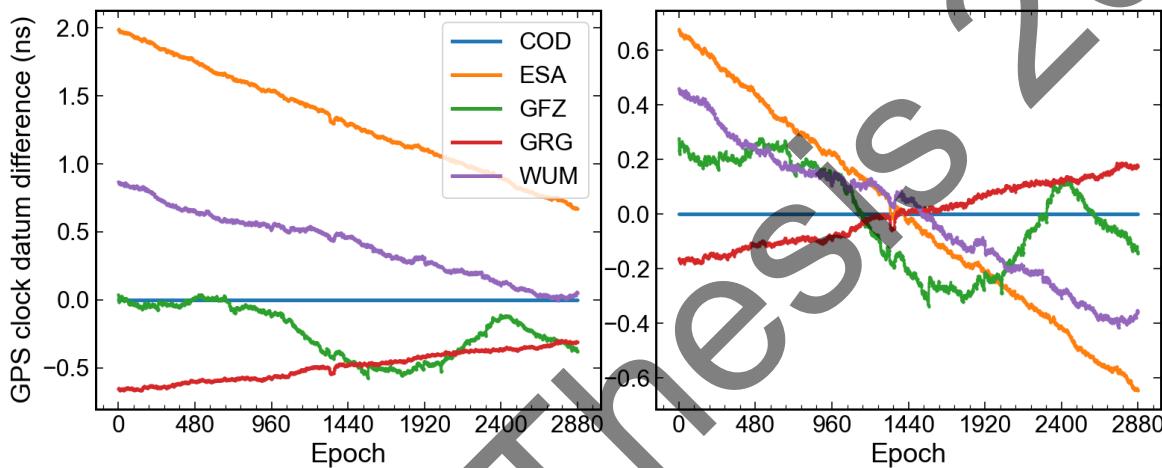


图 3.2 不同分析中心钟差产品间 GPS 系统钟差基准的差异

GFZ 钟差基准在对齐广播星历（使用整个 GPS 星座），还额外逐历元调整了拟合残差的中位数，因此使基准出现了非线性变化。

综合上述对 AC 间的钟差基准特性的分析，我们可以得出如下结论：

- (1) 不同 AC 间的钟差基准的差异处于数 ns 量级，远大于精密钟差产品 75 ps 的标称精度，并且属于系统性的偏差，必须在综合前进行对齐或改正；
- (2) 使用一次多项式无法精确地拟合不同 AC 间的基准差异，尤其是对钟差基准存在异常变化的 AC 产品；
- (3) 逐历元对齐法能够灵活地用于钟差基准对齐，不需要额外考虑基准的时变特性，且对齐精度高于拟合法，因此本文后续使用该方法对齐钟差基准。

2. 系统间偏差

单 GPS 钟差产品中的钟差改正数是相对于标准 GPST 而言的；为了保持统一，多系统 GNSS 钟差产品中的改正数也是相对于 GPST 而言的。但是不同 GNSS 系统的系统时是由各自地面控制中心的原子钟阵所维持的，因此不同 GNSS 系统时之间不可避免地存在差异，即“系统间偏差”。此外，GNSS 接收机对于不同系统信号的硬件延迟是不同的；因此，通常 PPP 参数估计中所说的系统间偏差 (ISB, Inter System Bias) 包含 GNSS 系统时之差和硬件延迟之差两个部分 (Cai et al., 2013)。在估计精密钟差时，需要

固定某一外接原子钟的基准站的钟差参数和其他系统相对于 GPS 的 ISB 参数，因此最终所得的多系统钟差产品中包含了该基准站接收机端的系统间偏差。但是不同 AC 估计卫星钟差时所选取的基准站是不同的，因此不同 AC 的钟差产品中存在系统间偏差的差异。绝对的系统间偏差是无法获取的，但是可以使用式(3.5)计算不同 AC 之间系统间偏差的差异。

$$\Delta B_{ij,t}^{G,\text{sys}} = \frac{1}{n} \sum_s (clk_{j,t}^s - clk_{i,t}^s) - \Delta D_{ij,t}^G \quad (3.5)$$

其中， $\Delta B_{ij,t}^{G,\text{sys}}$ 为 t 时刻 i、j 分析中心间 GNSS 系统 sys 相对于 GPS 的系统间偏差的差值；s 为不同分析中心间共有的 sys 系统卫星；n 为共有卫星的个数； $clk_{i,t}^s$ 和 $clk_{j,t}^s$ 分别为 i、j 分析中心提供的 t 时刻 s 卫星的钟差改正数； $\Delta D_{ij,t}^G$ 为根据式(3.4)计算的 t 时刻 i、j 分析中心间 GPS 钟差基准的差值。

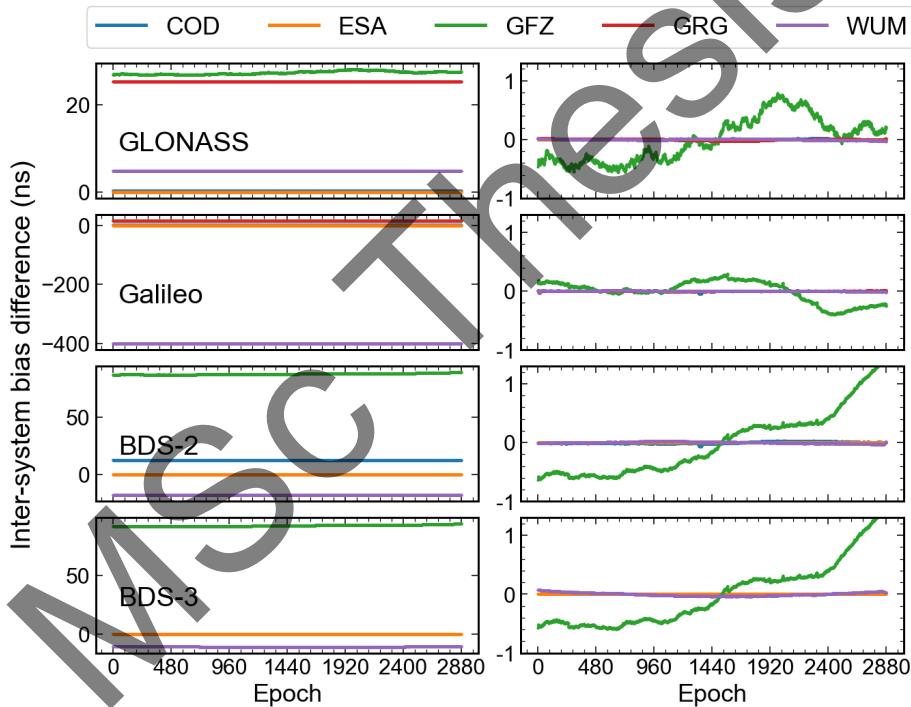


图 3.3 不同分析中心钟差产品间系统间偏差的差异

GFZ 也估计了天内常量的 ISB 参数，但是对每个系统分别对齐到广播星历，还对每个系统分别逐历元调整了拟合残差的中位数，所以异常为了直观地研究不同 AC 提供的钟差产品中系统间偏差的特性，图 3.3 绘制了依据式(3.5)计算所得的各个 AC 相对于 ESA 的系统间偏差的差异。图中左边一列展示的是直接计算所得的系统间偏差差异，右边一列显示的左列各 AC 减去自身均值后的情况，其中 COD 没有 BDS-3 的产品、GRG 没有 BDS-2/3 的产品。从左图可以看出不同 AC 间存在从几十到几百 ns 不等的系统间偏差差值，其中 WUM 相对于 ESA 的 Galileo 系统间偏差差值最大，达到了 400 ns。但是不同于 AC 间的基准差异，系统间偏差的差值

在 24 h 内较为稳定，基本可以视作常量，即可以对每个 AC 的各个 GNSS 系统估计一个相对于参考 AC 的系统间偏差的差值，并加以改正以达到对齐的目的。右图中去除均值后，不同 AC 的系统间偏差的差值接近于 0 且十分稳定，这更加印证了上述判断。但是 GFZ 再次出现了异常，在除去均值后它在正负 1 ns 的范围内呈现出了非线性的变化，这是无法通过简单的多项式精确拟合的。通过查阅 GFZ 的产品估计策略，可以发现 GFZ 对每个系统估计了一个接收机钟差参数，而不是估计相对于 GPS 的 ISB 参数，从而导致 GFZ 相对于其它 AC 的系统间偏差的差值不是一个常量。可以推断，在使用 GFZ 的多系统产品进行 PPP 解算时对每个系统都估计接收机钟差参数比估计天内为常量的 ISB 参数能取得更好的定位结果。

综合上述对不同 AC 间系统间偏差差值的研究，我们可以得出以下结论：

- (1) 不同 AC 间的系统间偏差的差值处在几十到几百 ns 不等的量级，远大于钟差基准的差异，并且属于系统间偏差，必须在综合前进行对齐或改正；
- (2) 除了 GFZ 外，其余 AC 间的系统间偏差差值在一天内呈稳定的常数，可以通过所有历元取平均的方式加以估计和对齐；
- (3) 目前为了兼容 GFZ 等系统间偏差表现较为异常的 AC，可以采用对齐钟差基准的方法，即逐历元校准到参考值。参考值可以选取某个 AC 或者所有 AC 系统间偏差的均值。

3. 模型误差

不同于具有明确几何意义的精密卫星轨道产品，精密钟差改正数并不完全是物理意义上的星载原子钟相对于系统时间的偏差，而是一个与精密轨道、卫星端天线 PCO、卫星姿态等改正量相耦合的、但整体内部自治的数学改正数。精密钟差除了包含前述的钟差基准和系统间偏差等物理量外，还吸收了部分卫星轨道误差、卫星端天线 PCO 误差、卫星姿态误差等。考虑到目前各个 AC 间卫星轨道差异不可忽略、使用的卫星姿态模型暂不统一等因素，在钟差综合前必须改正上述模型误差以达到 AC 间钟差最佳的一致性，以便于后续的综合过程中实施粗差探测。需要注意的是，绝对的轨道误差、卫星端 PCO 误差、姿态误差是无法获取的，只需要计算并改正 AC 之间相对的模型误差，就可以统一不同 AC 的钟差产品。对于用户而言，则需要使用与钟差综合时相一致的参考轨道（一般为综合轨道）、参考卫星端 PCO 改正和参考卫星姿态就可以得到自治的定位结果。

(1) 轨道误差

目前，GPS 可以达到厘米级的定轨精度，其中径向轨道精度最高，可以达到 1-2 cm，转化为对应的时间则约为 35-70 ps (Guo et al., 2016)。由于 GPS 卫星运行在离地约 2 万公里的高空，其轨道径向与接收机观测时的视线方向十分接近，因此轨道径向误差与卫

星钟差的耦合性最强，对其进行改正便可以实现较好的轨道误差校正。目前 IGS 钟差综合使用 Kouba et al. (2001) 提出的轨道误差改正公式：

$$\Delta m_{\text{orb},t}^s = \frac{(X_{\text{AC},t}^s - X_{\text{ref},t}^s) \cdot X_{\text{AC},t}^s}{c \cdot R_t^s} \quad (3.6)$$

其中， $\Delta m_{\text{orb},t}^s$ 为 t 时刻卫星 s 的钟差改正数中吸收的相对于参考轨道（一般为综合轨道）的径向误差； $X_{\text{AC},t}^s$ 和 $X_{\text{ref},t}^s$ 分别为单个 AC 轨道和参考轨道提供的 t 时刻卫星 s 在地心地固坐标系下的三维坐标；c 为真空中的光速； R_t^s 为 t 时刻 s 卫星轨道相对于地心的距离，可根据单个 AC 的轨道或参考轨道计算。

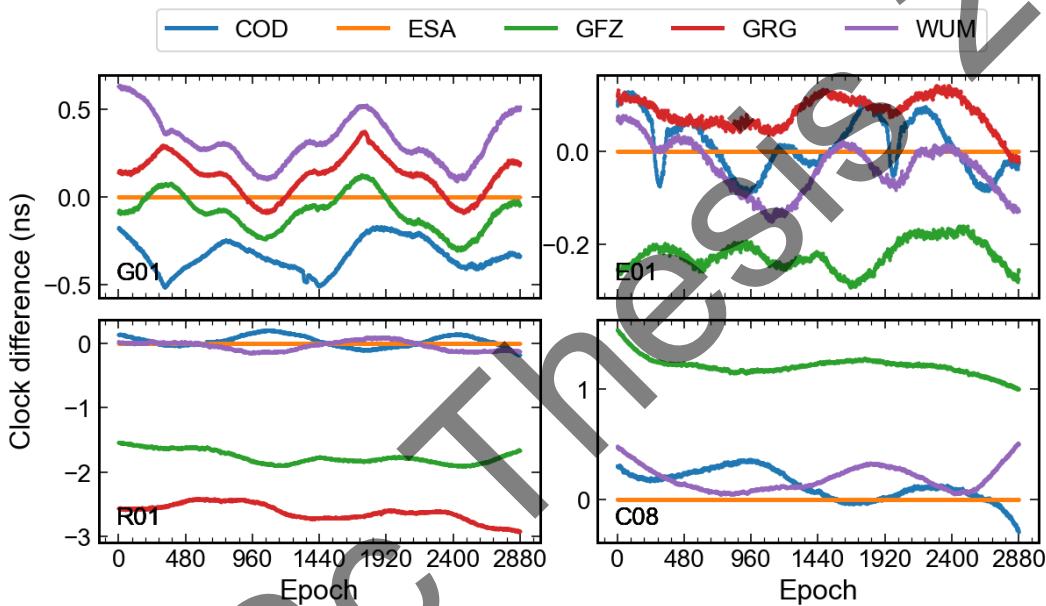


图 3.4 不同分析中心间轨道差异对精密钟差的影响

图 3.4 展示了已经对齐钟差基准和系统间偏差的后的各个 AC 相对于 ESA 的 G01、E01、R01 和 C08 四颗卫星的钟差差值的时间序列。从图中可以看出，对于同一颗卫星，不同 AC 间除了存在常量偏差（初始钟偏差）外还表现出了互不相同的非线性变化，且具有与卫星轨道周期相近的变化周期性，这就是 AC 间轨道差异导致的钟差差异。显然这些不规则的钟差差异一方面不利于 AC 间钟差一致性的统一，另一方面不利于粗差探测。使用式(3.6)改正后的钟差差值序列如图 3.6 (G01 和 E01) 和图 3.7 (R01 和 C08) 各自的左边一列所示。可以发现除了 R01 卫星外，其余卫星经过径向轨道差异改正后均有效的消除了图 3.4 中的非线性变化，而呈现出稳定的常值偏差。但是 R01 还存在显著的线性趋势以及量级更小的非线性变化，这主要是由目前 GLOANSS 轨道产品普遍较大的切向和法向误差导致的，相关的讨论将在 3.4.3 节中展开。目前对于 GPS 和 Galileo 卫星而言，轨道径向差异的改正已经足以消除轨道差异的影响。

(2) 卫星端 PCO 误差

卫星端 PCO 误差与轨道误差类似，也可以分为径切法三个方向上的分量。同理可得，卫星 PCO 改正数高方向的误差与卫星钟差是高度耦合的。目前，绝大部分 AC 在估计精密卫星轨道和钟差产品时均使用 IGS 提供的基于 ANTEX 格式的（Antenna Exchange Format）atx 文件来改正卫星天线和接收机天线的 PCO。因此，即使 IGS 的 atx 文件相对于 PCO 的绝对真值存在误差，由此导致的各个 AC 的钟差变化也是相同的，所以 AC 间钟差的一致性一般不受 atx 文件中 PCO 误差的影响。但倘若个别 AC 使用的 atx 文件不同，那么对应的 PCO 改正数的差异就会体现在 AC 间的钟差差值中。具体而言，目前 COD 日常提供的多系统 GNSS 产品使用的 atx 是名为 M14.ATX 文件，其中 Galileo 的 PCO 改正数采用的是 GSA (European GNSS Agency) 发布的数值，与 IGS 发布的 atx 文件中的改正数不同。因此，对 COD 而言需要改正由 PCO 差异导致的卫星钟差差值。具体可以采用如下的简化公式进行改正：

$$\Delta m_{\text{pcos}}^s = -\left(U_{AC}^s - U_{ref}^s\right) / c \quad (3.7)$$

其中， Δm_{pcos}^s 是由 PCO 改正数差异引起的 AC 间卫星 s 的钟差差值； U_{AC}^s 和 U_{ref}^s 分别是单个 AC 使用的 PCO 高方向的改正数和参考 PCO 的高方向改正数； c 为真空中的光速。需要注意的是，上式等号右边的负号代表卫星端天线高方向的 PCO 与卫星轨道的径向是反向的。

(3) 姿态误差

卫星姿态模型 (Kouba, 2009b) 在 PPP 定位中的作用体现在两个方面。首先，姿态模型是连接星固系和地固系的纽带，即卫星端天线的 PCO 需要根据卫星姿态旋转至地固系后方可使用；其次，相位缠绕误差需要卫星姿态作为输入参数 (王晨等, 2017)。目前各个 AC 使用的卫星姿态模型尚不统一，但是它们的差异主要体现在偏航角，加之卫星端 PCO 的水平分量远小于垂直分量 (陈星宇, 2020)，因此姿态差异对 PCO 改正的影响不大。相比之下，在地影期等卫星姿态快速变化的时期，姿态差异引起的相位缠绕改正数变化可达数十厘米。由于钟差估计时模糊度参数通常作为常量进行估计，因此这部分差异无法被模糊度吸收，而是会被模型化为白噪声的卫星钟差参数完全吸收，从而导致 AC 间的钟差差值出现与姿态差异相一致的变化 (图 3.5)。由于卫星姿态与相位缠绕之间具有明确的函数关系，因此可以使用 Loyer et al. (2021) 提出的公式进行改正：

$$\Delta m_{att,t}^s = \frac{\Delta \varphi_t^s}{2\pi \cdot f_{NL}^s} \quad (3.8)$$

其中， $\Delta m_{att,t}^s$ 为姿态差异导致的 t 时刻卫星 s 的钟差差值； $\Delta \varphi_t^s$ 为 t 时刻 AC 间

卫星 s 的偏航角差值; f_{NL}^s 为卫星 s 对应的窄巷线性组合的频率。

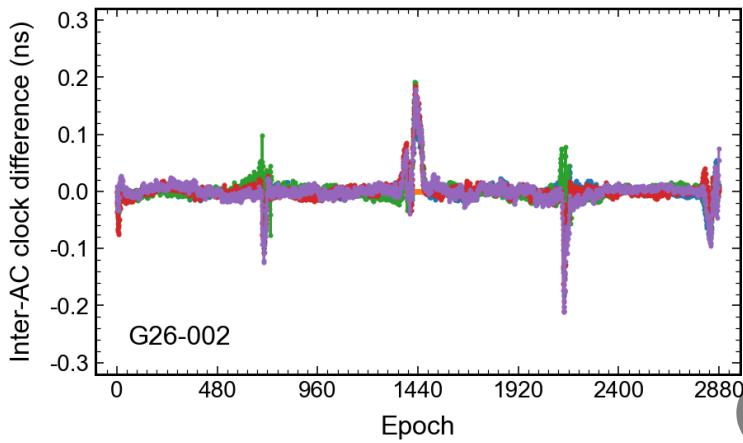


图 3.5 AC 间的姿态模型不一致导致的钟差差异

目前, 用于描述卫星姿态模型的标准格式 ORBEX (Orbit Exchange Format) 已经制定 (Loyer et al., 2019), 并在 IGS 第三次重处理中得到了应用, 用于验证 AC 额外提供卫星姿态文件对钟差综合的作用。需要注意的是, AC 间的卫星姿态模型只有在地影期时才会出现显著的差异; 非地影期时各 AC 均采用名义模型, 不存在显著的姿态差异, 对卫星钟差综合的影响可以忽略不计。考虑到目前大部分 AC 日常提供的产品中还没有包括姿态文件, 因此本文除 4.2.4 节外, 其余的钟差综合实验均未改正姿态差异。

4. 初始钟偏差与钟差估计误差

由于载波相位观测值包含模糊度, 不是绝对的距离观测量, 因此无法单独使用进行卫星钟差估计。实际计算时, 需要联合低精度的伪距观测值一起估计卫星钟差。其中, 伪距观测值具有绝对的测距能力, 可以约束钟差基准, 而载波相位观测值的模糊度一旦收敛便可以精确地确定历元间的钟差变化量 (Guo et al., 2017)。但是 GNSS 的伪距观测值精度较低, 理论上 GPS 的 C 码只有 3 m 的测距精度, P 码观测值精度为 30 cm, 仍然远低于载波相位 mm 级的精度水平。因此, 由伪距观测值确定的每颗卫星的钟差基准是不够精确的, 受测站观测值质量的影响较大, 这部分由伪距观测值的测量误差所导致的每颗卫星不同的基准偏差被称为初始钟偏差, 也是导致 IGS 钟差产品天间不连续的主要原因 (Rovira-Garcia et al., 2021)。需要指出的是, 初始钟偏差也受卫星端伪距硬件延迟的影响, 即各个 AC 使用不同的 DCB 改正产品也会引起初始钟偏差的差异。

考虑到不同 AC 在钟差估计时所选用的地面观测数据是不同的、伪距和相位的定权策略也不同, 这就导致不同 AC 钟差产品中包含的初始钟偏差是不统一的, 需要对每颗卫星单独进行对齐。具体公式如下:

$$\Delta b_{ij}^s = \frac{1}{n} \sum_k^n \left(clk_{j,k}^{',s} - clk_{i,k}^{',s} \right) \quad (3.9)$$

其中, Δb_{ij}^s 为 i、j 分析中心间 s 卫星对应的初始钟偏差的差值; n 为总的历元数; $clk_{i,k}^{s'}$ 和 $clk_{j,k}^{s'}$ 分别为 i、j 分析中心提供的已经经过钟差基准、系统间偏差和模型误差改正的卫星钟差。

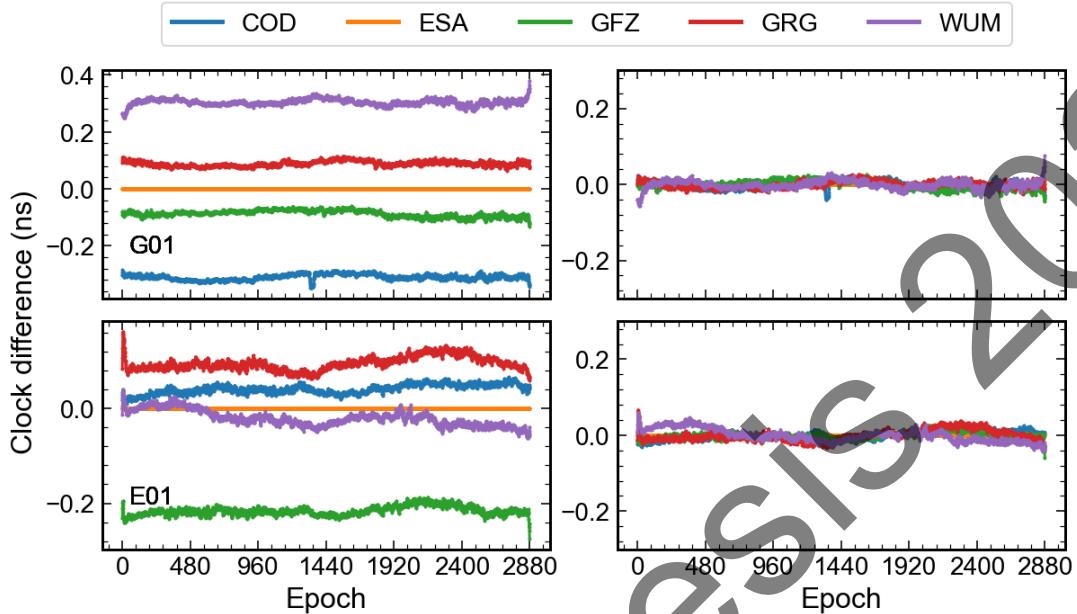


图 3.6 GPS、Galileo 卫星初始钟偏差及钟差估计误差的特性

图 3.6 的左边一列分别展示了各个 AC 相对于 ESA 的 G01、E01 卫星初始钟偏差的差异。可以发现 AC 间 G01 和 E01 对应的初始钟偏差的差值较为稳定, 量级约为几百 ps, 可以通过所有历元取平均的方式对齐到参考值。对齐初始钟偏差后的一致性如图 3.6 右列所示, 可以直观的观察到各个 AC 间的一致性良好, 仅存在几 ps 至几十 ps 不等的微小差异, 这主要是相位观测值决定的钟差估计误差以及未完全改正的模型差异等。至此, 钟差产品中的粗差可以较为容易地被探测, 例如图 3.6 中 COD 的 G01 卫星在 1440 历元处有一 20 ps 左右的突起, 与其它 AC 有明显的不一致性, 因此可以被标记为粗差, 从而获得相对于单个 AC 更加稳定可靠的综合钟差。

图 3.7 左边一列展示的是 AC 间 R01、C08 和 C33 等三颗卫星的初始钟偏差的差异。可以发现 R01 的初始钟偏差差异较大, 可以达到几个 ns; 并且在去除均值后存在显著的线性趋势和非线性变化, 这主要是未经模型完全改正的轨道差异的体现, 由于目前 GLOASSS 的轨道径向和法向误差较大且无法用式(3.6)加以改正, 因此可以预测 GLONASS 系统的钟差综合效果可能不如 GPS 和 Galileo 系统。对于 C08 而言, GFZ 相对其它 AC 呈现出 1 ns 左右较大的初始钟偏差差值; 对齐初始钟偏差后 AC 间 C08 的钟差一致性与 G01、E01 相近。C33 是一颗北斗 3 代卫星, 只有 ESA、GFZ 和 WUM 三家分析中心提供了产品, 其中 GFZ 也呈现了 1 ns 左右的较大差异。在对齐初始钟偏差后, GFZ 在 500 历元之前的钟差改正数表现出了类似于模糊度收敛的形式, 这可能是因

