



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

国际地球参考框架特性分析及区域地球参考框架建立

作者姓名: 刘 娇

指导教师: 陈俊平 研究员 中国科学院上海天文台

曲伟菁 副研究员 中国科学院上海天文台

学位类别: 理学博士

学科专业: 天体测量与天体力学

培养单位: 中国科学院上海天文台

2021 年 12 月

Analysis of the International Terrestrial Reference Frames and
Construction of Regional Terrestrial Reference Frame

A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in Astrometry and Celestial Mechanics

By

Liu Jiao

Supervisor: Professor Chen Junping

Supervisor: Associate Professor Qu Weijing

Shanghai Astronomy Observatory, Chinese Academy of Sciences

December 2021

中国科学院大学
研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：

日期：

中国科学院大学
学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延期后适用本声明。

作者签名： 导师签名：

日期： 日期：

摘要

高精度的地球参考框架的构建为地球科学研究领域和测绘学科领域提供了重要的基准保障。亚毫米级地球参考框架精度更是全球大地测量观测系统（Global Geodetic Observing System, GGOS）提出的服务于高精度应用的需求。本文中首先分析和估计了最新国际地球参考框架的精度和可靠性；并对长时间序列的坐标残差进行了噪声特性分析和区域空间滤波；在分析 GNSS 技术局限性的基础之上，以北斗三号（BDS-3）系统的数据为研究对象，分别建立了基于 BDS-3 数据的全球和区域参考框架，并分析了其可靠性和速度场精度，以期为建立我国自主的地球参考框架提供参考。

本文的主要研究工作和研究成果如下：

- 1、介绍了参与地球参考框架建立的四种空间大地测量技术的定位原理；对国际地球参考框架、IGS 参考框架以及区域参考框架的研究现状进行了分析和讨论；并对目前所建立的参考框架存在的局限性进行了讨论。
- 2、对地球参考框架建立时所用的参数估计理论-最小二乘估计进行了概述；详细描述了国际地球参考框架的定义、综合理论和建立流程。
- 3、以 IGS 解为参考对象，比较和分析了最新国际地球参考框架 ITRF2014、DTRF2014、JTRF2014 的精度和它们在没有数据支撑条件下的可靠性。对于 ITRF2014，X、Y、Z 三个坐标轴的方向与定义方向（即 ITRF2008 的方向）分别以 11.9、5.5 和 $8.4\mu\text{as}/\text{yr}$ 的速度偏离，ITRF2014 的尺度以 $-0.038\text{ppb}/\text{yr}$ 的速度偏离定义的尺度；对于 DTRF2014，X/Y 坐标轴方向的原点率参数从 0.07 、 $-0.11\text{mm}/\text{yr}$ 转变为 -0.17 、 $-0.18\text{mm}/\text{yr}$ ，X/Z 坐标轴方向的方向率由 -3.6 、 $2.9\mu\text{as}/\text{yr}$ 转变为 15.9 、 $13.2\mu\text{as}/\text{yr}$ ；对于 JTRF2014，其 X、Y、Z 坐标分量上原点差异的周年信号分别可达 1.5 、 3.0 和 2.4mm ，其随时间的短期变化趋势与长期趋势也有很大差异。此外，在 X 和 Y 坐标分量上的方向与 IGS 解相比存在明显的季节性信号和趋势切换。
- 4、以 ITRF2014 为参考基准，分析了贡献于 IGS 服务中心第二次重处理解的 6 个分析中心的原点、方向和尺度的特性。在原点方面：各分析中心的原点间差异较大，其中 EMR, JPL, MIT 三个分析中心的原点中包含了显著的季节性信

号以及 GPS 交点年信号；在方向方面：各分析中心的方向一致性较好（小于 3uas/yr），这一点得益于各分析中心的测站分布良好；在尺度方面：各分析中心的尺度一致性小于 0.006ppb/yr。

5、以测站坐标时间为研究对象，根据测站坐标时间序列中可能包含的线性和非线性信号以及存在的噪声构建了测站坐标时间序列的数学模型，利用构建的数学模型估计了测站的速度场和周期信号的幅度值。结果表明：1) 在数据长度长达 11 年的参数估计中，基于精密单点定位技术解算的测站坐标时间序列的速度场与 IGS 解估计的速度场精度相当，与框架 IGb14 的速度场相比统计精度在 N、E、U 三个坐标轴上均优于 1mm/yr；2) 基于精密单点定位技术估计的周年信号幅度值多数与 IGS 解估计的周年信号幅度值小于 2mm，基于精密单点定位技术估计的半年信号幅度值多数与 IGS 解估计的半年信号幅度值小于 1mm，去除幅度值差异大于 5mm 的测站之后的周年和半年幅度值统计精度（RMS）分别为 1.2mm、0.7mm。

6、以坐标残差时间为研究对象，借助功率谱分析研究了测站坐标残差时间序列的噪声特性。结果表明：“白噪声+闪烁噪声”的数学模型仍然是目前最为合适的随机模型。值得进一步探究的是，基于精密单点定位技术解的残差坐标时间序列的噪声特性相较 IGS 解的残差坐标时间序列更加集中。

7、利用主成分分析法对欧洲区域分布的 30 个测站坐标残差时间序列进行区域空间滤波。结果显示，原始测站坐标残差时间序列通过第一主成分指示的区域空间滤波之后剩余的坐标残差时间序列的不确定度有所降低，具体表现为：通过对参与区域空间滤波分析的 30 个站的坐标残差时间序列进行统计，滤波后坐标残差的 RMS 值在 N、E、U 三个方向上的均值分别降低了 0.2mm、0.2mm、1.0mm。不难发现，基于主成分分析方法的区域空间滤波在垂直方向上的作用最为显著。

8、基于 BDS-3 系统的数据，利用精密单点定位技术和网平差技术分别建立了全球地球参考框架。以 IGS 解为参照对象，对比分析了基于精密单点定位技术和基于网平差技术建立的全球北斗参考框架的可靠性、一致性和速度场精度。结果表明：1) 基于精密单点定位技术相较基于网平差技术的测站受所在区域可见卫星数目有限的问题的影响严重，且在系统建成之后仍有部分测站因所在区域卫星覆盖能力有限而使得定位精度没有得到提升；2) 基于 BDS-3 系统建立的北斗全球参考框架的精度可达 mm 级精度；3) 基于精密单点定位技术的速度场和基

于网平差技术的速度场与 IGS 解的速度场较为一致。基于网平差技术的速度场精度在 E 方向上得到了提高,这一结果与 GNSS 数据处理时的模糊度固定有关。

9、基于 BDS-3 系统的数据,利用精密单点定位技术和网平差技术分别建立了区域地球参考框架。选取分布于欧洲区域的 30 个站作为区域参考框架的研究对象,对比分析了基于精密单点定位技术和基于网平差技术建立的北斗区域参考框架的可靠性和速度场精度。结果表明: 1) 基于网平差技术的测站坐标精度在 E 方向上相比精密单点定位技术提高 2mm; 2) 基于 BDS-3 系统建立的北斗区域参考框架的精度可达 cm 级精度,基于网平差技术的框架参数相较基于精密单点定位技术与 IGS 解具有更好的一致性; 3) 基于网平差技术的测站坐标精度和速度场精度与 IGS 解的坐标和速度场精度具有更好的一致性,基于网平差技术的区域网速度场精度在 N 和 E 方向上相比基于精密单点定位技术提高 0.4mm/yr, 1.0mm/yr。因此,建议在建立北斗区域参考框架时采用基于网平差技术的结果。