为 GFZ 使用的地面观测数据中能观测到 C33 卫星的测站数量不足、或者是 GFZ 的 C33 卫星轨道产品具有较大的切向或法向误差。

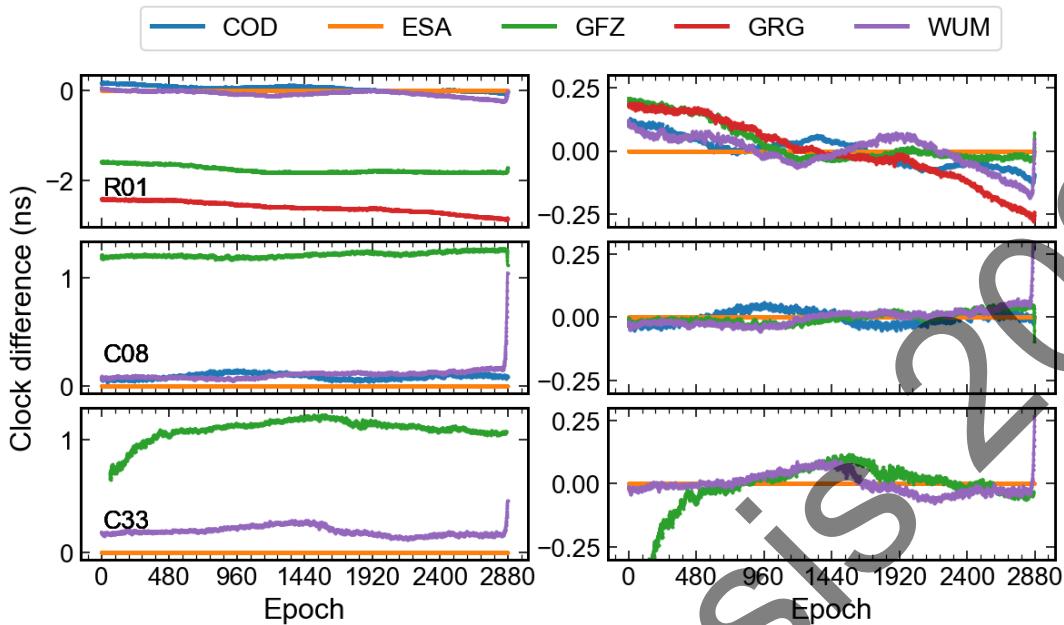


图 3.7 GLONASS、北斗-2/3 卫星的初始钟偏差及钟差估计误差的特性

综合上述对不同系统的初始钟偏差和钟差估计误差的研究，我们可以得出以下结论：

- (1) 对所有 GNSS 卫星而言，不同 AC 间的初始钟偏差的差值处在几百 ps 至数 ns 不等的量级，且 24 h 内表现为一稳定的常数，可以通过天内取平均的方式对齐到参考值；
- (2) 对齐式(3.3)中 AC 钟差产品间所有的系统性差异后可以评估 AC 间精密钟差产品的一致性，即钟差估计精度，在此基础上进行综合可以实现粗差探测等质量控制算法，从而获得较单个 AC 更加稳定可靠的精密钟差产品；
- (3) 目前 GPS 和 Galileo 卫星的钟差一致性最好，可以达到 10 ps 左右；
- (4) GLONASS 系统由于目前的轨道精度较低，切向和法向的轨道误差无法忽略，使用式(3.6)无法完全改正轨道误差导致的钟差差异，钟差一致性较差，不利于钟差综合和抗差估计；
- (5) BDS-2 和 BDS-3 卫星的钟差一致性略低于 GPS 和 Galileo，这主要是目前能观测到 BDS-2/3 卫星的测站数量较少，且全球分布情况不如 GPS 和 Galileo 系统，从而更有可能产生较大的估计误差。

3.2 精密钟差综合算法

3.2.1 钟差综合流程

在 3.1 节中，我们使用 5 家 AC 目前提供的多系统 GNSS 精密卫星轨道和钟差产品研究了钟差各个构成部分的时变特性，并针对性地制定了相应的处理方案，基于此得到的北斗/GNSS 精密钟差综合流程可以总结如下：

1. 模型误差校准

根据公式(3.6)至(3.8)依次改正轨道差异、卫星天线 PCO 差异以及卫星姿态模型不统一引起的相位缠绕差异。需要注意的是，本文除特别说明外均不改正姿态差异。

2. 钟差基准对齐

除 GFZ 外，其余 AC 间的钟差基准差值大体上满足随时间线性变化的规律，但是局部存在细微的变化。同时考虑到 GFZ 非线性变化的钟差基准，采用逐历元校准的方式对齐每个 AC 的钟差基准。参考值可以选择某个 AC 或多个 AC 钟差基准的等权平均值；抑或是多个 AC 钟差基准线性拟合结果的平均值，以此兼容 IGS 的基准对齐策略。

3. 系统间偏差对齐

除 GFZ 外，其余 AC 间的系统间偏差差值为天内常数，可以通过取平均的方式进行估计和对齐。但是为了兼容 GFZ 非线性变化的系统间偏差，仍然采用逐历元校准的方式对齐各个 AC 的系统间偏差。参考值可以选择某个 AC 或者多个 AC 的等权平均值。

4. 初始钟偏差对齐

排除模型改正的残余误差和钟差估计误差的影响外，所有 AC 卫星间的初始钟偏差差值都满足天内常量的性质，对每一颗卫星可以计算其所有历元相对于参考值差值的平均值，并加以校准。参考值可以选择某个 AC 或者多个 AC 的等权平均值。需要注意的是，如果精密钟差估计时因为数据剔除等原因导致钟差估计中断，那么初始钟偏差也会产生跳变。因此必须探测钟差产品中潜在的中断情况，并分段对齐初始钟偏差。

5. 迭代加权平均

使用经过上述 4 步系统性偏差改正后的钟差产品，迭代地进行加权平均与质量控制的操作。各 AC 初始权重设置为等权，后续的权重根据 AC 钟差与前一次综合钟差差异的 RMS 值确定。若前后两次迭代的权值差异绝对值总和不超过 0.03，则中止迭代。根据经验，最大迭代次数可以设置为 5 次，一般情况下经过 3-4 次迭代即可收敛。

6. 对齐到 GPST

GPS 广播星历中的卫星钟差改正信息包含了地面控制中心确定的 GPST 的时间尺度信息，需要将综合产品的时间基准校准到 GPST。具体方法为计算综合钟差的 GPS 星座相对于广播星历的差值序列，对其拟合一次线性多项式，最后使用拟合的一次多项式

调整综合钟差的基准至 GPST。

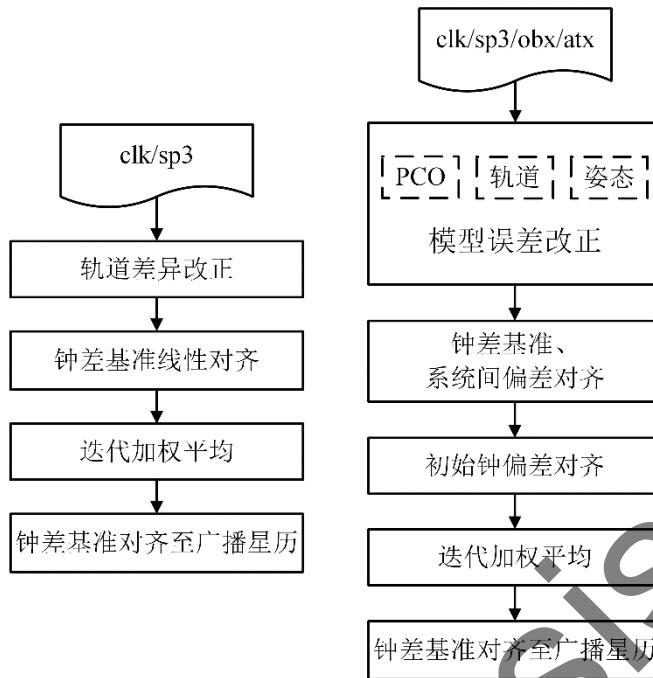


图 3.8 IGS 钟差综合流程（左）与本文提出的面向北斗/GNSS 钟差综合流程（右）

图 3.8 展示了 IGS 的钟差综合流程和本文提出的面向北斗/GNSS 的钟差综合流程。IGS 的钟差综合策略由 Kouba et al. 在 2001 年提出，但是由于目前没有额外的文献描述 IGS 内部钟差综合策略的改进，该流程图可能与目前 IGS 实际采用的策略存在细微的差异，例如初始钟偏差的处理等。相较而言，本文提出的钟差综合策略对 AC 钟差产品间中存在的系统性差异做了更为细致的研究和处理，尤其考虑了 multi-GNSS 情形下出现的系统间偏差等，弥补了传统的 IGS 钟差综合算法无法处理多系统 GNSS 钟差的不足。

3.2.2 质量控制算法

单个 AC 提供的钟差产品中除了上述的系统性差异外，还或多或少地存在粗差等异常情况，因此经过严格对齐的 AC 钟差产品仍然需要合适的质量控制算法进行鲁棒的抗差综合。图 3.9 展示了多系统 GNSS 钟差综合时常见的粗差示例。首先，AC 的钟差产品个别历元可能会出现与其他 AC 显著不同的粗差值，这样的情况影响较小，可以在逐历元综合时根据与其他 AC 的一致性加以剔除。其次，某颗卫星的钟差值在天内可能出现分段或者跳变，这主要是产品估计时数据剔除或者数据中断导致的卫星初始钟偏差重新确定；若不加以正确的处理，会严重降低综合钟差的精度。最后，AC 产品估计过程中出现的错误，例如模糊度固定出错、定轨精度异常等，会导致钟差产品出现较大的计算误差，若不加以识别同样会影响综合钟差的精度。因此，质量控制算法是钟差综合中的重点与难点，必须根据实际情况设计合适的方案。

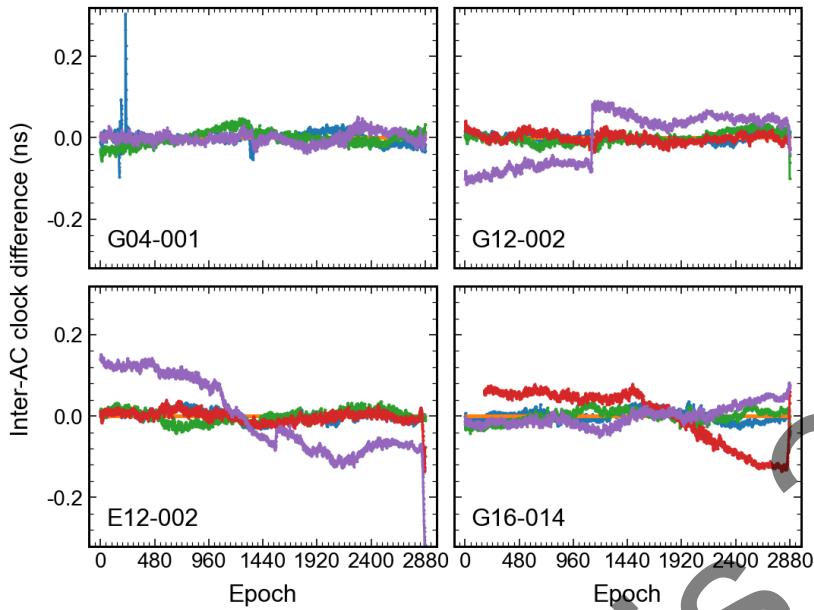


图 3.9 钟差综合中的典型粗差示例

本文主要采用绝对偏差中位数 (Median Absolute Deviation, MAD) 作为统计指标进行钟差综合时的质量控制。对于单变量序列 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, 可以计算其中位数 $\tilde{X} = median(X)$, 基于此 MAD 的定义如下:

$$MAD = median(|X_i - \tilde{X}|) \quad (3.10)$$

特别地, 在序列 X 满足正态分布的情况下, 其标准差 σ 和 MAD 存在如下的关系:

$$\sigma \approx \frac{MAD}{0.6745} \quad (3.11)$$

常规的标准差 σ 计算方法是基于偏离序列均值的平方和, 因而易受到序列中粗差值的影响, 从而使计算所得的 σ 偏大。而式(3.11)中基于 MAD 计算所得的 σ 具有更好的抗差性, 能够更加可靠的用于粗差探测 (周江文等, 1997)。本文在钟差迭代加权平均的过程中, 主要分粗差探测和定权策略两个方面进行质量控制。

1. 粗差探测

迭代加权平均时, AC 的原始钟差已经经过了模型差异改正、钟差基准对齐等严密的系统性偏差改正, 从而具有较好的一致性。因此, 在逐历元综合钟差时, 能够根据 AC 间的钟差一致性探测粗差。对于某颗卫星当前历元所有 n 个 AC 提供的钟差改正数序列 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 根据下式计算钟差综合值以及相应的 RMS 值:

$$\bar{x} = \sum_i^n w_i \cdot x_i$$

$$RMS = \sqrt{\sum_i^n w_i (x_i - \bar{x})^2}$$
(3.12)

其中, \bar{x} 为当前历元的初次综合值; n 为历元总数; w_i 为各个 AC 归一化的权值, 初次综合时可设为等权。若 RMS 超过预设的阈值, 则说明当前历元 AC 间的钟差一致性不佳, 需要进行粗差探测。根据经验, 本文实验时将该阈值设定为 20 ps。首先根据 MAD 方法计算序列 x 的标准差 σ , 然后根据下式进行粗差探测, 若发现粗差则需重新综合当前历元, 并更新 \bar{x} ; 该过程可以根据需要重复进行。

$$|x_i - \tilde{x}| > k \cdot \sigma$$
(3.13)

其中, $\tilde{x} = median(x)$; k 为逐历元粗差探测时的阈值, 根据 AC 间钟差的一致性情况可以选择 3-6 之间的合适值。特别地, 对于不同的 GNSS 系统可以选择不同的 k 值, 以适应 AC 间不同系统的钟差产品一致性存在差异的现实情况。

2. 定权策略

在得到可靠的初始综合钟差后, 可以将各个 AC 的钟差按卫星逐一与综合钟差做差, 得到随历元变化的差值序列 $d_i^s = x_i^s - \bar{x}_i^s$, 并计算该序列的 RMS^s 。基于所有 AC 共有的卫星集 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$, 根据下式计算每个 AC 的权重:

$$w_i = \frac{\sum_{k=1}^{nac} \sum_{s=1}^{nsat} RMS_k^s}{\sum_{s=1}^{nsat} RMS_i^s}$$
(3.14)

其中, i 代表当前待定权的 AC; RMS_i^s 是 i 分析中心的 s 卫星相对于综合钟差的均方根; w_i 为 i 分析中心下一轮迭代的权值, 需要进行归一化。

3.3 精密钟差综合算法验证

3.3.1 IGS 钟差综合对比

为了验证本文提出的面向北斗/GNSS 钟差综合算法的正确性和有效性, 本节首先使用 2019 年全年 COD、EMR、ESA、GFZ、GRG 和 JPL 等 6 家 AC 提供的单 GPS 系统的精密产品进行钟差综合实验, 参考轨道使用 IGS 的综合轨道。钟差产品采样率均为

30 s，轨道采样率均为 15 min。鉴于轨道产品的特殊性，本文拼接当天和后一天的轨道产品以补全当天最后 15 min 的轨道缺失，轨道内插采用 Neville 方法。最终全年的钟差综合结果将与 IGS 日常的综合结果进行对比，以检验算法的正确性。

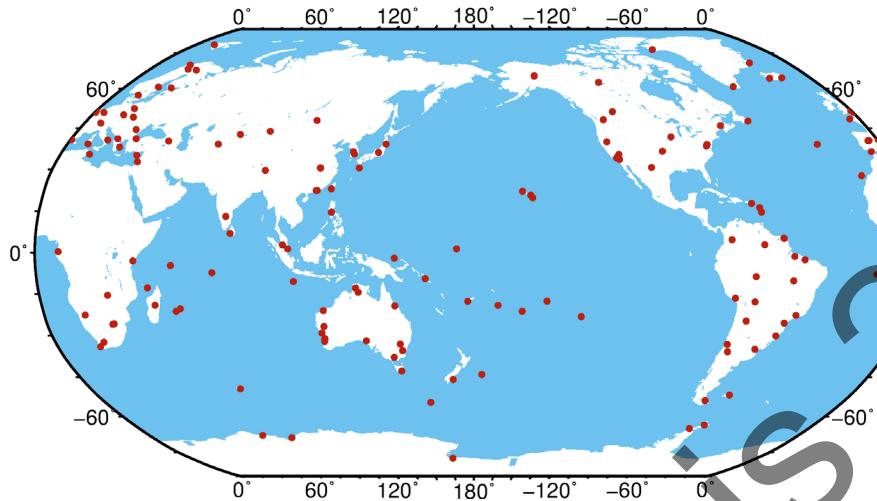


图 3.10 PPP 定位实验全球测站分布

除了直接对比 GPS 钟差的综合情况，本文还使用如图 3.10 所示的全球均匀分布的 IGS 测站进行 PPP 静态和动态定位实验，以对比综合产品相对于 IGS 以及单个 AC 产品的定位性能，其中定位测试时使用的是 IGS 30 s 采样率的综合钟差产品。需要注意的是，G04 卫星在 2019 年由于 GPS 系统调整的原因，其观测数据质量较差，导致产品精度以及 AC 间的一致性都不佳，因此 G04 虽然参与了本文的钟差综合实验，但是未参与加权也未包含在后续的结果分析中。同时为了后续讨论的方便，基于本文提出的钟差综合算法得到的综合产品记为 CMB。

首先，为了检验 CMB 和 IGS 综合时对 AC 加权的一致性，我们提取了 2019 年 365 天 IGS 钟差综合报告 cls 文件中的 AC 权重信息，同时绘制了 CMB 综合结果的权重信息，结果如图 3.11 所示。从图中可以看出，总体而言 CMB 和 IGS 的对各个 AC 的权重配比是相近的，尤其是 EMR、GFZ 和 GRG 在左右两图中基本处在相同的水平线上，但是 GRG 的权重波动 CMB 较 IGS 略大。此外，CMB 赋予 COD 的权值略大于 IGS，而 ESA 和 JPL 的权值略低于 IGS，这可能和两种综合策略采取的钟差基准对齐方法不同，从而导致 AC 间的钟差一致性存在细微的差异。表 3.1 统计了全年 CMB 和 IGS 综合时赋予各个 AC 的平均权重，可以发现统计值与图 3.11 显示的结果相一致，COD 的权重 CMB 比 IGS 大 2%，而 ESA 和 JPL 的权重分别比 IGS 低 1.9% 和 1.5%，其余 AC 的权重则十分接近。这证明了本文提出的多系统钟差综合策略和定权方式是合理的，与目前 IGS 使用的单 GPS 钟差综合策略有较好的一致性。

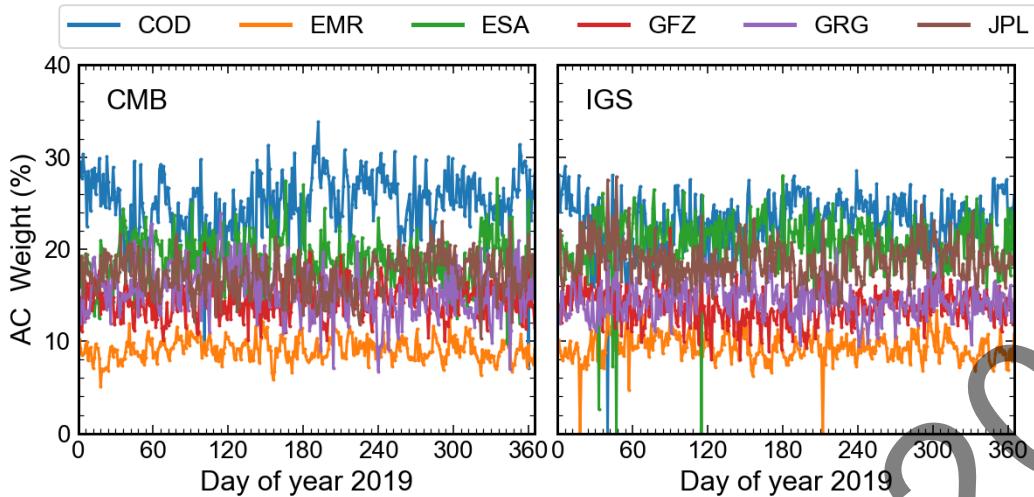


图 3.11 2019 年 GPS 钟差产品综合 AC 权重对比

表 3.1 2019 年 GPS 钟差产品综合 AC 权重统计

分析中心	CMB (%)	IGS (%)
COD	24.9	22.9
EMR	9.1	9.3
ESA	18.7	20.6
GFZ	14.6	13.8
GRG	15.5	14.5
JPL	17.2	18.9

但是，图 3.11 中 IGS 个别天的个别 AC 权值存在异常情况，如 EMR 的 018 和 212 天、ESA 的 033、044、047、115 天以及 COD 的 040 天等权值很低，甚至直接等于 0。我们查看了相应天 IGS 的 cls 文件，发现 IGS 使用一次多项式拟合了这些 AC 问题天的钟差基准，但是钟差综合时并没有使用对应的钟差产品，由此可以推断 IGS 可能根据钟差基准拟合的残差大小剔除了这些天的问题产品。于是我们绘制了 IGS 定权异常天的 AC 间钟差基准的差异图并证实了这一推断，除 018 天 EMR 的钟差一致性确实较差外，其余问题天的 AC 个别历元的钟差基准存在极大的异常值或者存在与 GFZ 多系统产品类似的非线性变化，导致线性拟合的残差较大，按照 IGS 的质量控制原则将整个 AC 的钟差产品剔除。图 3.12 展示了 047 天 ESA 的钟差基准出现异常的情况，可以清楚的看出在 2400 历元前后 ESA 的钟差基准出现了多处几百 ns 的突变，这显然会导致一次多项式拟合后极大的残差。

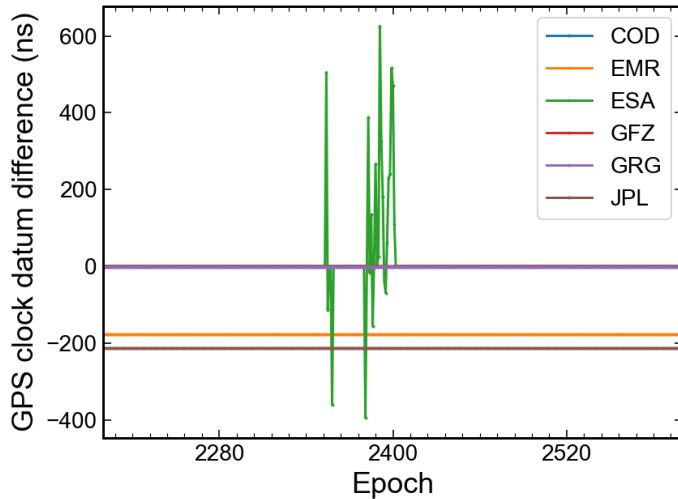


图 3.12 2019 年 047 天 ESA 的 GPS 钟差产品基准异常情况

但是，按照本文提出的逐历元校准钟差基准的综合策略，可以有效避免这一问题，且能够更好的对齐钟差基准，利于后续的综合。同时，我们也检查了这些天的钟差一致性，结果显示逐历元对齐钟差基准并去除其他的系统性差异后，AC 间的钟差一致性良好，与正常天的一致性没有明显的差异。

表 3.2 2019 年 IGS 和 CMB 钟差综合 RMS 统计（单位：ps）

综合策略	均值	最小值	最大值	75% 分位数
IGS	10.9	4.0	66.9	11.6
CMB	10.0	3.2	46.8	10.9

为了进一步比较 CMB 和 IGS 钟差综合结果的差异，我们绘制了如图 3.13 所示的所有天所有卫星综合结果的 RMS，即所有 AC 的钟差产品相对于综合结果的 RMS，RMS 值越小代表 AC 间钟差的一致性越高，统计结果见表 3.2。需要注意的是，G04 卫星虽然参与了综合，但是 AC 间的一致性不佳，多数天的 RMS 值远超 80 ps，不利于对其他卫星的分析，因此没有在图中画出。从图 3.13 可以看出，整体上 IGS 和 CMB 的 RMS 数值十分接近，IGS 和 CMB 综合结果的 RMS 平均值分别为 10.9 ps 和 10.0 ps，CMB 的综合结果略优。这主要是因为 IGS 的综合结果在 018、033 和 212 这 3 天出现了异常（对应图 3.13 中明显的 3 条红色竖线），而这 3 天正好与图 3.11 中 IGS 权重配比异常的天相重合，这说明剔除整个 AC 的钟差产品的抗差做法是存在风险的，可能会导致一致性不佳的综合结果，这也符合冗余观测越多越利于抗差估计的认识。此外，IGS 综合结果中 G18 在全年的 RMS 值相对于其他卫星而言明显偏大（对应图 3.13 中红色的横线）。这是因为 G18 在 2019 年是一颗 BLOCK IIA 卫星，卫星型号较老、性能较差，尤其是地影期的姿态控制不佳，各个 AC 对其地影期的姿态建模差异较大，甚至可能会

剔除地影期前后的观测数据，这些因素综合导致了 G18 卫星的钟差一致性不佳。但是相比之下，CMB 能够获得一致性较好的 G18 卫星综合结果，这主要得益于稳健的粗差探测和质量控制方法。