关键词: 国际地球参考框架, 北斗参考框架, 精密单点定位技术, 网平差技术, 时间序列分析。

Abstract

The realization of high-precision Terrestrial Reference Frame(TRF) provides important benchmark guarantee for the research field of earth science and surveying and mapping discipline. The accuracy of sub-millimeter TRF is the demand of Global Geodetic Observing System (GGOS) for high precision application. In this paper, the accuracy and reliability of the latest International Terrestrial Reference Frame(ITRF) are analyzed and estimated. In addition, the noise characteristics of coordinate residuals of long time series are analyzed and the regional space filtering is carried out. Based on the limitation of GNSS technology, the global and regional reference frames based on BDS-3 data are established respectively, and their reliability and velocity field accuracy are analyzed, in order to provide valuable reference for the realization of China's independent TRF.

The main research work and results of this paper are as follows:

1. The positioning principles of four space geodesy techniques involved in the establishment of TRF are introduced. The research status of ITRF, IGS reference frame and regional reference frame are analyzed and discussed. The limitations of the current reference frames are also discussed.
2. The least square estimation theory used in the establishment of TRF frame is summarized. The definition, synthesis theory and establishment process of ITRF are described in detail.
3. Taking IGS solution as the reference object, the accuracy of ITRF2014, DTRF2014 and JTRF2014 and their reliability without data support are compared and analyzed. For ITRF2014, the X, Y, and Z components diverges from the definition orientation (i.e., the orientation of ITRF2008) with a drift of 11.9, 5.5, and $8.4\mu\text{as/yr}$, respectively. The ITRF2014 scale diverges from the definition scale with a drift of -0.038ppp/yr . For DTRF2014, the origin rate parameters of X/Y axis changed from 0.07, -0.11mm/yr to -0.17 , -0.18mm/yr , and the direction rates of X/Z axis changed

from $-3.6, 2.9\mu\text{as}/\text{yr}$ to $15.9, 13.2\mu\text{as}/\text{yr}$. For JTRF2014, the annual signals of origin difference on X, Y and Z coordinate components can reach 1.5, 3.0 and 2.4mm respectively, and the short-term and long-term trends of JTRF2014 are also with significant differences. In addition, there are obvious seasonal signals and trend switches in the direction of X and Y components compared with IGS solutions.

4. Taking ITRF2014 as a reference, the characteristics of the origin, direction and scale of the six analysis centers contributing to the second reprocessing solutions of IGS Service Center are analyzed. In terms of origin, there are great differences among the origin of each analysis center, among which the origin of EMR, JPL and MIT contain significant seasonal signals and draconic signals of GPS. In terms of orientation, the orientation consistency of each analysis center is excellent (less than $3\mu\text{as}/\text{yr}$), which is due to the good distribution of stations in each analysis center. In terms of scale, the consistency of all analysis centers was less than 0.006 ppb/yr.

5. Taking the station coordinate time series as the research object, the mathematical model of the station coordinate time series is constructed according to the possible linear and nonlinear signals and the existing noise in the station coordinate time series. Besides, the velocity field and the amplitude of the periodic signal are estimated by using the constructed mathematical model. The results show that: 1) In the parameter estimation with the data length of 11 years, the velocity field of the station coordinate time series based on precise single point positioning(PPP) technique is comparable to the velocity field estimated by IGS solution, and the statistical accuracy is better than 1mm/yr on N, E and U components compared with that of IGb14 frame. 2) The annual signal amplitude estimated based on the PPP technology and IGS solution is less than 2mm, and the semiannual signal amplitude estimated based on the PPP technology and IGS solution is less than 1mm. The statistical accuracy (RMS) of annual and semiannual amplitude values after removing the stations with amplitude differences greater than 5mm were 1.2mm and 0.7mm, respectively.

6. Taking the coordinate residual time series as the research object, the noise characteristics of the coordinate residual time series of the station are studied by power

spectrum analysis. The results show that the mathematical model of white noise plus flicker noise is still the most suitable stochastic model. In addition, the noise characteristics of the residual coordinate time series based on PPP technology are more concentrated than those of IGS solution.