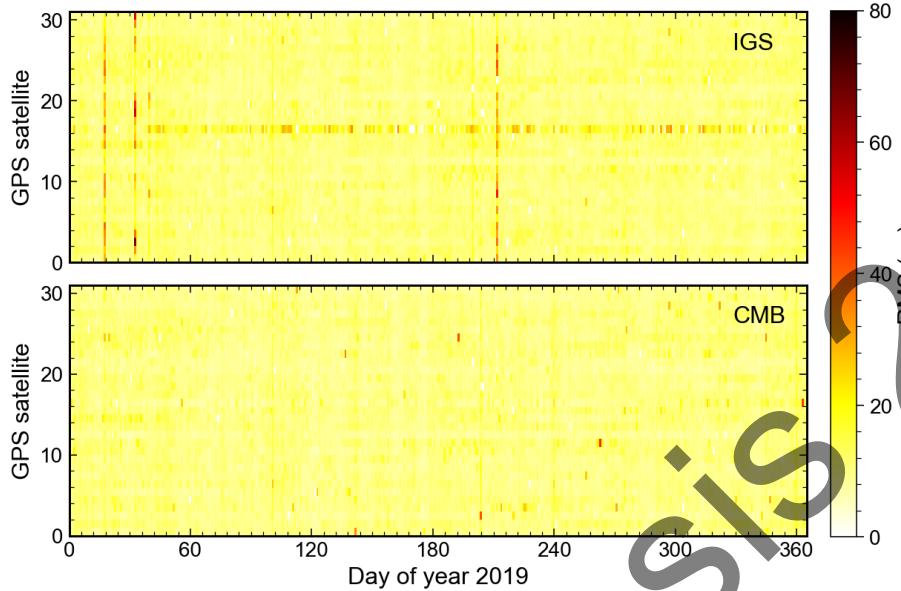


图 3.13 2019 年 IGS 和 CMB 钟差综合的 RMS

综合上述 CMB 和 IGS 的钟差综合结果的直接对比，可以发现在综合 GPS 钟差时，本文提出的面向北斗/GNSS 多系统钟差综合算法与 IGS 传统的钟差综合方法在 AC 权重配比、综合钟差的 RMS 等方面有较好的一致性，同时在 AC 或者卫星异常的情况下本文的方法较 IGS 有明显的改进。

3.3.2 PPP 定位对比

为了进一步验证综合钟差相对于原始 AC 钟差的改进、以及对比 CMB 和 IGS 综合钟差在定位性能上的差异，我们使用图 3.10 展示的全球分布的 170 个测站进行了 2019 年全年的 PPP 静态和动态解算，并统计了相应的定位结果。其中，静态定位的参考真值选用 IGS 的 SINEX (Solution Independent Exchange Format) 格式的测站坐标周解文件，并且进行了 Helmert 七参数转换，以消除潜在的系统性误差，统计每天所有测站坐标与参考真值差异的 RMS。对于动态定位的统计，我们直接使用天解的静态坐标作为参考真值，以避免与 IGS 提供的测站坐标间的系统性差异，同时静态解 mm 级的位置精度满足动态定位精度评估的需求。

图 3.14 展示了分别使用 COD、CMB 和 IGS 的产品进行静态定位的 RMS 时间序列。需要注意的是 CMB 和 IGS 的定位使用的轨道均为 IGS 提供的综合轨道，两者的差异仅在于钟差产品，由此可以对比综合钟差定位性能的差异。从图中可以看出，相比于

使用单个 AC 的产品而言，综合产品对应的静态定位结果更加稳定可靠。例如在 100 天附近，COD 的定位精度有较多天显著地低于 IGS 和 CMB。这是因为单个 AC 的精密卫星产品会不可避免地存在粗差等异常值；而当 AC 间产品的一致性整体上较好时，通过模型改正保持轨道、钟差等产品的一致性，同时迭代的抗差加权平均可以剔除粗差，从而获得比单个 AC 更加可靠的精密产品。对比 CMB 和 IGS 产品对应的定位结果，可以发现两者在大部分天都基本重合，只在少数几天存在细微的差异，而东方向的差异相对显著，这更加印证了 CMB 和 IGS 产品整体的一致性。

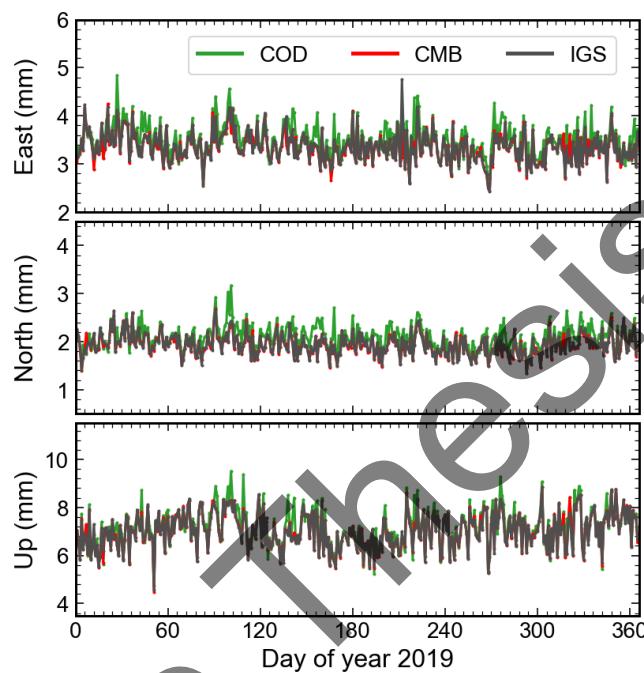


图 3.14 单 GPS PPP 浮点解静态定位精度的时间序列

表 3.3 2019 年单 GPS PPP 浮点解静态定位精度统计

产品来源	静态定位精度 (mm)		
	East	North	Up
COD	3.5	2.1	7.2
EMR	3.8	2.2	7.5
ESA	3.4	2.0	7.2
GFZ	3.5	2.1	7.2
GRG	3.7	2.2	7.5
JPL	3.5	2.1	7.2
IGS	3.4	1.9	7.0
CMB	3.3	1.9	7.0

2019 年 365 天静态定位 RMS 的统计结果如表 3.3 所示。从中可以看出，目前使用 IGS 测站单 GPS 系统的静态定位可以达到平面 2-4 mm、垂直 7 mm 左右的定位精度。综合产品的定位精度优于绝大部分 AC 的结果，尤其是高方向。CMB 在东、北、高三个分量分别达到 3.3 mm、1.9 mm 和 7.0 mm 的定位精度，在东方向的精度比 IGS 高 0.1 mm，其余两个方向的精度数值相等。这与图 3.14 展示的结果是一致的，即 CMB 与 IGS 对应的定位结果有着良好的一致性，且具有比单个 AC 产品更好的定位性能。CMB 和 IGS 定位结果的差异不显著也可以由图 3.13 进行解释，两者钟差综合的精度相当，即使对 G18 卫星而言也只有 20-30 ps 的差异，转化为距离单位则不到 1cm，即这样微小的钟差差异对定位的影响是十分微弱的。

图 3.15 展示了使用 COD、CMB 和 IGS 的产品进行动态定位的精度统计时间序列。总体而言，动态定位的精度较为稳定，基本维持在平面 1-2 cm、垂直 3-4 cm 的水平。但是相对于静态定位结果，COD 产品的定位精度出现了数量更多且量级更大的异常值，这说明动态定位时综合产品抗差的优势更加明显。同样地，CMB 和 IGS 的产品对应的定位精度没有显著的差异，两者基本重合。表 3.4 的统计结果也印证了这一点，IGS 和 CMB 的平均动态定位精度相等，在东、北、高三个方向分别达到了 1.47 cm、1.20 cm 和 3.42 cm，在东方向和高方向的定位精度相对于单个 AC 产品的提升更加明显。

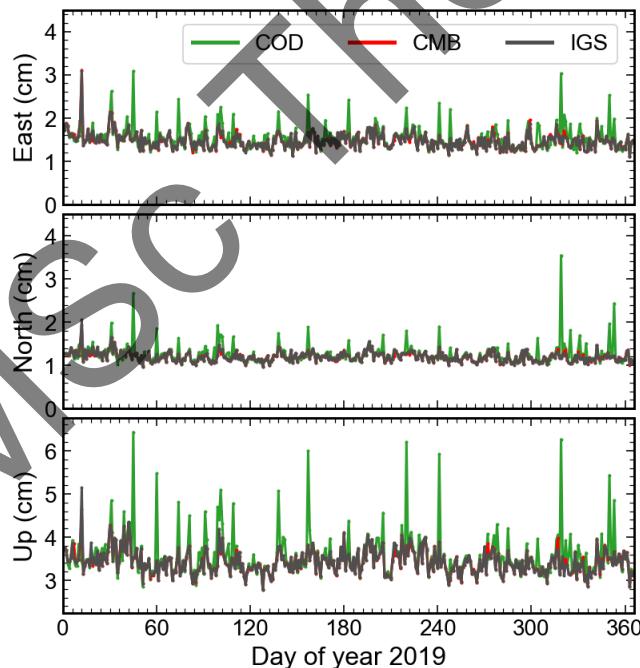


图 3.15 单 GPS PPP 浮点解动态定位精度的时间序列

综合上述钟差综合一致性、PPP 定位精度的分析，我们可以得出以下结论：

- (1) 本文提出的面向北斗/GNSS 多系统钟差综合的算法兼容 IGS 传统的综合策略，在 AC 权值分配、综合钟差的精度、定位性能等方面有着较好的一致性；并且

在 AC 钟差基准异常或卫星异常等情况下，本文的算法较 IGS 的方法能获得更优的综合结果；

- (2) 在 AC 间产品一致性较好时，综合的产品能够保持内部的一致性，同时具有更好的抗差性；因此综合的钟差产品较单个 AC 的产品在应用于 PPP 定位时可获得更高的定位精度。

表 3.4 2019 年单 GPS PPP 浮点解动态定位精度统计

产品来源	动态定位精度 (cm)		
	East	North	Up
COD	1.54	1.25	3.56
EMR	1.65	1.35	3.68
ESA	1.49	1.21	3.46
GFZ	1.51	1.22	3.50
GRG	1.62	1.29	3.69
JPL	1.53	1.24	3.51
IGS	1.47	1.20	3.42
CMB	1.47	1.20	3.42

3.4 北斗/GNSS 钟差综合实验

3.4.1 钟差综合分析

在使用 2019 年单 GPS 精密产品综合验证了本文提出的面向北斗/GNSS 多系统钟差产品综合算法的正确性和有效性后，我们将该算法应用于 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS-2/3 系统的精密钟差综合。一方面验证该算法用于多系统 GNSS 钟差综合的效果，另一方面评估目前各个 AC 提供的多系统产品的精度和一致性状况。

表 3.5 多系统钟差产品综合使用 AC 的产品情况

分析中心	支持系统	卫星钟差采样率	轨道采样率
COD	GRECJ	30 s	5 min
ESA	GRECJ	30 s	5 min
GFZ	GRECJ	30 s	5 min
GRG	GRE	30 s	15 min
WUM	GRECJ	30 s	15 min

本节使用如表 3.5 所示的 5 家 AC 的 2020 年 1 月共 31 天的多系统 GNSS 产品进行钟差综合实验，其中除 GRG 和 WUM 外其余 AC 的轨道采样率均为 5 min。COD 和 ESA 的轨道产品包含第二天 0 点时刻，因此无需拼接后一天的轨道。在支持的卫星系统方面，除 GRG 只支持 GRE 三系统外，其余 4 家 AC 均支持 GRECJ 等 5 系统；但需要注意的是 COD 只支持 BDS-2 卫星，使用的 B1、B2 频点的信号（观测值类型为 L2 和 L7），剩余 3 家 AC 同时支持 BDS-2 和 BDS-3 系统，使用的是 B1、B3 频点的信号（观测值类型为 L2 和 L6）。因此，如果同时使用 COD 和其他 AC 的钟差产品进行北斗钟差综合，严格意义上还需要改正 BDS-2 卫星端 B2、B3 信号的伪距 DCB；但是一般认为 DCB 在天内稳定，基本上视作常数，因此可以被式(3.3)中的初始钟偏差所吸收；并且目前各个 AC 进行产品估计时使用多系统 DCB 改正的情况并不清楚，因此本文后续综合 COD 的 BDS-2 钟差时不进行 DCB 改正，而直接对齐到 B1/B3 的钟差基准，定位时也使用 B1/B3 信号。此外，对于北斗系统，本文所有的综合实验中不使用产品精度较差的 GEO（Geostationary Earth Orbit）卫星，并且将 BDS-2 和 BDS-3 视作两个不同的系统，分别进行系统间偏差的校准。因为相关研究指出，接收机端 BDS-2 和 BDS-3 的伪距观测值间存在明显的系统间偏差 (Zhao et al., 2020)，另外图 3.3 中 ESA 和 WUM 间 BDS-2 和 BDS-3 的系统间偏差差值存在显著的差异，也印证了这一策略的必要性。

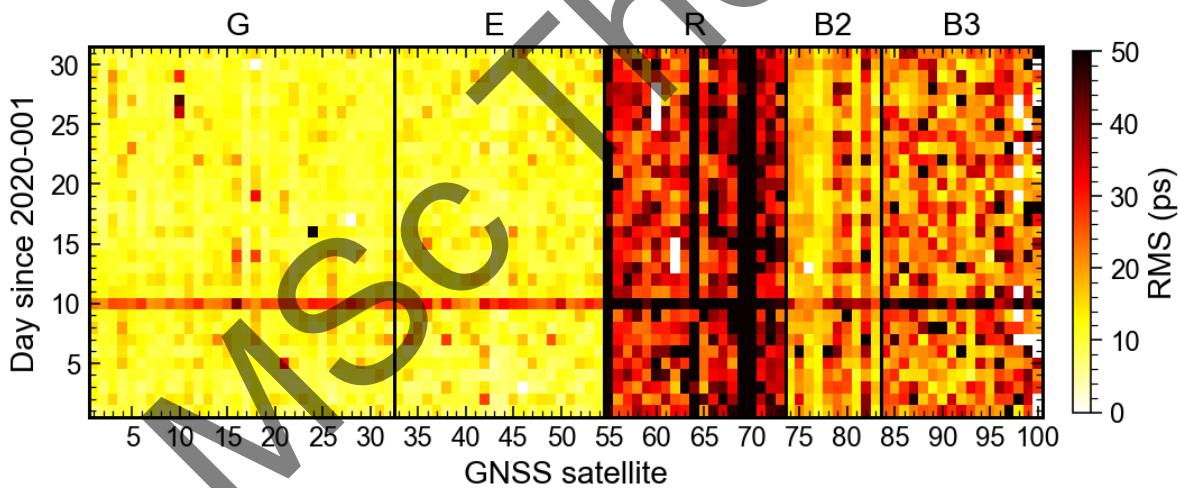


图 3.16 北斗/GNSS 多系统钟差综合的 RMS

图 3.16 展示了 GREC 所有可用卫星在 31 天内综合结果的 RMS，表 3.6 为相应的统计结果。从中可以发现，GE 双系统除了个别天个别卫星出现了较大的 RMS 值外，75% 的 RMS 均处于 12.6 ps 和 13.0 ps 以下，而整体的平均值分别为 11.6 ps 和 11.5 ps，AC 间的钟差产品一致性良好。GLONASS 卫星在图中对应的部分，颜色明显偏深，即综合钟差的 RMS 值普遍较大，平均值只达到了 45.5 ps，甚至有 25% 的 RMS 值超过了 50.4 ps，AC 间的一致性不乐观，但这也与之前的判断相一致，残余的轨道误差是造成

这一现象的主要原因。BDS-2 系统 RMS 的平均值为 20.5 ps，大约是 GE 的两倍，但整体较为稳定。另外有趣的是，BDS-2 系统在图中对应的部分有 3 条颜色明显偏深的竖线，正好对应 BDS-2 星座中的 3 颗 MEO (Medium Earth Orbit)，其余 7 颗 BDS-2 卫星均为 IGSO (Inclined Geostationary Earth Orbit)，说明 BDS-2 卫星中 IGSO 的钟差一致性优于 MEO，这可能与 IGSO 轨道的特殊性有关，但是并没有发现 BDS-3 卫星钟差综合的 RMS 与卫星轨道类型有明显的关系，这有待于后续进一步的研究。另外，在实验的时间段内 BDS-3 的钟差一致性不如 BDS-2，平均 RMS 为 26.4 ps，最大值达到了 102.5 ps，这可能与实验时 BDS-3 轨道精度偏低有关。

表 3.6 北斗/GNSS 多系统钟差产品综合 RMS 的统计情况 (单位: ps)

GNSS 系统	均值	最小值	最大值	75% 分位数
GPS	11.6	5.6	50.7	12.6
Galileo	11.5	4.6	35.2	13.0
GLONASS	45.5	16.0	180.5	50.4
BDS-2	20.5	9.0	56.9	23.3
BDS-3	26.4	8.1	102.5	30.9

值得注意的是，图 3.16 中有一条明显的红色横线，它对应的是 010 天的综合结果，几乎所有卫星综合的 RMS 值都大于 20 ps。经过检查 AC 间钟差的一致性，发现是 GFZ 的钟差产品存在异常，其余 AC 的钟差一致性较好。如图 3.17 所示，GFZ 出现了 100-200 ps 不等的非线性变化，并且每颗卫星的趋势不同，因此不是钟差基准或者系统间偏差的影响。在综合时应该剔除整体一致性较差的异常产品，这也表明目前多系统 GNSS 精密产品的稳定性和可靠性不如传统的 GPS 产品，但是从另一方面也说明了北斗/GNSS 多系统钟差综合的现实意义和迫切需求。

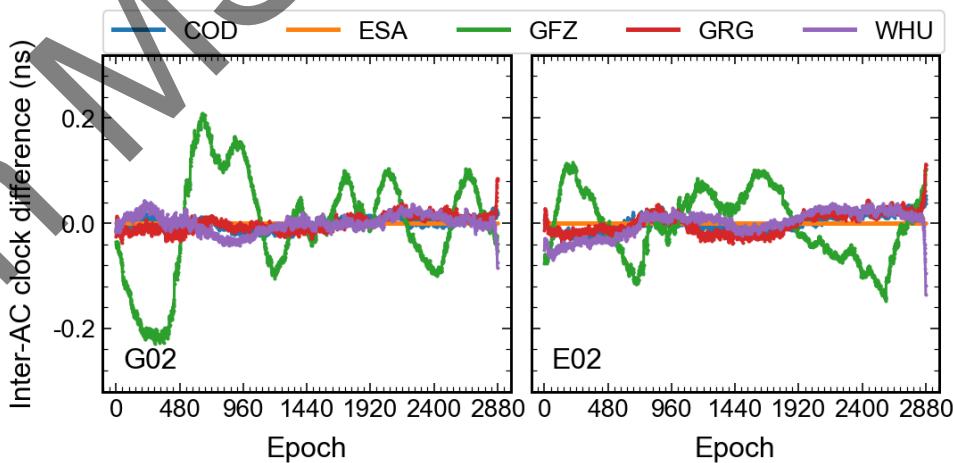


图 3.17 GFZ 010 天钟差的一致性异常

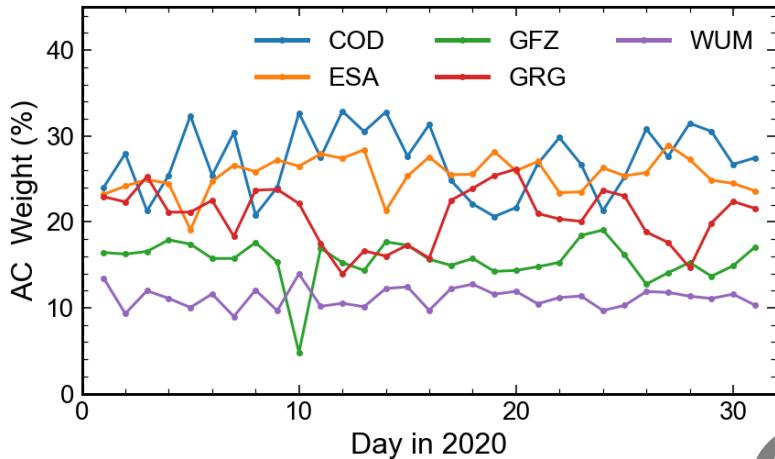


图 3.18 北斗/GNSS 多系统钟差综合 AC 权重序列

表 3.7 北斗/GNSS 多系统钟差产品综合 AC 权重统计

分析中心	平均权重 (%)
COD	27.1
ESA	25.5
GFZ	15.5
GRG	20.7
WUM	11.2

31 天内 AC 权重配比的情况如图 3.18 所示，统计结果见表 3.7。可以发现除 GRG 外其余 AC 的权重配比较为稳定，和单 GPS 系统综合时的情况较为类似。在观察每一天综合结果的钟差一致性时，发现 GRG 的钟差出现粗差或者异常情况的概率较大，这应该是导致其权重波动较大的原因。但是 GRG 31 天的平均权重达到了 20.7%，位居第三，说明其钟差在没有异常值的情况下质量是较优的。究其原因，GRG 是整数钟产品，其在估计卫星钟差时固定了非差模糊度，而模糊度固定是一把双刃剑，一旦固定出错会导致钟差的估值出现粗差等异常情况。另外，010 天 GFZ 的钟差异常情况在权重分配上也得到了体现，只有 5% 左右；尽管其权重很低，但是仍然会在一定程度上影响钟差综合的结果，因此可以将其剔除而不参与综合。此外，COD 和 ESA 的权重配比一直居于前列，两者的平均权重分别为 27.1% 和 25.5%，说明两者的多系统 GNSS 产品精度较高且稳定性好。

3.4.2 PPP 定位性能

为进一步验证综合钟差产品相对于单个 AC 产品的优势，我们使用综合产品以及原始 AC 的产品分别进行了 31 天的 PPP 浮点解静态和动态解算，实验测站如图 3.10 所

示。需要指出的是，目前 BDS 的地面站天线 PCO 改正尚不完善甚至缺失，部分天线 Galileo 的 PCO 改正也有缺失，此时一般使用 GPS 的 PCO 和 PCV 改正数，但是会导致与参考站天线类型相关的系统性偏差，并且无法通过 Helmert 变换完全消除的。因此在评估多系统 GNSS 静态定位的结果时，本文不再使用 IGS 发布的 SINEX 周解坐标作为参考，而是计算每个测站在 31 天内的坐标重复性，即统计内符合精度。对于动态定位，我们依然使用静态解作为参考真值。此外，钟差综合时使用卫星系统较全、质量较优的 ESA 轨道产品作为参考轨道，因此综合钟差对应的定位结果和 ESA 最具有可比性。

表 3.8 多系统 PPP 静态定位坐标重复性统计（单位：mm）

解的类型	ESA			CMB		
	East	North	Up	East	North	Up
G	3.0	1.8	6.1	2.9	1.7	6.1
GE	2.4	1.7	5.4	2.4	1.6	5.4
GR	2.9	1.8	6.5	3.0	1.8	6.5
GC	2.9	2.1	6.1	3.0	2.0	6.1
GREC	2.4	1.8	5.8	2.4	1.7	5.8

综合钟差 CMB 和 ESA 产品对应的定位结果统计如表 3.8 所示。首先，可以发现 ESA 和 CMB 各自的定位结果均是 GE 双系统组合时达到了最佳的坐标重复性，CMB 的 GE 组合解在东、北、高三个方向分别达到了 2.4 mm, 1.7 mm 和 5.8 mm 的坐标重复性，在东方向优于 ESA 0.1 mm。相对于单 GPS 的结果，CMB 的 GE 双系统组合解在东、北、高三个方向分别提升了 17.2%、5.9% 和 11.5% 的定位精度。这说明目前 Galileo 系统具有较优的轨道精度、天线 PCO 和 PCV 改正等，在高精度的静态定位时加入 Galileo 卫星可以显著的提高精度。相比之下，GR 双系统的定位结果在高方向的精度反而比单 GPS 的结果差 0.4 mm 左右，水平方向差异不大。值得注意的是，CMB 的 GR 定位结果各个分量均比单 GPS 差，这反映目前 GLONASS 的综合钟差产品精度较低，并且不能保持轨道和钟差的一致性，3.4.3 节会对这一现象的成因进行深入的讨论。BDS 的结果与 GLONASS 较为类似，GC 定位精度相对与单 GPS 没有显著的提升；对 CMB 而言，除高方向外，水平分量的精度甚至比单 GPS 低 0.1-0.3 mm。这表明实验的时间按段内北斗系统尤其是 BDS-3 卫星的精密产品在 AC 间的一致性不佳，这有待于日后相关模型的提升和 AC 产品估计策略的统一。

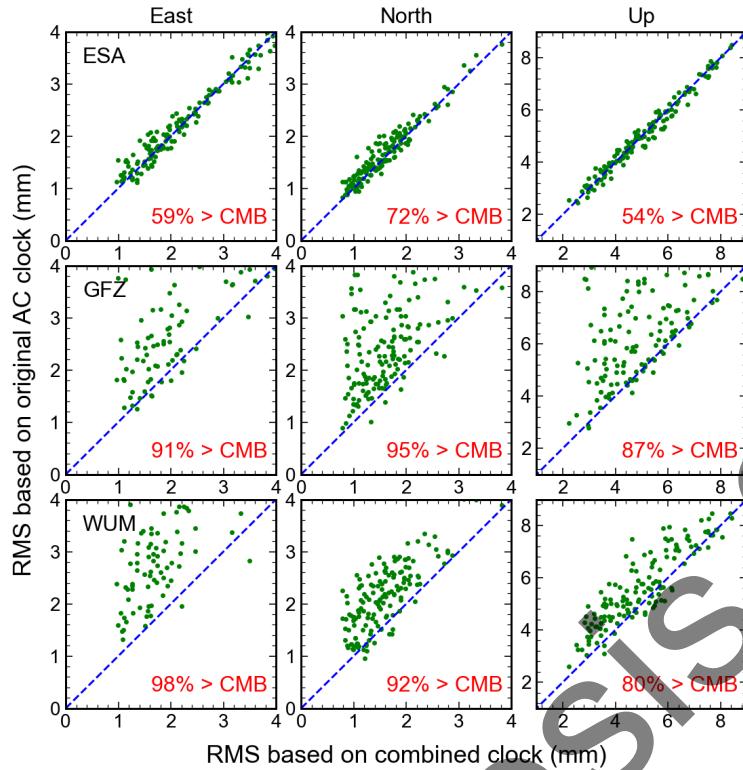


图 3.19 GE 静态定位坐标重复性对比

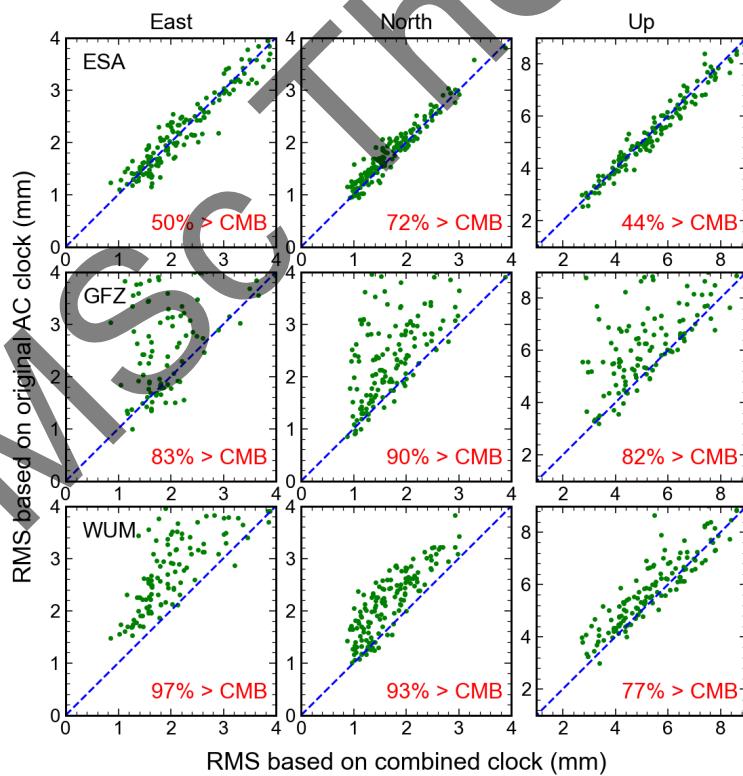


图 3.20 GREC 静态定位坐标重复性对比

图 3.19 和图 3.20 分别绘制了 GE 和 GREC 两种类型解的对角线图, 即图中每个点

代表一个测站，横坐标表示其使用综合钟差 CMB 时的定位精度，纵坐标为其使用原始 AC 产品时的定位精度，如果点位于对角线以上则说明该测站使用 CMB 产品时可以获得更高的定位精度；点的分布统计结果标注于每个子图的右下角。我们选择了 GNSS 系统最全的 ESA、GFZ 和 WUM 作为对照。对于 GE 的定位结果，可以发现，绝大部分测站在使用综合钟差产品 CMB 时能够获得更高精度的定位结果，尤其是北方向，超过 72% 的测站都获得了精度提升，但是高方向的提升相对并不显著，这与表 3.8 展示的统计结果相吻合。相对于 ESA 而言，可以发现 CMB 产品 GREC 定位精度提升的测站比例不如 GE，甚至在高方向的表现不如 ESA，这主要是目前 AC 间产品一致性不佳的 GLONASS 导致。但是得益于其他系统综合钟差精度的提升，CMB 的定位结果相对于 GFZ 和 WUM 具有显著的提升，超过 80% 的测站在使用 CMB 产品时都能获得更好的定位结果。

表 3.9 多系统 PPP 动态定位精度统计（单位：cm）

解的类型	ESA			CMB		
	East	North	Up	East	North	Up
G	1.15	0.99	2.86	1.13	0.98	2.85
GE	0.82	0.75	2.13	0.82	0.75	2.12
GR	1.01	0.93	2.65	1.03	0.95	2.71
GC	1.01	0.90	2.51	1.03	0.91	2.52
GREC	0.83	0.77	2.14	0.84	0.78	2.16

CMB 和 ESA 不同 GNSS 系统组合的动态定位结果如表 3.9 所示。与静态定位类似，同样是 GE 组合时获得了最高的定位精度，CMB 在东、北、高三个方向分别达到了 0.82 cm、0.75 cm 和 2.12 cm 的定位精度，相对于单 GPS 解分别获得了 27.4%、23.5% 和 25.6% 的精度提升，与 ESA 较为一致。GR 和 GC 组合的结果相对于单 GPS 均有所提升，但是量级较小。在同时使用 GREC 四系统时，动态定位结果优于 GR、GC 和单 GPS，略低于 GE，CMB 的 GREC 动态定位结果在东、北、高分别达到了 0.84 cm、0.78 cm 和 2.16 cm，比 ESA 相应的结果分别低 0.01 cm、0.01 cm 和 0.02 cm。虽然综合钟差 GREC 的定位结果略低于 ESA，但是如图 3.21 所示，在 31 天的定位结果中，CMB 的 GREC 定位精度高于大部分 AC，即使在 010、016 和 031 天 GFZ 和 WUM 的产品有一定异常的情况下，CMB 的综合产品依然保持了稳健的定位性能，验证了本文提出的多系统 GNSS 钟差综合算法的有效性，能够为多系统 GNSS PPP 用户提供更加鲁棒的精密钟差产品，为 IGS 分析中心提供钟差产品的质量反馈。

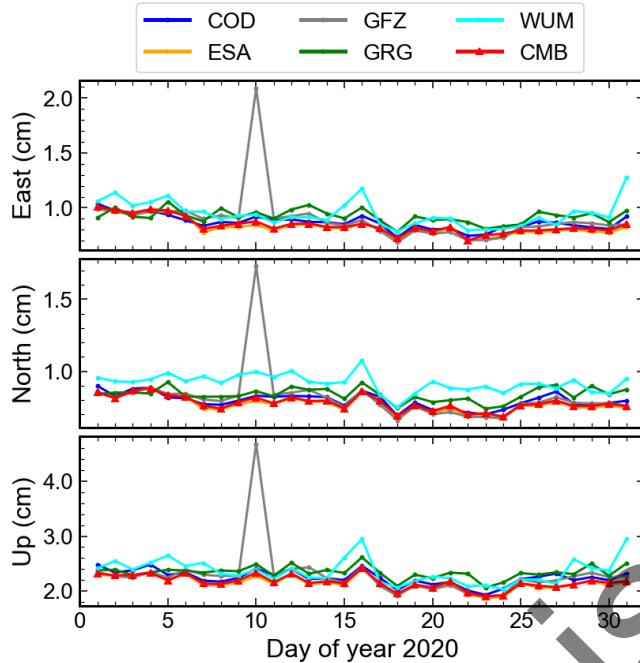


图 3.21 GREC 多系统 PPP 动态定位精度的时间序列

3.4.3 GLONASS 钟差综合讨论

根据本节北斗/GNSS 多系统钟差综合的结果及相关分析，我们可以初步地得到结论，目前 GPS 和 Galileo 双系统的综合钟差可以达到比单个 AC 产品更高的可靠性和稳定性，但是 GLONASS 和 BDS-2/3 的钟差综合结果表现不佳，尤其是 GLONASS 的钟差在 AC 间的一致性较差，钟差综合的平均 RMS 达到了 45.5 ps。本文之前不加证明地指出这是目前 GLONASS 较差的轨道精度引起的，我们将在这一小节对此进行更加深入的研究。

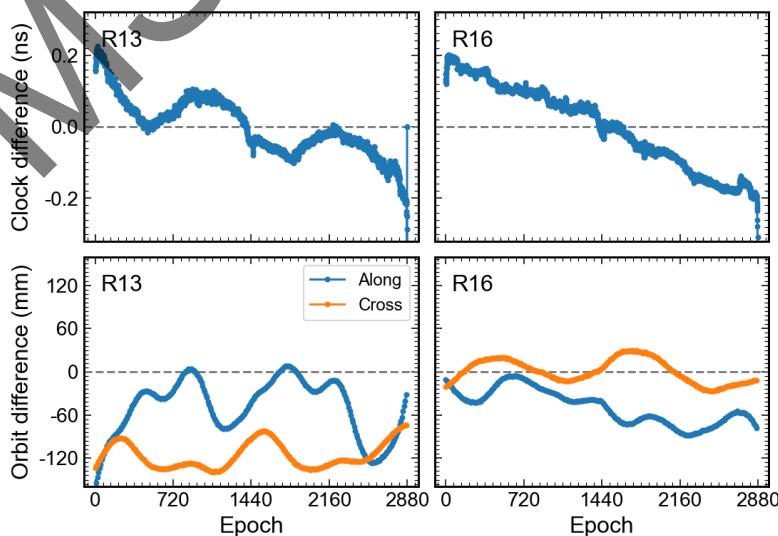


图 3.22 AC 间 GLONASS 卫星典型的钟差和轨道产品差异

Hauschild (2010) 在研究使用超快速轨道产品进行实时卫星钟差估计时发现，实时钟差在进行多天连续估计时，其相对于事后精密钟差产品会逐渐出现显著的线性趋势项误差。Hauschild 通过对最终的精密轨道分别为地添加 30 cm 的径向和法向轨道误差模拟超快速轨道产品的误差，并使用该编辑过的轨道进行卫星钟差估计实验。所得的钟差再次出现了呈线性趋势的误差，证明了较大的轨道切向误差会导致钟差的线性趋势误差，而较大的法向轨道误差会导致钟差常量的偏差。但是实际的超快速轨道产品在这两个分量的误差并不是常量，因此还会导致钟差非线性的误差。

基于上述轨道误差对钟差估计影响的研究，我们绘制了如图 3.22 所示的 2020 年 300 天 COD 提供的最终多系统 GNSS 轨道和钟差产品中 R13 和 R16 卫星相对于 ESA 的差异。图中上面一行显示的是卫星的钟差差异，下面一行显示的是轨道切向和法向的差异。因为轨道径向差异可以通过公式(3.6)改正，故不在此进行讨论。图中 R13 和 R16 的钟差差异是 GLONASS 钟差综合时 AC 间一致性不佳的典型情况，即存在显著的线性和非线性差异。R13 的切向和法向轨道差异分别达到了 60 mm 和 120 mm；R16 的法向轨道差异在 0 附近波动，而切向差异达到了 60 mm 左右。为了进一步验证 GLONASS 钟差较大的不一致性是轨道误差引起的，我们绘制了 2020 年 300 天 COD 产品中 GER 三系统所有卫星轨道相对于 ESA 的差异，结果如图 3.23 所示。可以发现 GE 双系统卫星的轨道差异较小，切、法、径三个分量的差异在一天 288 个历元都可以保持在 20 mm 以内，除个别的 1-2 颗卫星在部分历元的差异达到了 50 mm。但是相比之下，GLONASS 的大部分卫星在三个分量的轨道差异都较大，在一天内的大部分历元达到了 100 mm 左右。这一现象表明 GLONASS 卫星 AC 间较差的钟差一致性可能也是较大的轨道切向和法向误差导致的。

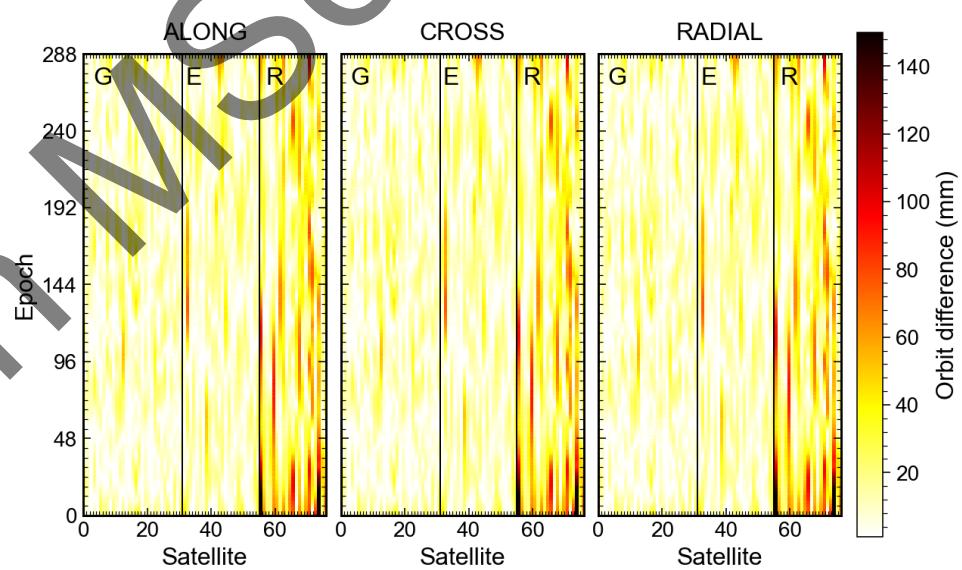


图 3.23 COD 相对于 ESA 的 GLONASS 轨道一天内的差异

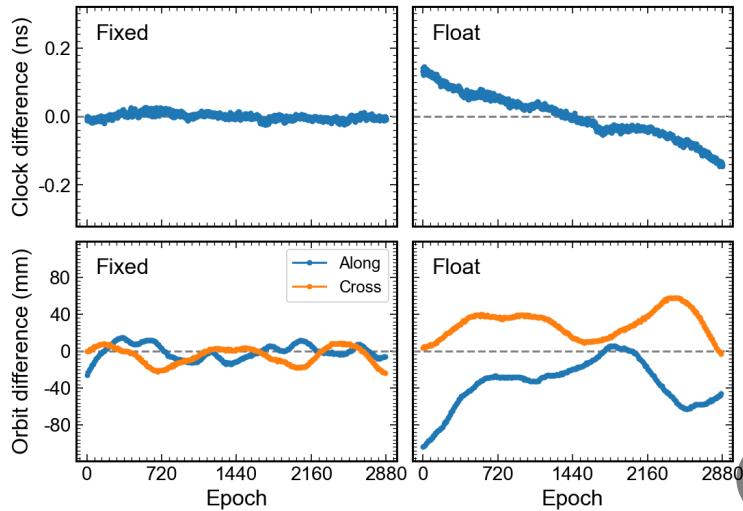


图 3.24 G17 卫星模糊度固定产品和浮点解产品与 ESA 的差异

为了验证上述猜想，以及探索解决 GLONASS 钟差综合问题的方法。本文使用 PANDA 软件估计了 2020 年 300 天的 GPS 卫星轨道和钟差，除了常规的双差模糊度固定的产品，还估计了未固定模糊度的浮点解产品，并以 ESA 的产品为参考进行对比分析。在分析了所有 GPS 卫星产品的差异后，本文发现固定解的钟差产品与 ESA 有良好的一致性，而浮点解的钟差出现了与 GLONASS 相似的线性和非线性差异。图 3.24 和图 3.25 分别绘制了本文估计的 G17 和 G18 钟差和轨道产品相对于 ESA 的差异。可以发现，固定解的钟差差异基本在 0 附近波动，与 3.3.1 节和 3.4.1 节中对 GPS 钟差一致性的分析相符；相应的轨道的切向和法向差异在 20-40 mm 以内，符合目前 GPS 系统的轨道精度 (Guo et al., 2016)。相比之下，G17 浮点解轨道的误差明显大于固定解，切向差异最大达到了 110 mm，并且钟差差异呈现明显的线性趋势。G18 的情况类似，浮点解轨道精度显著低于固定解，轨道切向和法向差异明显增大且存在两个较大的突起；相应地，钟差差异也出现了线性趋势和非线性变化的叠加。

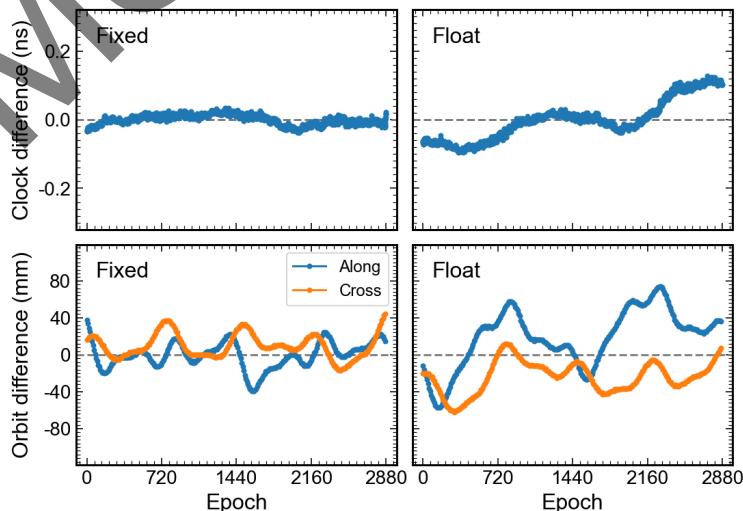


图 3.25 G18 卫星模糊度固定产品和浮点解产品与 ESA 的差异

为了排除模糊度固定对卫星钟差估计的影响，本文还额外进行了实验，即使用上述的浮点解轨道、但是在钟差估计时固定了双差模糊度。结果显示，只在钟差估计时固定模糊度无法抑制如图 3.24 和图 3.25 所示的线性和非线性变化的钟差误差。

上述基于 PANDA 软件的 GPS 浮点解产品估计实验，充分验证了 GLONASS 钟差一致性较差的原因。由于 GLONASS 系统 FDMA (Frequency Division Multiple Access) 的信号体制，在接收机端存在频间码偏差 (IFCB, Inter-Frequency Code Bias) 和频间相位偏差 (IFPB, Inter-Frequency Phase Bias)，并且天线、接收机或接收机固件版本的不同都可能引起频间偏差的变化，这就导致无法通过简单的站间单差对其进行消除 (Geng et al., 2016)。因此 GLONASS 的数据处理策略发展至今，模糊度固定依然是一个难题。目前，各个 AC 在估计 GLONASS 的精密轨道和钟差产品时并不固定模糊度，这导致其轨道产品的精度较低，尤其是切向和法向；虽然单个 AC 的轨道和钟差产品可以保持内部的一致性，但是目前在钟差综合时无法有效地改正 AC 间轨道切向和法向的差异，从而影响了钟差综合的精度。另一方面，这也表明若要提升 AC 间 GLONASS 钟差产品的一致性，AC 在产品估计时需要固定 GLONASS 的模糊度以提高其轨道精度，或者在钟差综合时实现有效的顾及轨道切向和法向差异的改正公式。

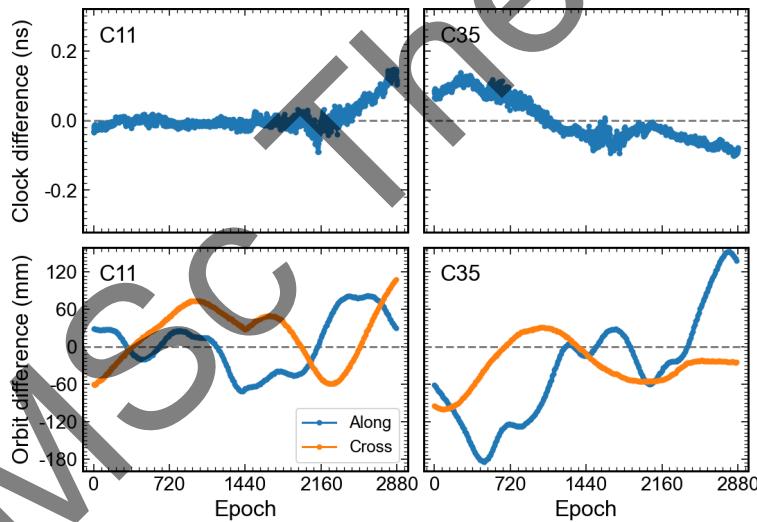


图 3.26 GFZ 的北斗钟差与轨道产品与 ESA 的差异

考虑到 3.4.1 节中 BDS 钟差综合效果并不理想，本文在此一并进行讨论。图 3.26 绘制了 2020 年 300 天 GFZ 提供的多系统 GNSS 产品中 C11 (BDS-2) 和 C35 (BDS-3) 相对于 ESA 产品的差异，以便分析轨道差异对钟差一致性的影响。可以发现，目前 BDS 卫星的轨道精度较低，C11 和 C35 分别达到了约 60 mm 和 180 mm 的最大轨道单分量差异。与 GLONASS 类似，两颗卫星的钟差差异出现了明显的线性趋势和量级较小的非线性变化，且钟差变化较大的历元与轨道差异较大的历元一致。不同于 GLONASS，BDS 系统采用的是 CDMA (Code Division Multiple Access) 信号体制，不存在频间偏差，因

此 AC 在估计 BDS 的精密产品时可以固定模糊度。这说明 BDS 卫星较差的轨道一致性是其他因素导致的，例如定轨时 AC 间不统一的光压模型、姿态模型等。此外，目前 BDS 地面跟踪站的数量和几何分布不如 GPS，这都会导致 BDS 的轨道和钟差产品精度较低。随着日后 BDS 卫星相关模型的完善、地面跟踪站的增多，BDS 的精密轨道和钟差产品将达到与 GPS 相一致的精度水平，钟差综合时 AC 间的一致性将显著提高。

Pan MSC Thesis 2021

4 北斗/GNSS 钟差和相位偏差综合

4.1 钟差和相位偏差综合算法

精密卫星钟差产品是 PPP 的基础，而相位偏差产品则是实施 PPP-AR 的关键。正确可靠的相位偏差产品可以改正载波相位观测值中包含的卫星端硬件延迟，从而通过星间单差顺利恢复模糊度的整数特性。因此给 PPP-AR 用户提供稳定可靠的相位偏差产品显得尤为重要，而相位偏差综合就是保证产品可靠性的有效手段。需要指出的是，相位偏差和钟差产品间存在耦合性，可以被统称为 PPP-AR 产品，即两者不能孤立地考虑，需要将它们作为一个整体进行综合，以此保证两者间的一致性不被破坏。本节首先介绍相位偏差的综合，在此基础上再介绍适用于 PPP-AR 的钟差综合流程。

4.1.1 宽巷 UPD 综合方法

目前主要的相位偏差产品有 2 种形式，即 UPD 产品和 IRC 产品 (Seepersad et al., 2017)；此外 Geng et al. 在 2019 年优化了传统的 UPD 模型，并发布了相应的钟差和相位偏差产品。Banville et al. (2020) 指出上述相位偏差产品均可以转换为观测值类型特定的 OSB (Observable Specific Bias) 产品，并基于 SINEX BIAS 格式 (Schaer, 2016) 进行发布。相应地，OSB 产品可以转化为宽巷 UPD 和窄巷 UPD，具体转换公式如下：

$$\begin{pmatrix} b_{WL} \\ b_{NL} \\ d_{P1P2} \\ D_{clk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{g}{g-1} & -1 & -g & -1 \\ \alpha_{IF} & \beta_{IF} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & \alpha_{IF} & \beta_{IF} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ d_1 \\ d_2 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

其中， b_{WL} 和 b_{NL} 分别为宽巷 UPD 和窄巷 UPD； d_{P1P2} 为 P1 和 P2 间的 DCB； D_{clk} 为钟差基准约束，对 UPD 产品而言其值设为 0，即与传统钟差基准一致； b_1 和 b_2 为 SINEX BIAS 产品中 L1 和 L2 原始载波相位观测值的偏差； d_1 和 d_2 为 P1 和 P2 原始观测值的偏差； $g = f_1 / f_2$ ， f_1 和 f_2 为 GNSS 系统的双频信号对应的频率； α_{IF} 和 β_{IF} 为双频无电离层组合的系数。

宽巷 UPD 一般较为稳定，各个 AC 提供的产品间的一致性较好，差异一般不会超过 0.1 周，可以通过等权平均的方式直接综合。需要注意的是，宽巷 UPD 一般是基于 GNSS 系统内星间单差的方式计算所得，最终各个系统会选取某颗卫星作为基准将单差 UPD 转化为非差形式。这导致不同 AC 提供的宽巷 UPD 基准不同，不同 GNSS 系统需

要分别对齐基准。具体的宽巷 UPD 综合流程如下：

(1) OSB 产品转换

基于式(4.1)将 OSB 产品转换为每颗卫星对应的宽、窄巷 UPD；

(2) 基准粗对齐

在得到各个 AC 的宽巷 UPD 产品后，对每一个 GNSS 系统分别选取所有 AC 共有的一颗卫星作为参考星，并将所有 AC 参考星的宽巷 UPD 对齐至任一 AC，其他卫星整体做相同数值的调整。

(3) 宽巷 UPD 调整

经过对齐后的宽巷 UPD 并不一定处于正负 0.5 周的范围内，可能存在任意整数周的偏差，虽然并不影响宽巷模糊度固定，但是不利于综合，因此需要将其调整至相同的数值范围内，同时需要注意正负 0.5 两端边界值的对齐处理。但是，宽巷 UPD 整数周的调整会影响宽巷模糊度的固定值，从而影响窄巷 UPD 的数值。以 GPS 系统为例，宽窄 UPD 调整 1 周会引起窄巷 3.53 周的变化，因此需要对窄巷 UPD 进行相应的调整。

$$\Delta b_{NL} = \frac{f_2}{f_1 - f_2} \Delta b_{WL} \quad (4.2)$$

其中， Δb_{WL} 为宽巷 UPD 在对齐过程中调整的整数值； Δb_{NL} 为窄巷 UPD 相应的改正值，两者均以周为单位。

(4) 基准精对齐

为了排除参考星宽巷 UPD 的估计误差对其他卫星宽巷 UPD 综合的影响，在粗略对齐基准并调整至相同数值范围后，对每个 GNSS 系统选取所有 AC 共有的卫星计算宽巷 UPD 重心基准并对齐，以此实现精确的基准对齐。

(5) 抗差综合

采用 3.2.2 节中描述的质量控制方法剔除可能存在的差异较大的宽巷 UPD 产品并计算剩余产品的等权平均值作为最终的综合解。

$$\tilde{b}_{WL} = \frac{1}{n} \sum_i^n b'_{WL,i} \quad (4.3)$$

其中， \tilde{b}_{WL} 为宽巷 UPD 的综合值；n 为 AC 总数； $b'_{WL,i}$ 为分析中心 i 提供的经过基准对齐和整数周调整后的宽巷 UPD。

由于宽巷 UPD 的稳定性，各个 AC 一般都已天内常量的形式提供宽巷 UPD 产品；即使不为天内常量，所有历元的宽巷 UPD 数值的波动亦不显著，仍旧可以通过取平均的方式转换为天内常量，因此宽巷 UPD 的综合较为简单。

4.1.2 钟差和窄巷 UPD 综合方法

鉴于传统 UPD 产品提供的窄巷 UPD 采样率为 15 min, 而目前大部分发布的 OSB 产品中提供的窄巷 UPD 为天内的常量, 不同的产品采样率导致直接综合窄巷 UPD 并不方便。考虑到 IRC 产品不显式地提供窄巷 UPD, 而窄巷 UPD 和卫星钟差之间具有耦合性, 可以将窄巷 UPD 和钟差综合为类似于 IRC 的具有整数特性的钟差产品, 后续窄巷 UPD 的综合同钟差综合一起进行。

$$clk' = clk - (b_{NL} + \Delta b_{NL}) \quad (4.4)$$

其中, clk 为原始卫星钟差; clk' 为吸收窄巷 UPD 而具备整数恢复特性的卫星钟差; b_{NL} 为 AC 提供的原始窄巷 UPD, 单位已转换成秒; Δb_{NL} 为按式(4.2)计算所得的由于宽巷 UPD 整数周调整导致的窄巷 UPD 的改正值, 单位为秒。需要注意的是, 倘若 clk 本身就是 IRC, 那么式中 b_{NL} 的数值为 0, 并且括号前的减号应变为加号。

通过非差模糊度固定计算所得的卫星钟差理论上具有比传统的 IGS 钟差更高的精度 (Geng et al., 2019), 同时 3.2 节描述的多系统 GNSS 钟差综合算法和质量控制方法依然适用与整数钟。但是两者在 AC 间初始钟偏差的对齐方式上有所不同。基于非差模糊度固定解计算的卫星钟差, 其初始钟偏差受到窄巷模糊度的整数约束, 数值上表现为窄巷波长的整数倍, 必须正确处理, 否则会破坏钟差的整数特性。鉴于钟差综合算法在 3.2 节已有详细的描述, 简略的整数钟差综合流程如下:

- (1) 模型误差改正
- (2) 钟差基准对齐
- (3) 系统间偏差对齐
- (4) 初始钟偏差对齐

直接使用 3.2.1 节中的式(3.9)计算初始钟偏差会破坏整数钟差的整数恢复特性, 应采用下式计算 AC 间初始钟偏差的差值:

$$\Delta b_{ij}^s = \text{int}\left(\frac{f_{NL}}{n} \sum_k^n (clk_{j,k}^{s'} - clk_{i,k}^{s'})\right) \cdot \frac{1}{f_{NL}} \quad (4.5)$$

其中, Δb_{ij}^s 为 i、j 分析中心间 s 卫星钟差的初始钟偏差差值; int 为取整运算, 返回最临近的整数值; n 为历元总数; $clk_{i,k}^{s'}$ 、 $clk_{j,k}^{s'}$ 分别为 k 历元时 i、j 分析中心提供的经过钟差基准对齐、系统间偏差校准、模型误差改正并且吸收了窄巷 UPD 的整数钟差; f_{NL} 为卫星 s 对应的窄巷组合观测值的频率。

- (5) 迭代加权平均

(6) 钟差基准对齐到 GPST

(7) 宽巷 UPD 转换成 OSB

图 4.1 展示了完整的卫星钟差和相位偏差产品综合流程，可以发现左半边的钟差综合流程同图 3.8 一致，除了初始钟偏差的对齐方式略有差别。综合过程中的质量控制方法同 3.2.2 节一致。

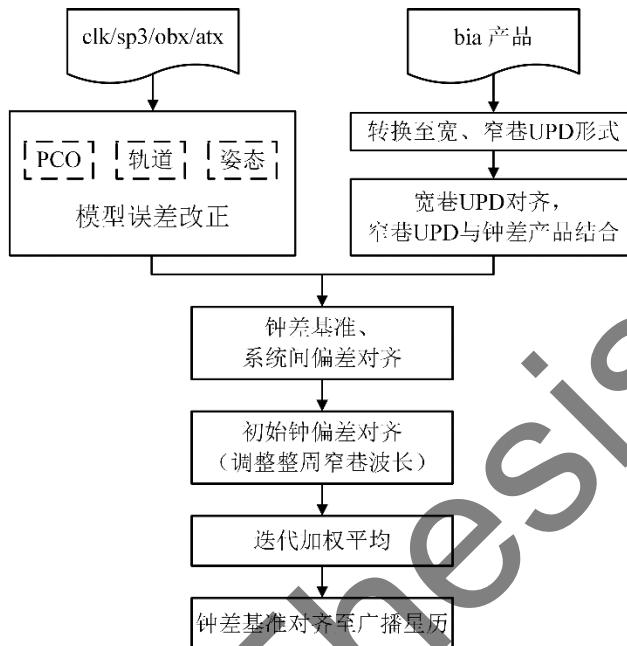


图 4.1 北斗/GNSS 钟差和相位偏差产品综合流程

4.2 GPS/Galileo 综合实验

为了验证本文提出的面向北斗/GNSS 多系统卫星钟差和相位偏差综合算法的正确性和有效性，本文使用 2020 年 300-330 天 COD、ESA、GFZ、GRG、TUG 和 WHU 等 6 家 AC 提供的多系统 GNSS 精密轨道、钟差和相位偏差产品进行综合实验，使用卫星较全的 ESA 轨道作为参考轨道。各个 AC 产品的具体情况如表 4.1 所示。除 GFZ 和 GRG 外的所有 AC 的轨道产品都包含第二天 0 点时刻，无需拼接后一天的轨道；卫星钟差产品采样率均为 30 s。

需要指出的是，目前日常提供相位偏差产品的 AC 较少，为了补充相位偏差产品的数量、增强综合产品的稳定性，本文使用了 GFZ 的李盼博士根据传统的 UPD 方法计算的和 ESA、GFZ 的轨道和钟差产品配套的 GPS、Galileo 和 BDS-2/3 系统的宽窄巷 UPD 产品，其中宽巷 UPD 为天内常量，窄巷 UPD 为 15 min 的分段常量 (Li et al. 2015)。此外，TUG 提供的是 IGS 第三次重处理的产品，并且由非差非组合模型计算 (Strassner et al. 2018)。WHU 是武汉大学 PRIDE Lab 团队发布的相位偏差和钟差产品 (Geng et al. 2019)，是目前唯一日常发布且支持 BDS-2/3 系统的 PPP-AR 产品。

表 4.1 GPS/Galileo 综合实验使用 AC 的产品情况

分析中心	支持系统	相位偏差 支持系统	相位偏差 产品形式	轨道采样率
COD	GRECJ	GE	OSB	5 min
ESA	GRECJ	GEC*	UPD*	5 min
GFZ	GRECJ	GEC*	UPD*	5 min
GRG	GRE	GE	IRC	15 min
TUG	GRE	GE	OSB	5 min
WHU	GEC	GEC	OSB	5 min

注：*表示不是 AC 官方提供的产品。

由于目前支持 BDS 系统的 PPP-AR 产品较少，只有 WHU 和李盼博士计算的与 ESA 和 GFZ 精密卫星产品配套的 UPD，因此本文首先使用全部的 6 家 AC 产品进行 GPS 和 Galileo 的钟差和相位偏差综合实验，在 4.3 节单独讨论 BDS-2/3 系统钟差和相位偏差的综合情况。本文使用的 ESA 和 GFZ 的宽巷 UPD 产品为同一软件计算、数值基本相同，因此在宽巷 UPD 综合时只使用 ESA 的产品，避免结果的偏差。除了讨论卫星钟差和相位偏差的综合情况外，本文还使用如图 3.10 所示的全球分布的具备 GPS、Galileo 和 BDS-2/3 系统跟踪能力的 MGEX 测站进行 PPP-AR 定位，验证综合产品的 PPP-AR 定位性能。

4.2.1 宽巷 UPD 综合

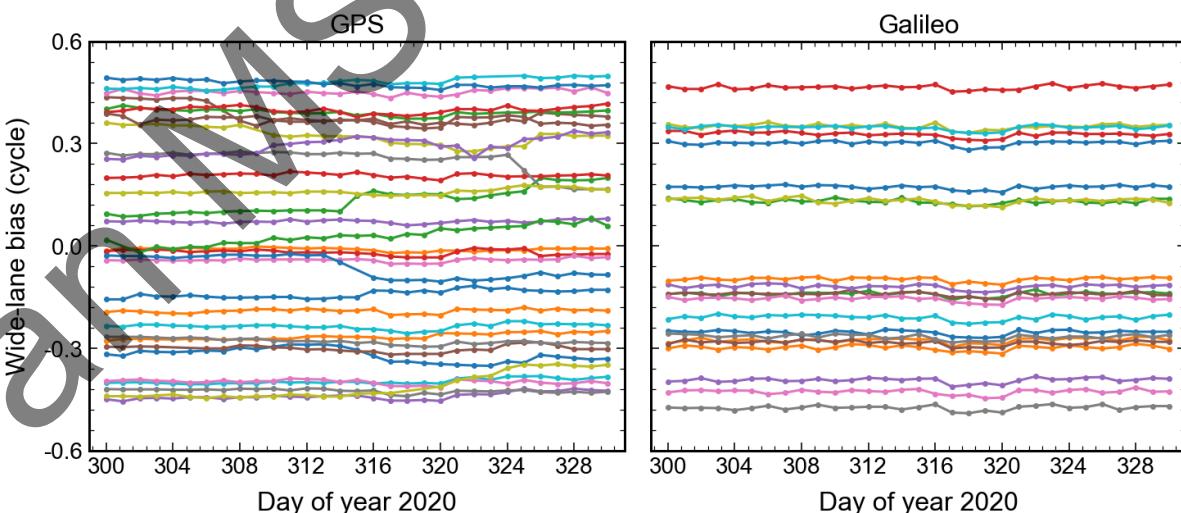


图 4.2 GPS 和 Galileo 宽巷 UPD 时间序列

本文首先依据式(4.1)将 COD、TUG 和 WHU 提供的基于 SINEX BIAS 格式的 OSB 偏差产品转换成传统的宽、窄巷 UPD 产品，并进行宽巷 UPD 的综合。为了直观的显示和对比 GPS 和 Galileo 宽巷 UPD 的稳定性，本文以 2020 年 300-330 天 WHU 提供的宽巷 UPD 为例，绘制了所有 GPS 和 Galileo 卫星宽巷 UPD 的时间序列，如图 4.2 所示。从图中可以看出，GPS 和 Galileo 的宽巷 UPD 在天与天之间非常稳定。尤其是 Galileo 在 30 天内基本呈一水平线，所有卫星宽巷 UPD 标准差的均值为 0.007 周。相比之下，GPS 的宽巷 UPD 虽然整体也十分稳定，但是部分卫星在个别天会出现约为 0.1 周的阶跃，这可能和卫星轨道面受到的太阳辐射的周年变化有关，即卫星端的硬件延迟随外界环境发生变化，不过也可能与卫星的调整相关；从统计结果来看，GPS 宽巷 UPD 标准差的均值为 0.014 周，是 Galileo 的两倍。

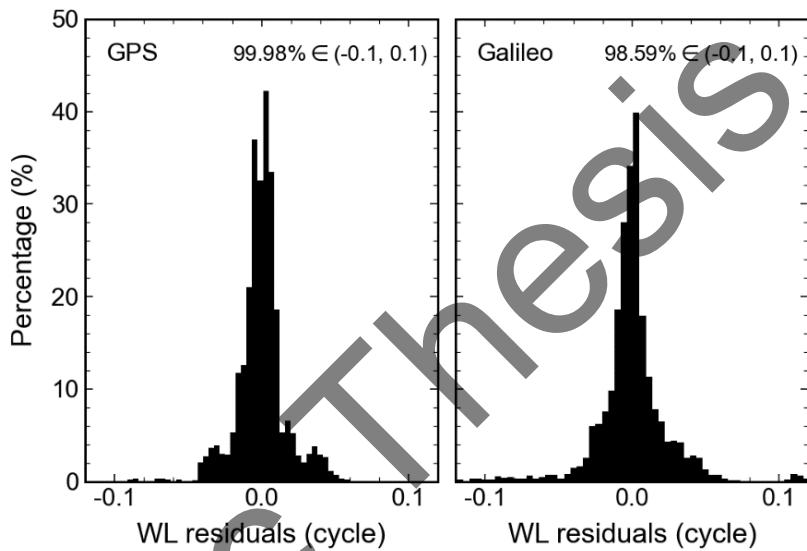


图 4.3 GPS 和 Galileo 宽巷偏差综合残差直方图

2020 年 300-330 天的 GPS 和 Galileo 宽巷 UPD 的综合残差分布如图 4.3 所示。可以发现 GPS 和 Galileo 的宽巷 UPD 综合残差的峰值都接近于 0，整体一致性较好。其中 GPS 有 99.98% 的综合残差小于 0.1 周，Galileo 则有 98.59% 的综合残差小于 0.1 周，两者残差的最大值分别为 0.14 和 0.13 周（会被标记为粗差而不参与综合），这是个别 AC 提供的相位偏差产品出现了相对较大的误差。由于宽巷 UPD 的一致性较好，一般而言差异超过 0.1 周的宽巷 UPD 在综合时的质量控制步骤中会被标记为粗差而剔除，从而保证综合产品的正确性。

4.2.2 钟差和窄巷 UPD 综合

在宽巷 UPD 综合之后，依据式(4.4)将窄巷 UPD 和卫星钟差综合为具有整数恢复特性的钟差产品，然后依据 4.1.2 节描述的方法进行整数钟差的综合。在进行综合之前，

本文首先以 2020 年 300 天 ESA 产品对应的窄巷 UPD 为例，分析目前 GPS 和 Galileo 窄巷 UPD 的天内稳定性。如图 4.4 所示，GPS 卫星的窄巷 UPD 在天内十分稳定，所有卫星窄巷 UPD 标准差的均值为 0.013 周，显著优于 Ge et al. (2008) 首次使用 UPD 方法实现 PPP-AR 时的窄巷 UPD 的稳定性（天内最大可达 0.4 周的变化）。这主要得益于目前 GPS 精密轨道和精密钟差产品精度的提升，使得估计所得的窄巷 UPD 受产品误差及其他模型误差的影响减小，能更加真实地反映窄巷 UPD 的时变性质，这也印证了目前将窄巷 UPD 视作天内常量发布产品的可行性(李林阳等, 2017)。需要指出的是，根据钟差和窄巷 UPD 的耦合性，即使窄巷 UPD 在天内存在微小的变化，可以通过调整卫星钟差而吸收这部分变化，从而严密地实现天内常量的窄巷 UPD 产品。Galileo 窄巷 UPD 的变化情况同 GPS 类似，在天内十分稳定，平均标准差为 0.011 周，验证了目前以天内常量的方式发布 Galileo 窄巷 UPD 产品的可行性，同时也反映出目前 Galileo 的轨道和钟差产品精度水平较高，同 GPS 相近。

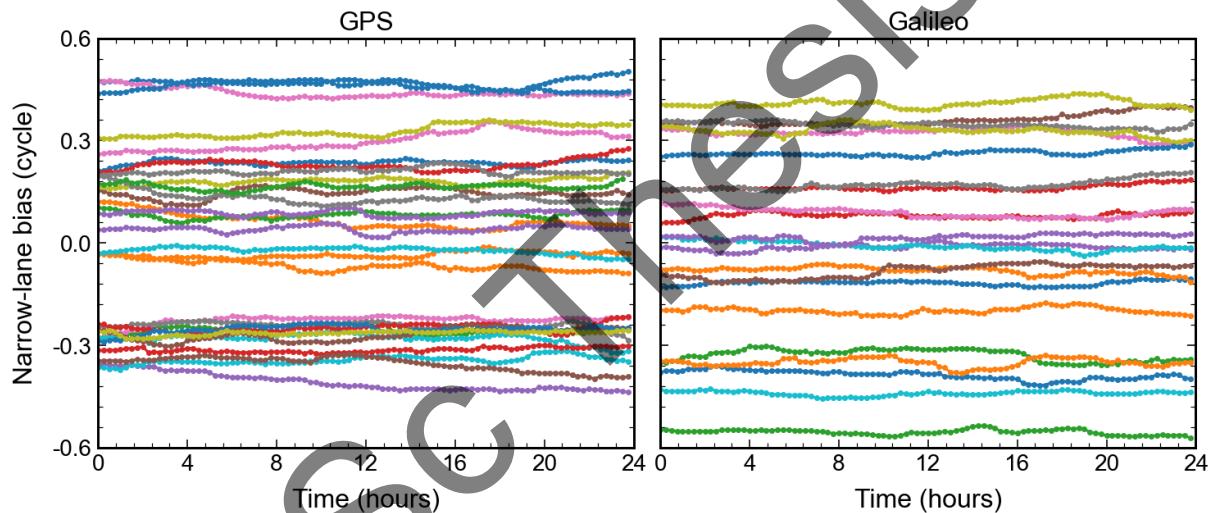


图 4.4 GPS 窄巷 UPD 天内时间序列

在分析了 GPS 和 Galileo 窄巷 UPD 的天内稳定性后，本文按照 4.1.2 节描述的方法进行整数钟差综合。图 4.5 左边一列展示了典型的 GPS 和 Galileo 整数钟差的一致性，右边一列绘制了典型的粗差示例。可以发现，通过式(4.5)计算并改正 AC 间整数钟差的初始钟偏差差异，可以实现小于 10 ps 的钟差对齐效果，与 Banville et al. (2020) 的 GPS 整数钟差综合实验中 mm 级的对齐精度相一致，这主要得益于模糊度固定提升了钟差估计精度并且对钟基准施加了整数约束。图 4.5 右边展示了综合实验中典型的粗差，可以发现个别 AC 的整数钟差在全天或者部分历元会与其他 AC 有较大的差异，这主要是 AC 的钟差估计误差，有可能是错误的模糊度固定所致，但需要进一步研究。因此，在整数钟差综合时同样需要进行质量控制，剔除存在问题的卫星或者部分历元。

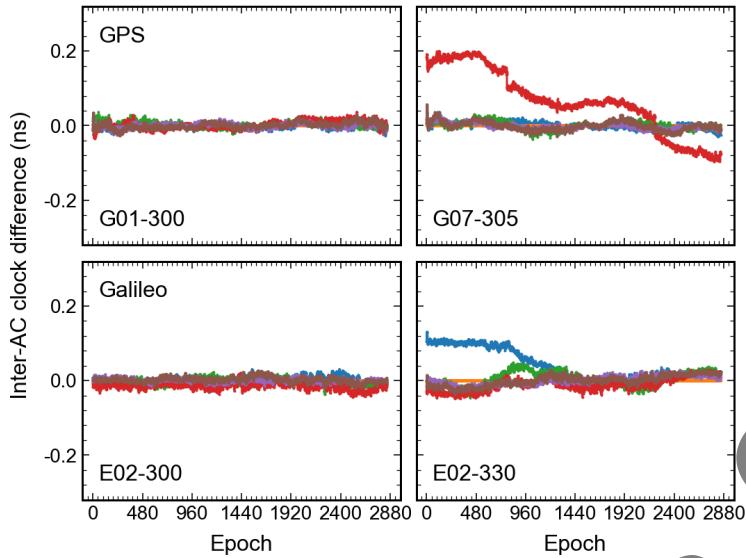


图 4.5 典型的 GPS 和 Galileo 整数钟差一致性和粗差示例

2020 年 300-330 天 GPS 和 Galileo 整数钟差的综合情况及统计结果如图 4.6 和表 4.2 所示，其中 G14 由于卫星调整在实验的时间段内不可用。可以发现 GPS 和 Galileo 整体的整数钟差一致性均较好，除个别天的个别卫星存在稍大的 15 ps 左右的综合残差，其余的综合残差 RMS 均显著地小于 10 ps。统计指标显示，GPS 和 Galileo 整数钟差综合残差的 RMS 均值分别为 5.9 ps 和 6.4 ps，最大值也仅为 16.9 ps 和 15.2 ps，即 GPS 和 Galileo 可以实现不超过 5 mm 的整数钟差综合精度。由 3.4 节北斗/GNSS 多系统钟差综合的经验可知，当 AC 间钟差的一致性良好时，综合钟差由于进行了质量控制而具备更优的抗差特性，因此有更好的定位性能。鉴于 AC 间 GPS 和 Galileo 整数钟差 5-7 ps 的综合精度（即钟差一致性），可以预期综合的整数钟差在用于 PPP-AR 定位将具备更优的定位性能。

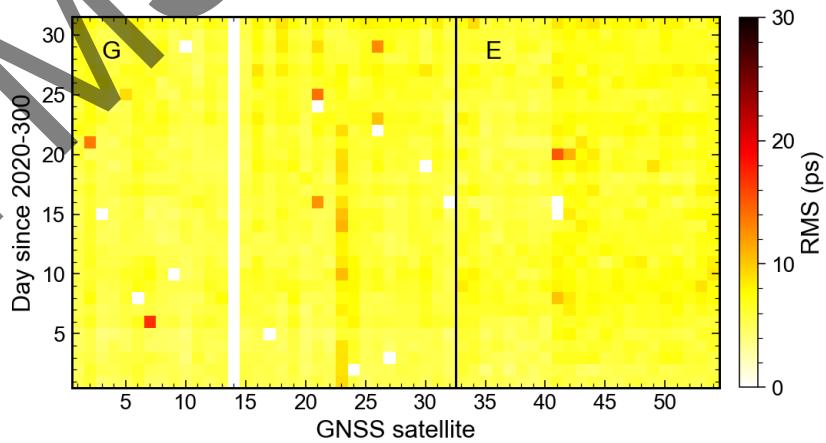


图 4.6 GPS、Galileo 整数钟差综合残差的 RMS

表 4.2 GPS、Galileo 整数钟差综合残差 RMS 的统计情况 (单位: ps)

GNSS 系统	均值	最小值	最大值	75% 分位数
GPS	5.9	3.9	16.9	6.4
Galileo	6.4	3.9	15.2	6.9

图 4.7 展示了 2020 年 300-330 天整数钟差综合的 AC 权重配比情况。可以发现，在 31 天内大部分 AC 的权重较为稳定，TUG 和 COD 在 307、327 天附近出现了较大的波动，这是因为 TUG 和 COD 在这些天的部分卫星钟差出现了较大的误差，影响了 AC 的整体权重，也反映了本文采用的定权策略的有效性。从表 4.3 的统计值来看，TUG、WHU 和 COD 具有较大的平均权重，分别为 21.1%、19.0% 和 17.9%，反映出 3 家 AC 的产品精度较高且稳定性较好，但是需要注意的是 ESA 和 GFZ 的卫星钟差在计算时并没有进行非差模糊度固定，这可能在一定程度上影响了两者的权重分配。

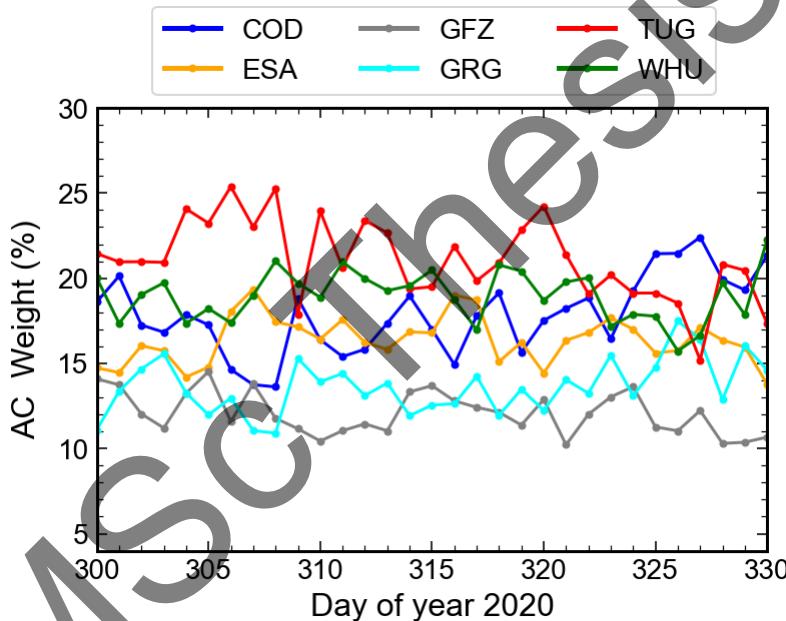


图 4.7 GPS、Galileo 整数钟差综合的 AC 权重配比

表 4.3 GPS、Galileo 整数钟差综合 AC 权重统计

分析中心	平均权重 (%)
COD	17.9
ESA	16.4
GFZ	12.1
GRG	13.6
TUG	21.1
WHU	19.0

4.2.3 PPP-AR 定位分析

通过对 GPS 和 Galileo 宽巷 UPD 和整数钟差综合结果的分析，我们可以发现 GPS 和 Galileo 的产品虽然存在部分粗差，但是整体的一致性较好，可以实现较高精度的产品综合。为了进一步验证本文提出的面向北斗/GNSS 钟差和相位偏差综合算法的有效性，本节使用图 3.10 所示的全球分布的 MGEX 测站进行 PPP-AR 静态和动态定位，对比如分析综合产品和各个 AC 提供的原始产品的模糊度固定效果和定位性能。需要注意，由于钟差综合时使用 ESA 的轨道作为参考轨道，因此综合产品的结果和 ESA 最具可比性。此外，我们使用坐标重复性这一内符合指标来评价静态定位的精度，这是因为目前地面站天线多系统 PCO 改正信息缺失，会导致多系统的解和 IGS SINEX 文件中基于单 GPS 的解存在系统性的差异，很难通过 Helmert 变换完全消除。动态定位则采用静态坐标作为参考真值。

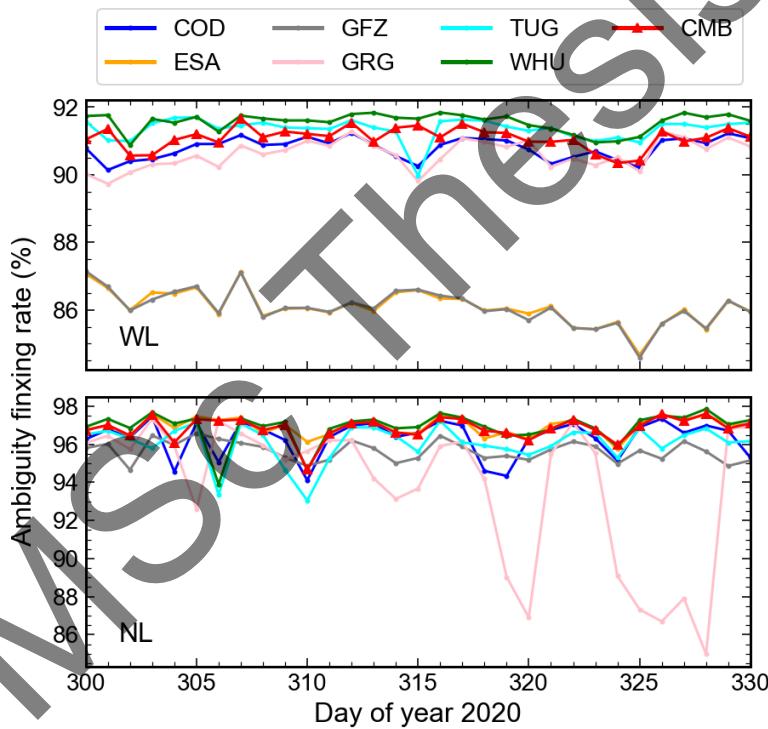


图 4.8 不同产品的 GPS 宽窄巷模糊度固定率

基于不同产品的 GPS 宽、窄巷模糊度固定率如图 4.8 所示，统计结果见表 4.4。需要指出的是，本文中的模糊度固定率统计基于所有共同观测时段不小于 10 min 且平均高度角大于 15 度的星间单差模糊度。就宽巷固定率而言，可以发现 WHU 和 TUG 的结果在 31 天内具有最高的固定率，基本稳定在 91%-92%，平均值分别为 91.6% 和 91.4%，但是在 315 天 TUG 的宽巷固定率下降至 90% 附近。CMB 综合产品的固定率平均值为

91.1%，介于 TUG 和 COD 之间，且会随着各个 AC 固定率的变化产生小幅的波动，但总体而言较为稳定，没有出现大幅的波动，这也验证了宽巷 UPD 综合的效果，即在保持产品精度的前提下具有较单个 AC 更加稳定的产品质量。

窄巷固定率指的是宽巷固定的单差模糊度中能够固定窄巷模糊度的百分比。可以发现 GRG 的窄巷固定率波动较大，其中 319-320 天、324-328 天的固定率均较低，只有 85%-88%，导致 GRG 所有天平均的窄巷固定率仅为 93.8%。通过检查 AC 间整数钟差的一致性，发现这些天 GRG 的 G21 卫星在对齐后仍然与其它 AC 的整数钟差存在 0.3 周左右的偏差，即 GRG 产品该卫星的整数特性不佳，导致包含 G21 卫星的单差模糊度都无法实现窄巷模糊度固定，因此这些天整体的窄巷固定率较低。CMB 在 31 天内的窄巷固定率基本与 WHU 和 ESA 重合且十分稳定，统计结果显示三者的窄巷固定率都约为 96.9%。CMB 的窄巷固定率在 310 天受到 TUG 的影响，出现了明显的下降，但是仍然有 95% 左右的固定率。COD 和 TUG 的窄巷固定率在个别天均出现了小幅的下降，CMB 对应的综合产品在除了 310 天之外都没有受到影响，仍然具有较高的固定率。

表 4.4 不同产品的 GPS、Galileo 宽窄巷模糊度固定率统计

产品来源	GPS		Galileo	
	宽巷 (%)	窄巷 (%)	宽巷 (%)	窄巷 (%)
COD	90.8	96.3	95.8	96.7
ESA	86.1	96.9	98.2	97.3
GFZ	86.1	95.7	98.2	96.9
GRG	90.6	93.8	96.6	96.2
TUG	91.4	96.1	98.1	97.5
WHU	91.6	96.9	98.2	97.5
CMB	91.1	96.9	98.2	97.5

Galileo 在 31 天内的宽、窄巷模糊度固定率如图 4.9 所示，统计结果见表 4.4。可以发现，Galileo 的宽巷固定率显著的高于 GPS，综合产品 CMB 可以达到 98.2% 的平均固定率，与 ESA、GFZ、TUG 和 WHU 对应的结果基本重合，且都没有出现图 4.8 中明显的波动，这表明 Galileo 可以实现比 GPS 更高、更稳定的宽巷模糊度固定。GRG 和 COD 产品的宽巷固定率相对较低，在 95%-96% 附近波动；COD 的波动较大，但是仍然高于 GPS 90% 的宽巷固定率。所有 AC 产品的 Galileo 窄巷固定率也都略高于 GPS，CMB 的 Galileo 窄巷固定率平均值为 97.5%，与 ESA、TUG 和 WHU 的数值相当。与 Galileo 宽巷固定率类似，除 COD 和 GRG 外，其余产品的窄巷固定率在 31 天内十分稳定，在 97% 附近小幅波动。GRG 在 307 天的 E11 产品出现了较大的偏差，而 COD 在

318 和 319 天的多颗 Galileo 卫星产品有较大的偏差，从而导致整体窄巷固定率较低。

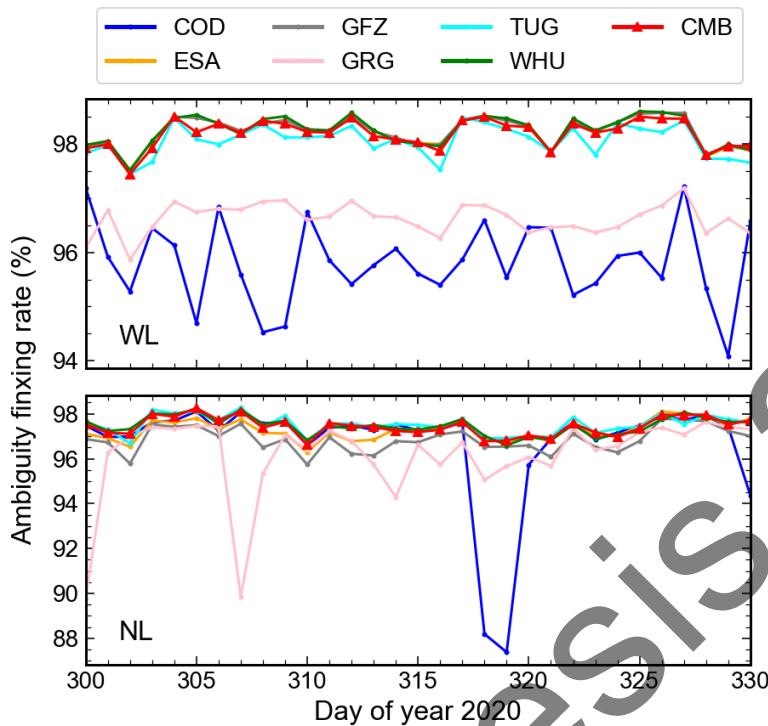


图 4.9 不同产品的 Galileo 宽窄巷模糊度固定率

表 4.5 PPP-AR 静态定位坐标重复性统计（单位：mm）

解的类型	ESA			CMB		
	East	North	Up	East	North	Up
float-G	2.8	1.8	5.5	2.7	1.7	5.4
float-GE	2.3	1.7	5.1	2.2	1.5	5.1
fixed-G	1.6	1.7	5.1	1.5	1.6	5.0
fixed-GE	1.5	1.6	4.8	1.4	1.4	4.8

综合产品 CMB 和 ESA 产品对应的 PPP-AR 静态定位结果统计如表 4.5 所示。可以发现，对于所有四种类型的解，CMB 的坐标重复性较 ESA 在东、北、高三个分量均有 0.1 mm 左右的提升，表明综合产品具备更优的定位性能。使用综合产品的 GE 双系统固定解，在东、北、高分别可以达到 1.4 mm、1.4 mm 和 4.8 mm 的坐标重复性，相对于 GE 浮点解分别有 36.4%、6.7% 和 5.9% 的精度提升。此外，在浮点解时引入 Galileo 系统，相对于单 GPS 解可以显著的提升东、北、高方向分别 18.5%、11.8% 和 5.6% 的定位精度；对固定解而言，加入 Galileo 的精度提升效果相对有限，尤其是东方向。

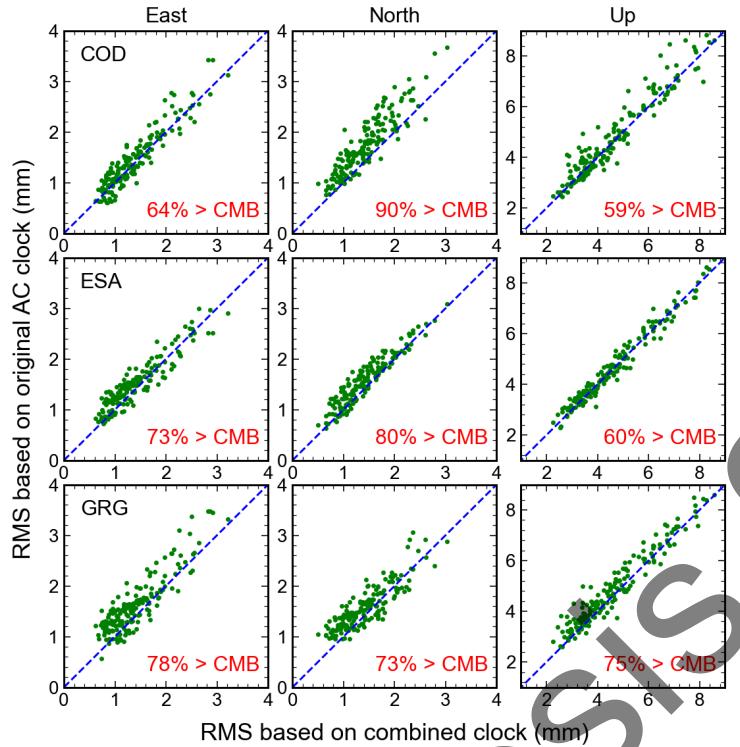


图 4.10 GE 双系统 PPP-AR 静态定位坐标重复性对比

分别使用 COD、ESA、GRG 产品的双系统 PPP-AR 坐标重复性与使用综合产品 CMB 的结果对比如图 4.10 所示。其中每个绿点代表一个测站，若点位于对角线以上，则说明使用 CMB 的定位精度优于使用原始 AC 产品的结果，每个子图右下角标注了符合这种情况的测站比例。可以发现对于大部分测站而言，综合产品 CMB 对应的结果优于所有 3 个 AC 的结果。特别地，CMB 在东、北、高三个分量分别有 73%、80% 和 60% 的测站的坐标重复性优于 ESA 的结果，并且综合产品在北方向的精度提升最为明显，而在高方向最不显著，与其他 AC 的对比亦是如此。与静态定位的结果类似，基于 CMB 综合产品的动态 PPP-AR 表现出了最优的精度和稳定性，在东、北、高三个分量分别达到了 0.66 cm、0.67 cm 和 1.99 cm，ESA 对应的结果为 0.66 cm、0.68 cm 和 2.02 cm。上述静态和动态定位的实验结果充分验证了综合的钟差和相位偏差产品用于 PPP-AR 定位时的优势。

4.2.4 姿态改正讨论

基于本文的钟差综合实验结果可知，AC 间良好的钟差一致性是获得较好的综合产品的前提，即需要在综合前使用 3.1 节中的公式逐一改正 AC 间的系统性差异。鉴于目前只有少数 AC 提供姿态产品文件，为了避免 AC 间系统差异改正的不一致，本文所有的综合实验均没有施加姿态改正，因此可能会出现如图 3.5 所示的地影期钟差一致性的

异常情况。为了展示在钟差综合时施加姿态改正的效果，本文收集了 2020 年 300-330 天 GRG、TUG 和 WHU 内部提供的姿态产品文件，共同支持的系统为 GPS 和 Galileo。因此本节使用上述 3 家 AC 的钟差、相位偏差以及姿态产品单独进行 GPS 和 Galileo 的整数钟差综合实验。实验期间，部分 GPS 卫星在 309 天左右先后经历了地影期，而部分 Galileo 卫星也恰好于 319 天前后经历了地影期，因此提供了研究 3 家 AC 间 GPS 和 Galileo 地影期姿态模型差异的较好机会。

本文分别进行了使用与不使用姿态产品进行整数钟差综合的实验，绘制了 AC 间地影期卫星的钟差差异图，同时绘制了单个 AC 的姿态产品与参考姿态的差异（某个 AC 的姿态产品或名义姿态），直观地展示姿态差异与钟差差异间的联系。结果显示，在使用姿态产品后 AC 间 GPS 的钟差一致性得到了显著的提升。图 4.12 展示了 306 天 G24 卫星（左列）和 310 天 G30 卫星（右列）的整数钟差综合情况，图中第一行展示的是 3 家 AC 的姿态文件相对于 WHU 的偏航角差值，第二行是未施加姿态差异改正的整数钟差相对于 WHU 的差异，第三行为进行姿态改正后的一致性情况。可以发现，偏航角的差值与钟差的差值呈现完全负相关，而进行姿态改正后可以显著地削弱 AC 间钟差的不一致性。以 G24 卫星为例，它在 480 以及 1920 历元时发生了地影期机动，各个 AC 的姿态模型也出现了显著的不一致，其中 GRG 和 WHU 间产生了近 2 周（720 度）的偏航角差异，根据(2.4)计算由此导致的相位缠绕改正差异高达 21.4 cm (713.4 ps)，并在钟差差异中体现。在明确钟差不一致的成因后，根据姿态差异进行改正即可获得 AC 间一致性较好的钟差；G30 的情况同样如此。

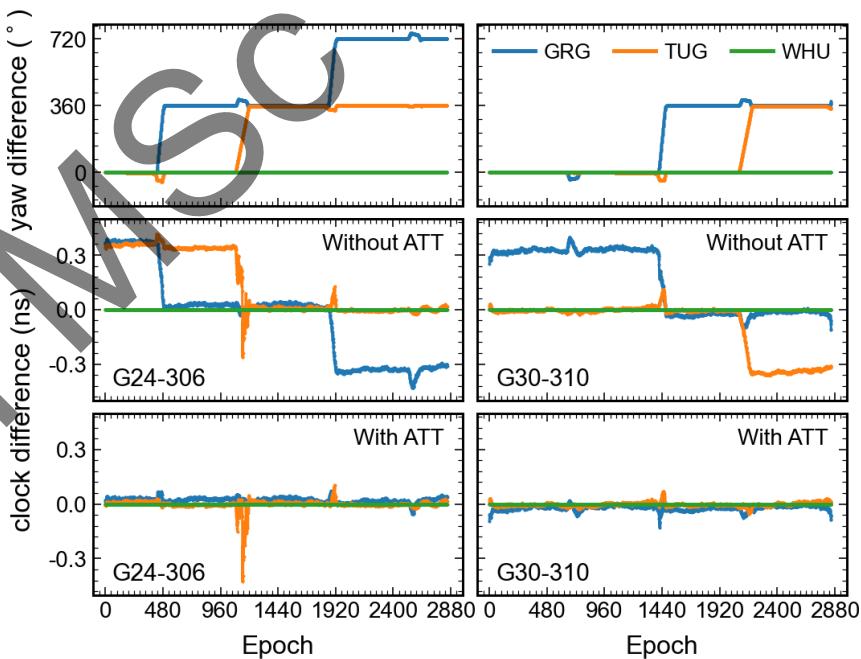


图 4.11 GPS 地影期姿态差异改正的效果展示

与 GPS 不同的是，在不进行姿态差异改正的情况下 AC 间 Galileo 的钟差一致性仍然没有异常，说明各个 AC 使用的 Galileo 姿态模型十分一致。这主要得益于 GSA (European GNSS Agency) 发布的 Galileo 元数据中明确规定了卫星的姿态模型，在各个 AC 严格遵守这一规范的前提下，即可保证地影期卫星姿态模型的一致性。图 4.13 展示了 319 天 3 家 AC 的姿态产品中 E26 卫星相对于名义姿态的偏航角差异。500、1500 及 2400 历元处姿态产品与名义姿态存在 60 度左右的偏航角差异，说明在这些时段卫星经历了地影期，但是 3 家 AC 采用了统一的姿态模型，偏航角基本重合，因此即使不进行姿态改正仍然具有良好的钟差一致性。

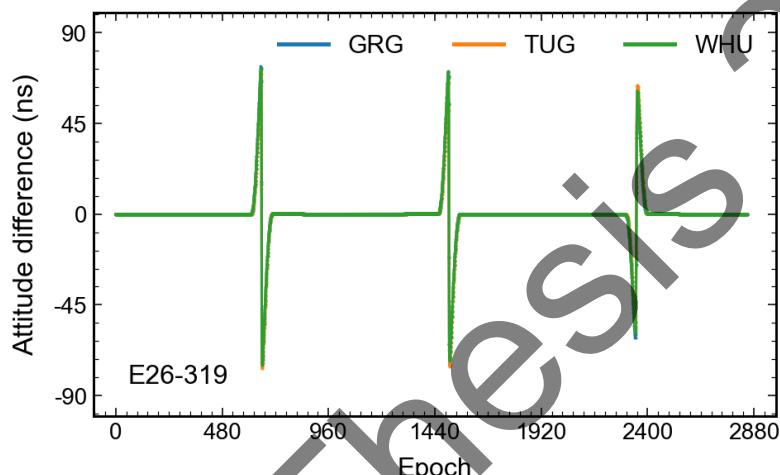


图 4.12 Galileo 地影期 AC 间姿态的一致性

4.3 BDS-2/3 综合实验

4.3.1 宽巷 UPD 综合

BDS-2/3 宽巷 UPD 产品的稳定性是宽巷 UPD 综合的基准，需要注意的是在估计 BDS-2 卫星的宽巷模糊度时需要改正其卫星端的多路径 (Wanninger et al., 2015; Lou et al., 2016)。本文首先依据式(4.1)将 WHU 提供 BDS-2/3 的 OSB 相位偏差产品转换成传统的宽、窄巷 UPD 产品，并以此为例绘制了 31 天内 BDS-2/3 卫星的宽巷 UPD 时间序列，如图 4.14 所示。可以发现与 GPS 和 Galileo 类似，BDS-2/3 的宽巷在天与天之间也较为稳定，两者平均的标准差分别为 0.040 周和 0.017 周。这说明 BDS-3 的宽巷 UPD 较 BDS-2 更为稳定，与 GPS (0.014 周) 十分接近。这主要是因为 BDS-2 出现了较多 0.2 周左右的阶跃，从综合的结果来看这并不是 WHU 产品的计算误差，各个 AC 的产品有着一致的变化，这可能是实验期间由这些卫星轨道面的太阳辐射变化引起。考虑到 BDS-3 的一颗卫星也产生了约 0.3 周的阶跃，说明这样的现象较为普遍，应该与卫星或

星载设备抵抗外界环境干扰的能力有关，也有可能是卫星调整引起。

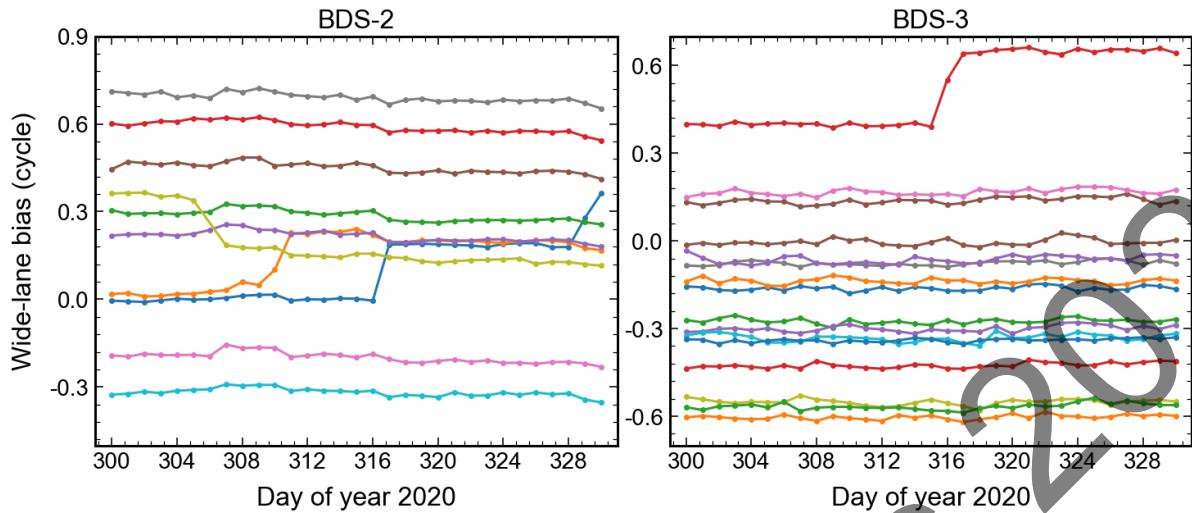


图 4.13 BDS-2/3 宽巷时间序列

基于上述的分析可知，BDS-2/3 卫星的宽巷 UPD 具有和 GPS 和 Galileo 一致的时间稳定性，因此在综合过程中可以采用相同的质量控制策略。31 天内所有 BDS-2/3 卫星的宽巷 UPD 综合残差如图 4.15 所示。从图中可以看出，BDS-3 宽巷 UPD 的综合残差较 BDS-2 更加集中，两者的一致性均与 GPS 和 Galileo 类似，接近 100% 的残差绝对值小于 0.1 周。由于只有 2 家 AC 的宽巷 UPD 参与综合，因此残差的分布形状与图 4.3 有明显差异。

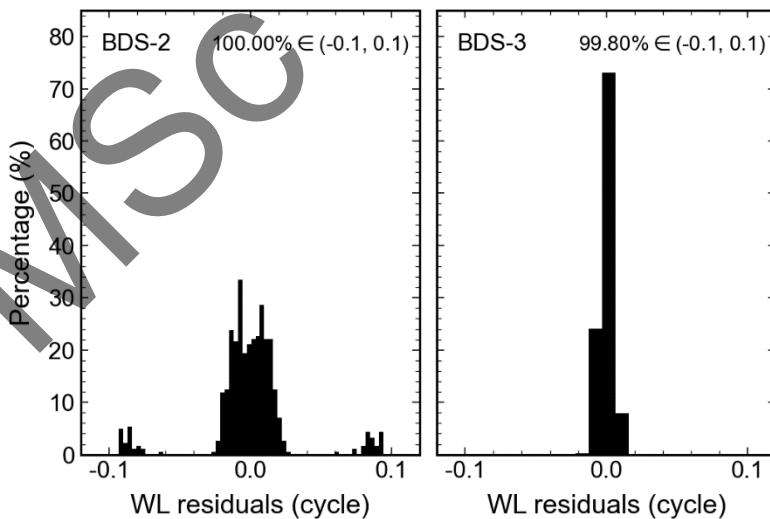


图 4.14 BDS-2/3 宽巷偏差综合残差直方图

4.3.2 钟差和窄巷 UPD 综合

在进行综合之前，本文首先以 2020 年 300 天 ESA 产品对应的窄巷 UPD 为例，分

析目前 BDS-2/3 卫星窄巷 UPD 的天内稳定性，结果如图 4.16 所示。可以发现 BDS-2 卫星的窄巷 UPD 天内稳定性较差，有 2-3 颗卫星在 16 时附近产生了较大的波动，这与目前 BDS-2 轨道和钟差产品的精度有直接的关系。从统计指标来看，BDS-2 窄巷天内的平均标准差为 0.068 周，而 BDS-3 为 0.041 周，两者的稳定性不如 GPS 和 Galileo（约为 0.012 周）。这主要是因为目前 BDS 精密轨道和钟差产品的精度仍有提升的空间，窄巷 UPD 估计会受到轨道和钟差误差的影响，因而产生了相对较大的波动，但是如果产品内部是自洽的，则一般不影响整数钟差的综合。

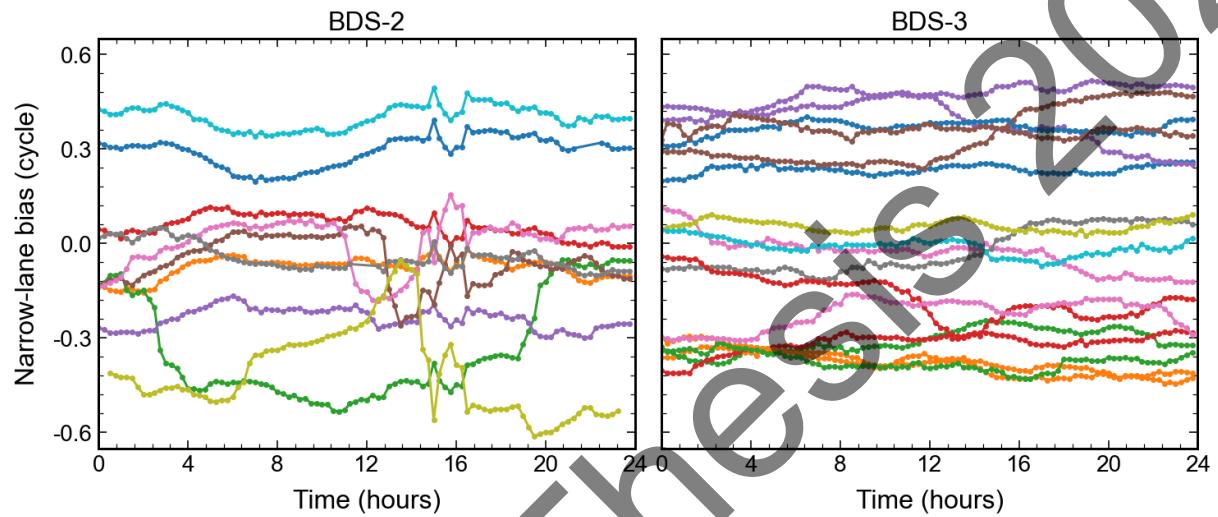


图 4.15 BDS-2/3 天内窄巷时间序列

在分析了 BDS-2/3 卫星的窄巷 UPD 天内稳定性之后，本文依据式(4.4)将窄巷 UPD 和钟差综合为具有整数性质的钟差产品，进行整数钟差的综合。图 4.17 展示了北斗整数钟差综合过程中典型的 AC 间钟差的一致性以及粗差示例。可以发现 BDS-2/3 卫星的整数钟差可以实现较高精度的对齐，平均对齐精度约为 11 ps，比 GPS 和 Galileo 略差。虽然存在非线性的变化导致个别时段的一致性较低，但是整体依然满足整数钟差综合的一致性要求。由 3.4.3 节的分析可知，这些非线性的变化主要是目前 BDS-2/3 卫星的轨道误差引起的，随着 BDS 卫星光压模型和姿态模型的精化、轨道精度的提升、地面观测站的增多，这一现象将会得到显著的改善。从图中右列可以看出目前 BDS-2/3 卫星的钟差偶尔会存在产品中断的情况，这是因为目前具备 BDS 跟踪能力的 IGS 站数量较少，且几何分布不均，钟差估计时地面站的选取非常重要，不然会导致个别历元卫星钟差精度的下降甚至缺失。

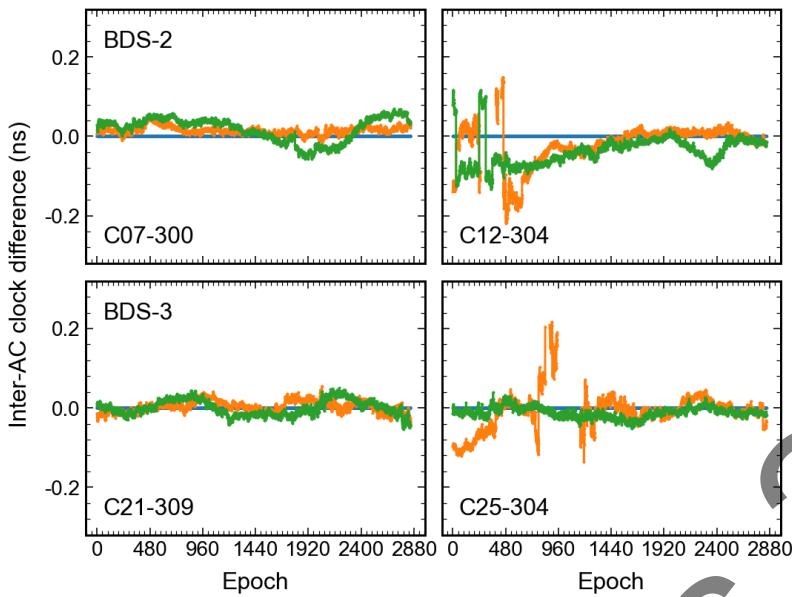


图 4.16 典型的 BDS-2/3 整数钟差一致性和粗差示例

2020 年 300-330 天 BDS-2/3 整数钟差的综合结果如图 4.18 和表 4.6 所示。ESA、GFZ 和 WHU 提供的 GPS 和 Galileo 产品也一同进行综合与统计，以对比分析 BDS 的综合情况。可以发现，目前 AC 间 GPS 和 Galileo 的钟差钟差一致性优于 BDS，在使用三家 AC 的产品综合时没有出现异常的情况，GPS 和 Galileo 钟差综合 RMS 的均值分别为 5.5 ps 和 5.8 ps，优于 2 mm。BDS-2/3 钟差综合的 RMS 均值分别为 10.6 ps 和 10.9 ps，两者的钟差一致性十分接近。但是 BDS-2/3 的个别卫星或者个别天的综合残差出现了相对较大的 RMS 值，最大值分别为 34.8 ps 和 24.5 ps。有趣的是，BDS-2 一致性较差的 3 颗卫星（图 4.18 中颜色较深的 3 条竖线）正好是 BDS-2 系统中全部的 3 颗 MEO 卫星，而剩余的 IGSO 卫星一致性则相对较好；BDS-3 系统没有发现类似的现象。这可能与 BDS-2 系统的 3 颗 MEO 卫星搭载的原子钟性能有关，但需要进一步的验证。

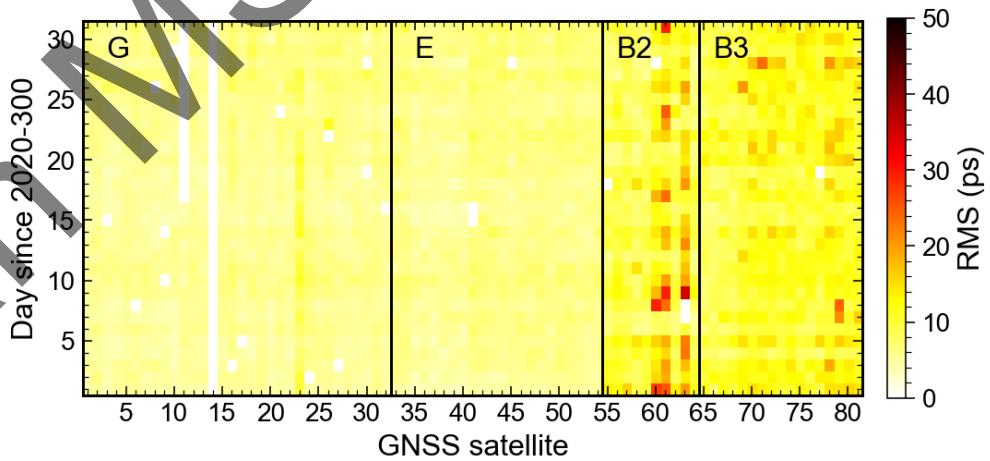


图 4.17 GPS、Galileo 和 BDS-2/3 整数钟差综合的 RMS

表 4.6 GPS、Galileo 和 BDS-2/3 整数钟差综合 RMS 的统计情况（单位：ps）

GNSS 系统	均值	最小值	最大值	75% 分位数
GPS	5.5	3.4	11.0	5.9
Galileo	5.8	3.4	9.3	6.5
BDS-2	10.6	4.7	34.8	11.7
BDS-3	10.9	5.7	24.5	12.3

31 天内 ESA、GFZ 和 WHU 的权重配比情况如图 4.19 所示，其中权重根据 GPS、Galileo 和 BDS-2/3 所有卫星整数钟差的一致性共同确定。可以发现，WHU 在所有天内具有较大的权重，略高于 ESA，GFZ 次之，3 家 AC 的平均权重分别为 37.7% (WHU)、33.6% (ESA) 和 28.7% (GFZ)。WHU 的钟差产品可能得益于产品估计时固定了 GPS、Galileo 和 BDS-2/3 的非差模糊度，使得产品精度有进一步的提高 (Geng et al., 2019)。

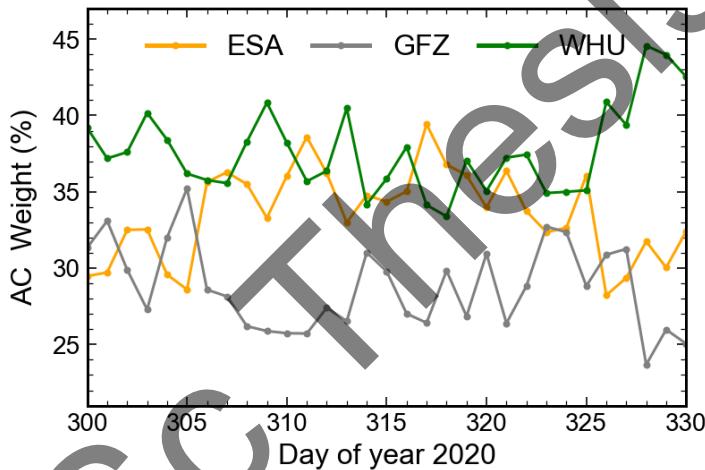


图 4.18 GPS、Galileo 和 BDS-2/3 整数钟差综合的 AC 权重配比

4.3.3 单北斗定位分析

BDS-3 全球卫星导航系统于 2020 年 7 月 31 日正式开通，由服务于亚太地区的 BDS-2 系统正式迈向全球服务。图 4.20 展示了使用 2020 年 315 天 ESA 的精密轨道产品绘制的 BDS-2/3 卫星在全球的平均可见性分布情况，截至高度角设为 7 度。需要指出的是，ESA 的轨道产品中没有包含 BDS-2 的 5 颗 GEO 卫星，且没有包含 C37 以上的 BDS-3 卫星。可以发现目前 BDS 系统在全球范围内能够实现平均最少 5 颗卫星的可见性，满足实现定位的最低卫星数要求。考虑到 BDS-2 的区域服务性质，亚太地区的平均可见北斗卫星数最多，能够达到 14.8 颗，部分地区甚至能超过 GPS 的可见卫星数；在全球范围内的平均可见卫星数为 9.6 颗。

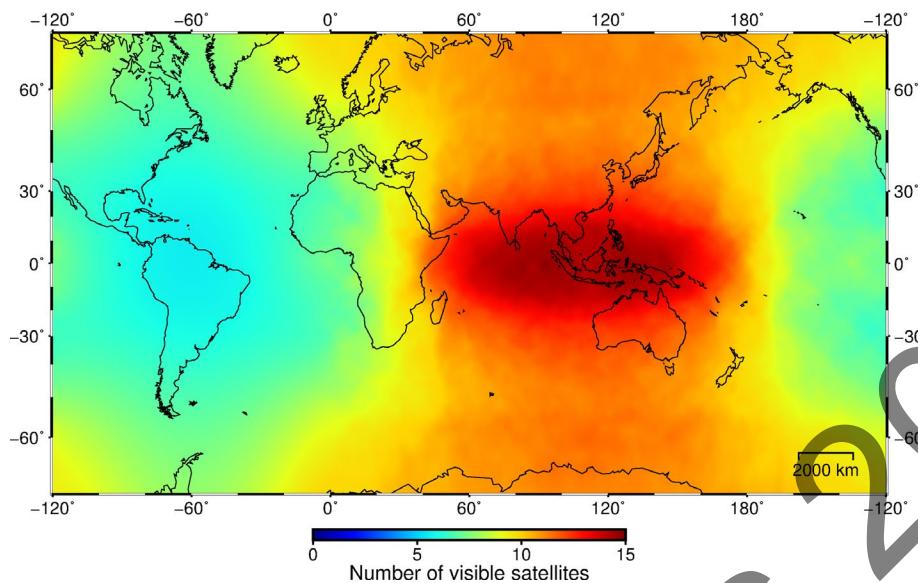


图 4.19 BDS-2/3 卫星全球可见性分布

由上述全球范围内的 BDS-2/3 卫星可见性分析可知，在全球范围内进行单北斗定位在理论上是可行的。因此，本节分别使用 ESA、GFZ 和 WHU 提供的产品以及本文的综合产品使用图 3.10 所示的 MGEX 测站进行单北斗 PPP-AR 定位实验。与定位不同的是，模糊度固定率的统计仍然使用 GEC 组合解中 BDS-2/3 的固定率，从而增强解的强度，与 4.2.3 节中 GPS 和 Galileo 基于 GE 双系统计算的固定率更有可比性。北斗卫星的使用情况均与 ESA 的轨道产品保持一致。

BDS-2/3 的宽、窄巷模糊度固定率分别如图 4.21 和图 4.22 所示，统计值见表 4.7。可以发现综合产品 BDS-2/3 的宽巷固定率十分稳定，在 31 天内没有出现大幅的波动，平均值分别为 93.1% 和 94.2%，与 GPS 和 Galileo 相当。相比之下，原始 AC 对应的宽巷固定率在个别天则出现了大幅的下降，如 307 天左右 ESA 和 GFZ 的 BDS-2 宽巷固定率下降至 65% 附近，WHU 的 BDS-3 宽巷固定率在 318 天下降至了 90% 附近。但是综合的宽巷 UPD 产品没有受到异常值的影响，依然具有稳健的性能。总体而言，目前 BDS-2 和 BDS-3 的宽巷固定率水平较为相近。

表 4.7 不同产品的 BDS-2/3 宽窄巷模糊度固定率统计

AC 产品	BDS-2		BDS-3	
	宽巷 (%)	窄巷 (%)	宽巷 (%)	窄巷 (%)
ESA	86.2	83.2	94.2	93.8
GFZ	85.1	80.9	94.0	85.2
WHU	93.9	80.2	94.1	85.5
CMB	93.1	82.6	94.2	92.7

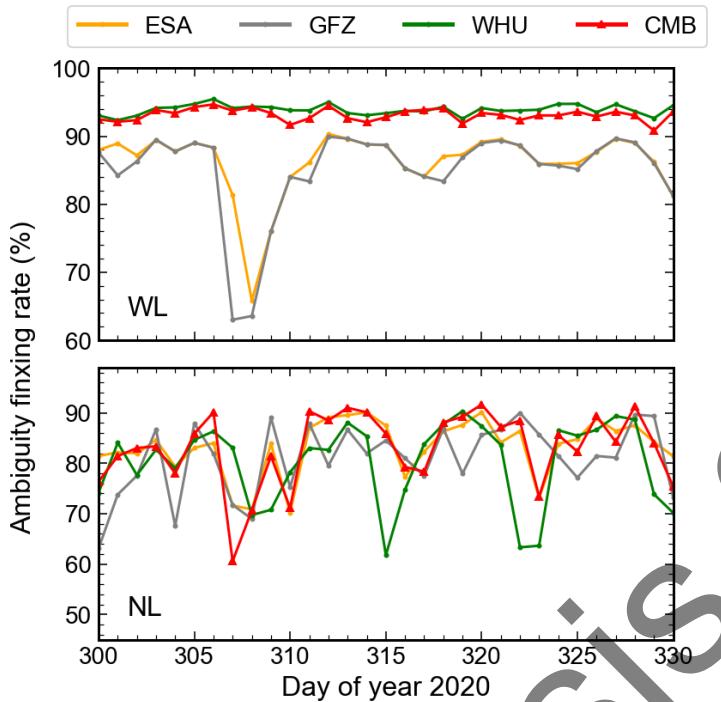


图 4.20 不同产品的 BDS-2 宽窄巷模糊度固定率

宽巷模糊度固定只和原始观测值相关，因此可以实现数值较高且稳定的固定率。但是窄巷模糊度固定相对更加复杂，受到精密卫星产品、数据处理时使用的误差改正模型的精度等多方面的影响。从图中可以看出，BDS-2 的窄巷固定率较低且波动较大，基本在 80%附近波动，个别天甚至会降到 60%附近。综合产品在 307 天的窄巷固定率较低，这主要受 GFZ 和 ESA 产品的影响，其实综合产品窄巷模糊度固定的数量介于 WHU 和 ESA、GFZ 之间，但是当天综合产品的宽巷固定率依然维持了较高的数值，而窄巷固定率计算时分母使用的是宽巷固定成功的模糊度数量，因此当天综合产品的窄巷固定率计算出现了异常。总体而言，ESA 产品的 BDS-2 的窄巷固定率最高，平均值为 83.2%；综合产品 CMB 次之，为 82.6%。从数值上而言，目前 BDS-2 的窄巷固定率明显低于 GPS、Galileo 以及 BDS-3。相比之下，BDS-3 具有更高且更稳定的窄巷固定率。尤其是 ESA 的产品，能够实现平均 93.8%的 BDS-3 窄巷固定率，比 BDS-2 高 10.6%，且在 31 天内一直维持较高水准。综合产品也表现出了稳定的 BDS-3 窄巷固定率，平均值为 92.7%，与 ESA 十分接近。虽然 GFZ 和 WHU 的产品也能获得比 BDS-2 更高的 BDS-3 窄巷固定率，但是个别天出现了较大的波动，猜测这与不同天 AC 产品估计时测站的选取有关，需要进一步验证。这也说明了面向北斗/GNSS 多系统精密钟差和相位偏差综合的必要性，能够为 PPP-AR 用户提供更加稳定可靠的产品，并为 AC 提供产品性能反馈。

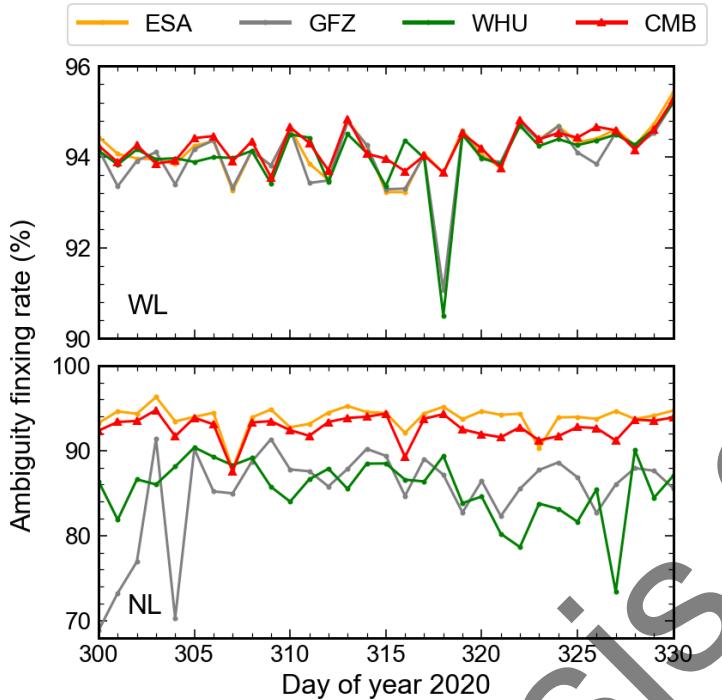


图 4.21 不同产品的 BDS-3 宽窄巷模糊度固定率

单北斗 PPP-AR 的静态定位结果如图 4.23 所示, 统计结果见表 4.8。表中额外给出了单 GPS 和 GEC 三系统的定位结果, 以便与单北斗的结果进行对比分析。需要注意的是, 静态定位依然使用去除线性趋势项后的坐标重复性进行评价; 由于钟差综合时使用的参考轨道是 ESA, 因此综合产品对应的结果与 ESA 最具可比性。从表 4.8 中的统计结果可以看出, CMB 的单北斗固定解在东、北、高的精度分别为 2.4 mm、2.5 mm 和 7.6 mm, 而 ESA 对应的精度为 2.3 mm、2.4 mm 和 7.3 mm, 略优于 CMB 的结果。图 4.23 也印证了这一点, 基于 ESA 产品的定位结果整体优于 CMB, 在东、北、高三个方向使用 ESA 的产品时分别有 69%、61% 和 57% 的测站能获得更优的定位精度。这反映目前 BDS-2/3 产品的一致性仍然不佳, 存在如图 4.17 所示的一致性较差的情况, 有待于各个 AC 整体产品精度及一致性的提升, 以便进一步提升综合产品的性能。但是得益于 ESA 产品的可靠性, 使用综合产品 CMB 时能获得较 GFZ 和 WHU 产品更优的定位精度。

相对于浮点解而言, 单北斗静态 PPP-AR 在东、北、高三个分量分别能提升 42.9%、7.4% 和 2.6% 的定位精度, 东方向的提升效果最为显著。总体而言, 单北斗静态 PPP-AR 已经能达到水平 2-3 mm, 高程 7-8 mm 的坐标重复性。作为对比, 可以发现, CMB 产品对应的单 GPS 静态 PPP-AR 的坐标重复性在三个分量分别为 1.5 mm、1.5 mm 和 5.1 mm, 水平分量比 ESA 的精度高 0.1 mm 左右。相对于单北斗 PPP-AR, 单 GPS 在三个分量的定位精度分别高 37.5%、40.0% 和 32.9%。这主要是目前 BDS-2/3 的精密轨道和

钟差产品精度还没有达到与 GPS 相同的水平，地面站的 BDS-2/3 天线改正信息尚不完善，在目前条件下还不能实现 BDS 的最高定位精度。随着日后相关模型和产品质量的完善，BDS 有望实现与 GPS 相当的定位精度。当使用 GEC 三系统进行 PPP-AR 静态定位时，可以实现东、北、高三个分量分别为 1.4 mm、1.5 mm 和 4.8 mm 的定位精度，比单 GPS 静态 PPP-AR 的精度略有提升。

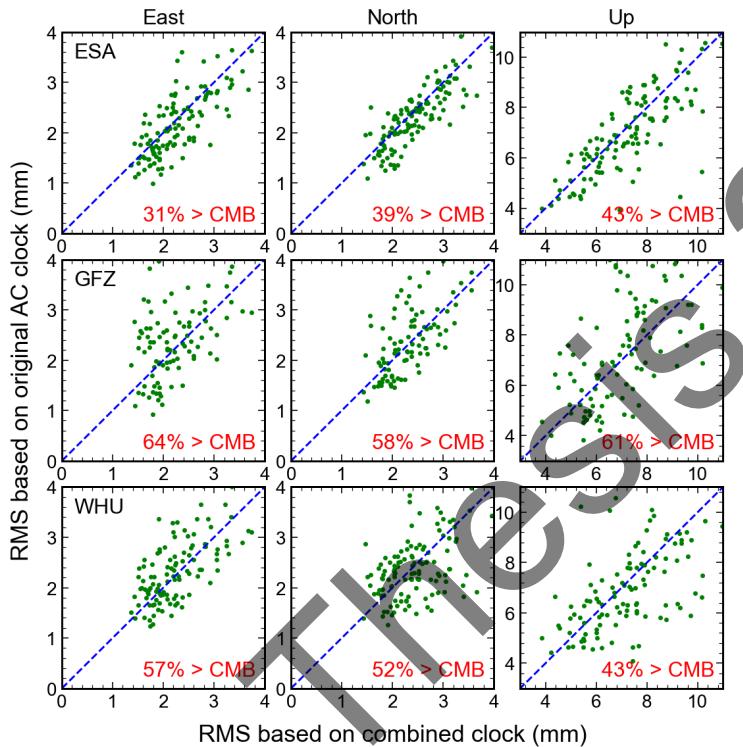


图 4.22 单北斗 PPP-AR 静态定位坐标重复性对比

表 4.8 PPP-AR 静态定位坐标重复性统计（单位：mm）

解的类型	ESA			CMB		
	East	North	Up	East	North	Up
float-G	2.8	1.8	5.5	2.7	1.6	5.5
float-C	4.1	2.6	7.5	4.2	2.7	7.8
float-GEC	2.2	1.7	5.0	2.1	1.5	5.1
fixed-G	1.6	1.7	5.1	1.5	1.5	5.1
fixed-C	2.3	2.4	7.3	2.4	2.5	7.6
fixed-GEC	1.5	1.6	4.8	1.4	1.5	4.8

单北斗动态定位的精度统计如表 4.9 所示，本文一并统计单 GPS 和 GEC 三系统的定位结果以便和单北斗进行对比。可以发现，综合产品 CMB 能够在东、北、高三个分量分别实现 3.40 cm、2.55 cm 和 6.68 cm 的单北斗 PPP-AR 动态定位精度，相比之下单

GPS 能够达到 0.85 cm、0.85 cm 和 2.57 cm，比单北斗高 75%、66.7% 和 61.5%，差异较静态定位更加显著。这是因为本文实验所用的测站是全球分布的，虽然全球 24 h 内平均的 BDS-2/3 可见卫星数大于 5 颗，但是亚太以外地区的测站个别历元的可见卫星数可能仅有 4 颗，导致这些历元的定位精度严重下降，从而降低了整体的动态统计精度。若之后 AC 的产品能够支持全部的 BDS-3 卫星，可以预期这一问题将会得到改善。倘若使用 GEC 三系统进行 PPP-AR 动态定位，在东、北、高三个方向的平均精度可以达到 0.62 cm、0.65 cm 和 1.89 cm，较单 GPS 和单北斗的定位精度均有显著提升。相对于 ESA 的定位结果，综合产品的单 GPS 和 GEC 三系统定位结果没有明显差异，但是单北斗固定解在三个分量分别比 ESA 低 0.09 cm、0.22 cm 和 0.52 cm，说明目前 AC 间 BDS-2/3 精密产品的一致性不如 GPS，综合过程中通过质量控制获得的产品性能提升效果有限，导致综合产品的精度无法优于产品质量最佳的 AC，但是综合产品仍能获得较为稳定的质量。

表 4.9 PPP-AR 动态定位精度统计（单位：cm）

解的类型	ESA			CMB		
	East	North	Up	East	North	Up
float-G	1.14	0.97	2.84	1.14	0.97	2.86
float-C	3.43	2.37	6.02	3.48	2.52	6.44
float-GEC	0.76	0.70	1.96	0.76	0.70	1.96
fixed-G	0.84	0.86	2.58	0.85	0.85	2.57
fixed-C	3.31	2.33	6.16	3.40	2.55	6.68
fixed-GEC	0.62	0.65	1.90	0.62	0.65	1.89

5 结论与展望

5.1 主要工作与研究成果

本文首先回顾了 IGS 产品综合的发展历程，并总结了卫星钟差和相位偏差产品综合的研究现状，指出为 PPP-AR 用户提供稳定可靠的钟差和相位偏差产品对于促进北斗/GNSS 多系统 PPP-AR 应用的重要性，以及研究相应综合算法的迫切性。从该研究目的出发，本文在深入分析北斗/GNSS 精密钟差各个构成部分特性的基础上提出了精密钟差的数学模型，并基于该模型设计了兼容传统 IGS 钟差综合方法、同时面向北斗/GNSS 多系统钟差综合的算法，并实现了相应的软件。基于该软件，充分验证了本文提出的多系统钟差综合算法的可靠性和有效性，并使用多系统 PPP 静态和动态定位分析了综合钟差产品用于定位的性能。同时，本文还针对目前 IGS 分析中心开始提供的多系统相位偏差产品综合开展了相关研究，在多系统钟差综合算法的基础上设计了相位偏差和钟差产品联合综合的处理流程。基于多系统 PPP-AR 定位实验，本文对比分析了综合产品相对于原始 AC 产品的模糊度固定率和定位性能，分析了目前多系统 GNSS 的 PPP-AR 定位精度，尤其是单北斗系统的定位性能，并展望了将来北斗系统的定位精度。

本文主要的研究成果如下：

1. 构建精密钟差数学模型。深入分析了多系统 GNSS 精密钟差的构成部分及其时变特性，除钟差基准、模型误差、初始钟偏差外重点分析了各个 AC 间系统间偏差的差异，发现除 GFZ 外，其余 AC 间的系统间偏差为天内常数。基于上述研究，给出了面向多系统的精密钟差数学模型，作为对齐不同 AC 的钟差产品的理论基础。并基于此设计了兼容传统 IGS 钟差综合策略的多系统钟差综合算法，以及配套的质量控制算法，并进行了代码实现。
2. 钟差综合算法验证。使用 2019 年全年的 COD、EMR、ESA、GFZ、GRG 和 JPL 的钟差产品进行了 GPS 钟差综合实验，并和 IGS 的钟差综合结果进行了对比。结果显示，两者 AC 权重配比的最大差异不超过 2%，但是在 AC 钟差基准异常等 IGS 的综合策略无法正常处理的特殊情况下，本文的算法依然能有效对齐钟差产品并进行综合。此外，IGS 钟差综合残差 RMS 的均值为 10.9 ps，本文方法的对应值为 10.0 ps，验证了本文提出的钟差综合算法能够更加精确地对齐各个 AC 的钟差产品，获得更加一致的综合结果。
3. 北斗/GNSS 多系统钟差综合实验。使用 2020 年 1 月 COD、ESA、GFZ、GRG 和 WUM 的多系统 GNSS 钟差产品进行了 GPS、Galileo、GLONASS 和 BDS-2/3 钟差综合实验。钟差综合结果显示，GPS、Galileo 的综合残差 RMS 最小，分别为 11.6 ps 和 11.5 ps；GLONASS 的综合残差最大，为 45.5 ps；BDS-2 和

BDS-3 的综合残差较为接近，分别为 20.5 ps 和 26.4 ps。使用综合产品进行 GREC 四系统 PPP 静态定位可以在东、北、高三个方向分别达到 2.3 mm、1.5 mm 和 5.6 mm 的坐标重复性精度，优于大部分 AC 产品对应的定位精度。由于目前地面站天线缺少 BDS-2/3 信号的 PCO 和 PCV 改正信息，北斗系统的定位精度受到了限制。

4. GLONASS 钟差综合分析。深入分析了 GLONASS 钟差综合时 AC 间一致性不佳的原因，即由于 GLONASS 频分多址的信号体制，接收机端存在的频间偏差阻碍了 GLONASS 精密轨道、钟差产品估计时的模糊度固定，导致 AC 间 GLONASS 轨道产品存在可达 12 cm 左右的轨道切向和法向差异，引起了 AC 间钟差的线性及非线性变化差异，并使用基于浮点解计算的 GPS 精密轨道和钟差产品复现了该现象。BDS-2/3 产品估计时虽然可以固定模糊度，但是目前 AC 间北斗卫星的姿态模型、太阳光压模型等并不一致，导致轨道切向和法向差异较大，导致钟差一致性不佳。
5. 相位偏差综合算法。设计了基于宽窄巷 UPD 的北斗/GNSS 多系统相位偏差的分步综合算法，即首先对齐、综合各个 AC 提供的宽窄 UPD 产品，并顾及宽巷整数周调整对窄巷 UPD 的影响。根据卫星钟差和窄巷 UPD 的耦合性，将窄巷 UPD 和原始钟差综合为具有整数特性的钟差，并基于多系统钟差综合算法进行抗差综合
6. GPS/Galileo 相位偏差综合实验。使用 2020 年 300-330 天 COD、ESA、GFZ、GRG、TUG 和 WHU 提供的 GPS 和 Galileo 钟差和相位偏差产品进行了综合实验。结果显示，GPS 和 Galileo 宽巷 UPD 天间稳定性良好，标准差小于 0.014 周；综合残差的绝对值分别有 99.98% 和 98.59% 小于 0.1 周，一致性较好。GPS 和 Galileo 的窄巷 UPD 天内波动标准差小于 0.013 周，可以满足天内常量的产品形式。得益于融合了窄巷 UPD 的 GPS 和 Galileo 钟差的整数特性，其综合残差 RMS 的均值分别可以达到 5.9 ps 和 6.4 ps。PPP-AR 定位结果显示，使用综合产品分别可以实现 GPS 和 Galileo 平均 91.1% 和 98.2% 的宽巷固定率，以及 96.9% 和 97.5% 的窄巷固定率，鲁棒性和固定率优于大部分 AC 的产品。基于综合产品的 GE 双系统 PPP-AR 静态定位可以在东、北、高三个方向分别达到 1.4 mm、1.4 mm 和 4.8 mm 的坐标重复性精度，相对于浮点解分别有 36.4%、6.7% 和 5.9% 的精度提升。与原始 AC 产品对比，平均有 75% 的测站在使用综合产品时能获得更高的定位精度。双系统动态定位可以达到 0.66 cm、0.67 cm 和 1.99 cm 定位精度，同样优于原始 AC 的产品。
7. 姿态改正在钟差综合中的应用。使用 2020 年 300-330 天 GRG、TUG 和 WHU 的姿态产品展示了姿态差异改正对于提升钟差综合时 AC 间钟差一致性的作用。

结果显示，各个 AC 使用的 Galileo 卫星姿态模型十分一致，即使在地影期也没有出现显著的姿态差异。相比之下，GPS 卫星地影期的姿态模型在各个 AC 间存在较大差异，卫星钟差在不顾及姿态差异改正的情况下会产生高达 10 cm 的阶跃性偏差，严重影响钟差综合时的质量控制；使用 3 个 AC 提供的姿态产品改正姿态差异后，可以显著的削弱甚至消除由姿态差异导致的钟差不一致。

8. BDS-2/3 相位偏差综合及单北斗 PPP-AR 实验。使用 2020 年 300-330 天 ESA、GFZ 和 WHU 提供的 BDS-2/3 卫星钟差和相位偏差产品进行了综合实验。结果显示，BDS-2/3 卫星的宽巷 UPD 天间稳定性同 GPS 和 Galileo 相近，标准差小于 0.04 周；综合残差的绝对值分别有 100% 和 99.80% 小于 0.1 周。BDS-2/3 的窄巷 UPD 天内稳定性较 GPS 和 Galileo 略差，标准差小于 0.041 周，这主要与目前 BDS-2/3 的产品精度有关。融合了窄巷 UPD 的 BDS-2/3 整数钟差综合残差的 RMS 均值分别为 10.6 ps 和 10.9 ps，且 BDS-2 的 MEO 卫星综合残差明显大于 IGSO 卫星，而 BDS-3 则没有这样的现象。PPP-AR 定位结果显示，基于综合产品分别可以实现 BDS-2/3 卫星 93.1% 和 94.2% 的宽巷固定率，以及 82.6% 和 92.7% 的窄巷固定率，优于 GFZ 和 WHU，而略低于 ESA 的产品。使用综合产品进行全球范围内的单北斗 PPP-AR 静态定位可以在东、北、高三个方向分别达到 2.4 mm、2.5 mm 和 7.6 mm 的坐标重复性精度，相对于浮点解分别有 42.9%、7.4% 和 2.6% 的精度提升。相比之下，基于同样综合产品的 GEC 三系统 PPP-AR 可以达到 1.4 mm、1.5 mm 和 4.8 mm 的坐标重复性精度。单北斗动态定位受限于实验期间 AC 产品支持的 BDS-3 卫星数，在全球范围内仅能达到平均 3.40 cm、2.55 cm 和 6.68 cm 的东、北、高定位精度。

5.2 今后研究展望

本文围绕北斗/GNSS 精密钟差和相位偏差产品综合这一现实问题，对面向非差模糊度固定的产品综合理论和算法进行了研究，并取得了一定的研究成果。但仍然需要进一步完善相关研究成果，未来可行的研究内容包括以下几个方面：

1. 研究顾及卫星轨道切向和法向差异的钟差一致性改正公式，在此基础上实现可靠的 GLONASS 钟差综合，并且提升 BDS-2/3 钟差综合的精度。
2. 基于本文提出的一种精密钟差数学模型，进一步研究 IGS 精密卫星钟差产品天间不连续性的解决方法。
3. 基于本文提出的多系统钟差和相位偏差产品综合算法，研究适用于多频率相位偏差的综合算法。

参考文献

- 陈康慷, 徐天河, 杨玉国, 等. 2016. iGMAS GNSS 钟差产品综合与评估[J]. 测绘学报, 45(S2): 46-53.
- 陈康慷. 2014. IGS 分析中心轨道/钟差产品综合及网解模式动态精客单点定位研究[D]. 西安: 长安大学.
- 陈星宇. 2020. 面向非差模糊度固定的相位钟/相位偏差估计方法和产品综合理论[D]. 武汉: 武汉大学.
- 计国锋, 杨志强, 贾小林. 2019. MGEX 和 iGMAS 的多系统轨道和钟差产品精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 39(1): 13-19.
- 李博峰, 葛海波, 沈云中. 2015. 无电离层组合、Uofc 和非组合精客单点定位观测模型比较[J]. 测绘学报: 44(7):734-740.
- 李林阳, 崔阳, 王宇谱, 等. 2017. 窄巷 FCB 估计方法改进及时变特性分析[J]. 测绘学报, 46(1): 34-43.
- 李盼. 2016. GNSS 精客单点定位模糊度快速固定技术和方法研究 [D]. 武汉: 武汉大学.
- 王晨, 郭靖, 赵齐乐. 2017. 偏航姿态对 GPS 和 GLONASS 精密轨道和钟差的影响[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 42(5): 624-629.
- 王广兴. 2016. 北斗观测值特性分析及其在 PPP 模糊度固定应用中的研究 [D]. 武汉: 武汉大学.
- 叶世榕. 2002. GPS 非差相位精客单点定位理论与实现 [D]. 武汉: 武汉大学.
- 张小红, 李盼, 朱峰. 2012. 卫星端宽巷载波相位小数偏差估计方法研究和结果分析[J]. 武汉大学学报 (信息科学版) , 37(10).
- 周江文, 黄幼才, 杨元喜. 1997. 抗差最小二乘法 [M]. 武汉理工大学出版社.
- Banville S., Geng J., Loyer S., Schaer S., Springer T., & Strasser S. (2020). On the interoperability of IGS products for precise point positioning with ambiguity resolution. *Journal of geodesy*, 94(1), 1-15.
- Batori E., Almat N., Affolderbach C., & Mileti G. (2020). GNSS-grade space atomic frequency standards: Current status and ongoing developments. *Advances in Space Research*.
- Beutler G., Kouba J. & Springer T. (1995). Combining the orbits of the IGS Analysis Centers. *Bulletin Géodésique* 69, 200–222.
- Cai C. S. and Gao Y. (2013). Modeling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning. *Gps Solutions*, 17(2): 223-236.
- Chen K., Xu T., & Yang Y. (2017). Robust combination of IGS analysis center GLONASS clocks. *GPS Solutions*, 21(3), 1251-1263.
- Chen K., Xu T., Chen G., Li J., & Yu S. (2015). The orbit and clock combination of iGMAS analysis centers and the analysis of their precision. In *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings: Volume II* (pp. 421-438). Springer, Berlin, Heidelberg.

- Chen L., Song W., Yi W., Shi C., Lou Y., & Guo H. (2017). Research on a method of real-time combination of precise GPS clock corrections. *GPS solutions*, 21(1), 187-195.
- Collins P, Lahaye F, Heroux P, Bisnath S (2008) Precise point positioning with ambiguity resolution using the decoupled clock model. In: Proceeding of the (ION GNSS 2008). Institute of Navigation, Savannah, GA. 16-19 Sept, pp 1315-1322
- Dach R., Beutler G., Hugentobler U., et al. (2003). Time transfer using GPS carrier phase: error propagation and results. *Journal of Geodesy*, 77(1-2), 1-14.
- Dach R., Schildknecht T., Hugentobler U., et al. (2006). Continuous geodetic time-transfer analysis methods. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 53(7), 1250-1259.
- Dow J. M., Neilan R. E., & Gendt G. (2005). The International GPS Service: Celebrating the 10th anniversary and looking to the next decade. *Advances in Space Research*, 36(3), 320-326.
- Ferland R., & Piraszewski M. (2009). The IGS-combined station coordinates, earth rotation parameters and apparent geocenter. *Journal of Geodesy*, 83(3-4), 385-392.
- Ge M., Gendt G., Rothacher M., Shi C., & Liu J. (2008). Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy*, 82(7), 389-399. doi:10.1007/s00190-007-0187-4
- Geng J. H., & Bock Y. (2013). Triple-frequency GPS precise point positioning with rapid ambiguity resolution. *Journal of Geodesy*, 87(5), 449-460. doi:10.1007/s00190-013-0619-2
- Geng J., Chen X., Pan Y. et al. (2019). A modified phase clock/bias model to improve PPP ambiguity resolution at Wuhan University. *J Geod.*, 93(10), 2053–2067.
- Geng J., Pan Y., Li X., Guo J., Liu J., Chen X., & Zhang Y. (2018a). Noise characteristics of high - rate multi - GNSS for subdaily crustal deformation monitoring. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(2), 1987-2002.
- Geng J., Li X., Zhao Q. and Li G. (2018b). Inter-system PPP ambiguity resolution between GPS and BeiDou for rapid initialization. *Journal of Geodesy*, 93(3): 383-398.
- Geng J., Meng X., Dodson A. H., & Teferle F. N. (2010). Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison. *Journal of Geodesy*, 84(9), 569-581.
- Geng J., Shi C., Ge M., et al. (2011). Improving the estimation of fractional-cycle biases for ambiguity resolution in precise point positioning. *Journal of Geodesy*, 86(8), 579-589. doi:10.1007/s00190-011-0537-0
- Geng J., Zhao Q., Shi C. and Liu J. (2016). A review on the inter-frequency biases of GLONASS carrier-phase data. *Journal of Geodesy* 91(3): 329-340.
- Gonzalez Martinez, F. J. (2013). Performance of new GNSS satellite clocks. KIT Scientific Publishing.
- Griffiths J. (2019). Combined orbits and clocks from IGS second reprocessing. *Journal of geodesy*, 93(2),

177-195.

- Guo J. and Geng J. (2017). GPS satellite clock determination in case of inter-frequency clock biases for triple-frequency precise point positioning. *Journal of Geodesy*, 92(10), 1133-1142.
- Guo J., Xu X., Zhao Q., and Liu J. (2016). Precise orbit determination for quad-constellation satellites at Wuhan University: strategy, result validation, and comparison. *Journal of Geodesy*, 90(2):143–159.
- Hakansson M., Jensen A. B. O., Horemuz M. and Hedling G. (2017). Review of code and phase biases in multi-GNSS positioning. *Gps Solutions* 21(3): 849-860.
- Hauschild A. (2010). Precise GNSS clock-estimation for real-time navigation and Precise Point Positioning (Doctoral dissertation, Technische Universität München).
- Hu J., Zhang X., Li P., Ma F., & Pan L. (2020). Multi-GNSS fractional cycle bias products generation for GNSS ambiguity-fixed PPP at Wuhan University. *GPS Solutions*, 24(1), 1-13.
- International GNSS Service. 2008. IGS Products. Retrieved March 10, 2021, from <http://www.igs.org/products>.
- Jaduszliwer B., & Camparo J. (2021). Past, present and future of atomic clocks for GNSS. *GPS Solutions*, 25(1), 1-13.
- Kouba, J. (2009a). A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products.
- Kouba J. (2009b). A simplified yaw-attitude model for eclipsing GPS satellites. *GPS Solut* 13(1):1-12
- Kouba J., & Springer T. (2001). New IGS station and satellite clock combination. *GPS Solutions*, 4(4), 31-36.
- Kouba J, Mireault Y and Lahaye F. (1995). 1994 IGS orbit/clock combination and evalution. Appendix of the Analysis Coordinator Report, International GPS Service for Geodynamics IGS 1994 Annual Report, pp. 70-94.
- Kouba J., Beutler G., & Rothacher M. (2000). IGS combined and contributed Earth rotation parameter solutions. In International Astronomical Union Colloquium, 178, 277-302.
- Kouba, J. (2004). Improved relativistic transformations in GPS. *GPS Solutions*, 8(3), 170-180.
- Kouba, J., & Héroux, P. (2001). Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS solutions*, 5(2), 12-28.
- Laurichesse D., Mercier F., Berthias J. P., & Bijac J. (2008). Real time zero-difference ambiguities fixing and absolute RTK. In Proceedings of the 2008 National Technical Meeting of The Institute of Navigation (pp. 747-755)
- Li P., Zhang X.H., Ren X., Zuo X., & Pan Y. (2015). Generating GPS satellite fractional cycle bias for ambiguity-fixed precise point positioning. *GPS Solutions*, 20(4), 771-782.
- Liu JN, and Ge MR (2003). PANDA software and its preliminary result of positioning and orbit determination. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 8(2), 603.

- Lou Y., Gong X., Gu S., Zheng F. and Feng Y. (2016). Assessment of code bias variations of BDS triple-frequency signals and their impacts on ambiguity resolution for long baselines. *GPS Solutions* 21(1): 177-186.
- Lou Y., Zhang W., Wang C., Yao X., Shi C., & Liu J. (2014). The impact of orbital errors on the estimation of satellite clock errors and PPP. *Advances in Space Research*, 54(8), 1571-1580.
- Loyer S, Banville S, Geng J, Strasser S. (2021). Exchanging satellite attitude quaternions for improved GNSS data processing consistency. Manuscript in preparation.
- Loyer S, Banville S, Perosanz F, Mercier F. (2019) GNSS attitude quaternions exchange using ORBEX, version 30/04/2019. Available online: http://acc.igs.org/misc/proposal_orbex_april2019.pdf.
- Pan Y, Geng J, Liu K, Chen X., et al. (2020). Evaluation of rapid phase clock/bias products for PPP ambiguity resolution and its application to the M7.1 2019 Ridgecrest, California earthquake. *Adv Space Res.*, 65(11), 2586-2594.
- Paziewski J. and Wielgosz P. (2014). Accounting for Galileo–GPS inter-system biases in precise satellite positioning. *Journal of Geodesy* 89(1): 81-93.
- Petit G., Kanj A., Loyer S., et al. (2015). 1×10^{-16} frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution. *Metrologia*, 52(2), 301.
- Prange L., Villiger A., Sidorov D., Schaer S., Beutler G., Dach R., & Jäggi A. (2020). Overview of CODE's MGEX solution with the focus on Galileo. *Advances in space research*, 66(12), 2786-2798.
- Ray J., Dong D., & Altamimi Z. (2004). IGS reference frames: status and future improvements. *GPS solutions*, 8(4), 251-266.
- Rovira-Garcia A., Juan J.M., Sanz J. et al. (2021) Removing day-boundary discontinuities on GNSS clock estimates: methodology and results. *GPS Solut* 25, 35.
- Sakic P., Mansur G., & Männel B. (2020). A prototype for a Multi-GNSS orbit combination.
- Seepersad G, Banville S, Collins P, et al. (2016). Integer satellite clock combination for Precise Point Positioning with ambiguity resolution. Proceedings of the 29th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016), Portland, OR. 2016: 2058-2068.
- Seepersad, G., Bisnath, S. (2017). An assessment of the interoperability of PPP-AR network products. *J. Glob. Position. Syst.* 15, 4.
- Senior K., Koppang P., & Ray J. (2003). Developing an IGS time scale. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 50(6), 585-593.
- Shi Junbo. (2012). Precise Point Positioning Integer Ambiguity Resolution with Decoupled Clocks (Doctoral dissertation, University of Calgary).
- Shi J., & Gao Y. (2014). A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods. *GPS solutions*, 18(4), 519-528.

- Schaer S. (2016). SINEX BIAS — solution (Software/technique) independent exchange format for GNSS BIASEs version 1.00. swisstopo/AIUB.
- Springer T. A., Zumberge J. F., & Kouba J. (1998). The IGS analysis products and the consistency of the combined solutions. In 1998 ZGS Analysis Center Workshop Proceedings, European Space Operations Centre, Darmstadt, Germany.
- Springer T.A., Beutler G. (1993) Towards an official IGS orbit by combining the results of all IGS Processing Centers. Proceedings of the 1993 IGS Workshop, held March 24–26, Bern, Switzerland, pp. 242 – 250.
- Strasser S., Mayer-Gürr T., & Zehentner N. (2019). Processing of GNSS constellations and ground station networks using the raw observation approach. *Journal of Geodesy*, 93(7), 1045-1057.
- Wanninger L., & Beer S. (2015). BeiDou satellite-induced code pseudorange variations: diagnosis and therapy. *GPS solutions*, 19(4), 639-648.
- Weiss J.P., Steigenberger P., Springer T. (2017) Orbit and clock product Generation. In: Teunissen PJ, Montenbruck O (eds) Springer handbook of global navigation satellite systems, Springer handbooks. Springer, Cham, pp 983–1010.
- Wu JT, Wu SC, Hajj GA, Bertiger WI, Lichten SM. (1993). Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscripta Geodaetica*, 18(2):91–98
- Yang Y., Xu Y., Li J., & Yang C. (2018). Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: Data analysis based on BDS-3 demonstration system. *Science China Earth Sciences*, 61(5), 614-624.
- Zhao W., Chen H., Gao Y., Jiang W., & Liu X. (2020). Evaluation of Inter-System Bias between BDS-2 and BDS-3 Satellites and Its Impact on Precise Point Positioning. *Remote Sensing*, 12(14), 2185.
- Zumberge J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., Watkins M. M., & Webb F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3): 5005-5017.

致谢

随着毕业设计的撰写完成，在武汉大学 7 年的求学时光也已经接近了尾声。在测绘学院四年本科以及卫星导航定位技术研究中心三年硕士的学习过程中，在诸多老师的课堂和交流中收获了丰富的测绘领域尤其是 GNSS 方向的知识，也从他们身上感悟到了诸如做学问的态度、待人接物的道理。故在此首先感谢自本科以来所有教授过我知识的老师们，感谢你们一直以来传道、授业、解惑的辛勤付出，也由衷地感谢武汉大学能够拥有这样一批优秀的教师。

感谢我的导师耿江辉教授在科研上的指导和帮助。本论文是在耿老师的悉心指导下完成的，从论文的选题到实验资料的收集以及实验设计，再到论文的撰写和修改，花费了导师宝贵的时间和精力。耿老师扎实的理论功底、严谨的科研态度和出众的科研能力一直是本人学习的榜样，他教导的一丝不苟、实事求是的科研态度是我今后继续从事科研工作的宝贵财富。

感谢课题组已毕业的陈星宇博士在本人毕业设计课题上所做的前期工作，师兄的研究成果是本人得以顺利开展相关研究工作的重要基础，避免了许多弯路。感谢毛姝尹师妹在本人毕业设计撰写过程中提供的重要帮助，得以发现诸如代码中的错误，以便完善毕业设计期间所编写的软件，顺利地完成实验数据分析工作。感谢郭将和张启元协助我完成毕业设计中所需的相关实验。同时，感谢 PRIDE Lab 课题组已经毕业的常华、李成宏、江恩铭等诸位师兄以及在读的郭将、栗广才、刘凯、李鹏博、温强、辛绍铭、曾燃、张启元等同门以及张明远和单强两位室友的陪伴和生活上的关心。

着重感谢测绘学院的史俊波老师和周晓慧老师，感谢你们自本科以来的关心和引导。感谢卫星导航定位技术研究中心的方荣新老师和魏娜老师平时不厌其烦的答疑解惑，拓展了我的知识面。感谢中心已毕业的刘杨博士、李晓涛博士和张强博士等给予的帮助，使我快速适应了硕士生的科研生活。

感谢加拿大自然资源部的 Simon Banville 博士在本人毕业课题上的交流。感谢法国国家太空研究中心的 Sylvain Loyer 博士和奥地利格拉茨科技大学的 Sebastian Strasser 博士提供的卫星姿态产品，以及德国地学研究中心的李盼博士提供的多系统 UPD 产品，帮助我顺利完成相关实验分析。

最后感谢我亲爱的父母，你们默默的支持和关怀是我一路走来的动力源泉。

武汉大学学位论文使用授权协议书

本学位论文作者愿意遵守武汉大学关于保存、使用学位论文的管理办法及规定，即：学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供文献检索与阅览服务；学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；在以教学与科研服务为目的前提下，学校可以在校园网内公布部分或全部内容。

一、在本论文提交当年，同意在校园网内以及中国高等教育文献保障系统(CALIS)、高校学位论文系统提供查询及前十六页浏览服务。

二、在本论文提交□当年/□一年/□两年/□三年以后，同意在校园网内允许读者在线浏览并下载全文，学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务。（保密论文解密后遵守此规定）

论文作者(签名): _____

学 号: _____ 2018206180020

学 院: _____ 卫星导航定位技术研究中心

日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日