7. Using principal component analysis (PCA) to perform regional spatial filtering on the coordinate residual time series of 30 stations distributed in Europe. The results show that the uncertainty of the remaining coordinate residual time series after the regional spatial filtering indicated by the first principal component of the original station coordinate residual time series is reduced, which can be expressed as follows: According to the statistics of the coordinate residual time series of 30 stations participating in the regional spatial filtering analysis, the mean RMS values of the coordinate residual after filtering are reduced by 0.2mm, 0.2mm and 1.0mm in the N, E and U directions respectively. It is not difficult to find that the regional spatial filtering based on PCA has the most significant effect in the vertical direction.

8. Based on the data of BDS-3 satellite navigation system, the global terrestrial reference frame is established by using PPP technology and network adjustment(NET) technology respectively. Based on IGS solutions, the reliability, consistency and velocity field accuracy of the global Beidou reference frame based on precise single point positioning technology and network adjustment technology are compared and analyzed. The results show that: 1) compared with the network adjustment technology, the stations based on PPP technology are seriously affected by the limited number of visible satellites in the region, and the positioning accuracy of some stations is still not improved due to the limited coverage capacity of satellites in the region after the completion of the system; 2) The accuracy of beidou Global Reference frame based on BDS-3 system can reach mm precision; 3)The velocity field based on the PPP technology and the velocity field based on the network adjustment technology are consistent with the IGS solution. The accuracy of the velocity field based on the network adjustment technology is improved in the E direction, which is related to the fixed ambiguity in GNSS data processing.

9. Based on the data of BDS-3 satellite navigation system, the beidou regional reference frame is realized by using PPP technology and net adjustment technology respectively. Thirty stations distributed in Europe were selected as the research objects of regional reference frame, and the reliability and velocity field accuracy of beidou regional reference frame based on PPP technology and network adjustment technology were compared and analyzed. The results show that: 1) The coordinate accuracy of the station based on the network adjustment technology is 2mm higher than that of the PPP technology in the E direction; 2) The accuracy of beidou regional reference frame based on BDS-3 system can reach cm level accuracy, and the framework parameters based on network adjustment technology have better consistency with IGS solution than those based on precise single point positioning technology; 3) Compared with IGS solution, the coordinate accuracy and velocity field accuracy based on network adjustment technology have better consistency. The velocity field accuracy of regional network based on network adjustment technology is 0.4mm/yr and 1.0mm/yr higher in N and E directions than that based on PPP technology. Therefore, it is suggested to adopt the result of net adjustment technique when establishing the regional reference frame of Beidou

Key Words: International Terrestrial Reference Frame, Beidou Reference Frame, PPP, net adjustment technology, time series analysis

目 录

摘 要	I
Abstract	V
目 录	IX
第 1 章 引言	1
1.1 研究背景和选题意义	1
1.1.1 四种空间大地测量技术	1
1.1.2 选题意义	7
1.2 国内外研究现状	8
1.2.1 国际地球参考框架	8
1.2.2 IGS 参考框架	9
1.2.3 区域参考框架	10
1.3 本文研究内容	11
第 2 章 地球参考框架基础理论	13
2.1 最小二乘估计理论	13
2.1.1 Gauss-Markov 模型	13
2.1.2 Kalman 滤波	15
2.1.3 线性参数变换	15
2.1.4 参数预消除	16
2.1.5 法方程叠加	16
2.1.6 参数约束	17
2.2 地球参考框架的建立	20
2.2.1 国际地球参考框架的定义	20
2.2.2 国际地球参考框架的综合理论	22
2.2.3 国际地球参考框架的建立	26
2.3 本章小结	38
第 3 章 国际地球参考框架的精度分析	39
3.1 三种国际地球参考框架与 IGS 解的比较	40
3.1.1 三种国际地球参考框架的介绍	40
3.1.2 IGS 解的介绍	41
3.1.3 选定的 GNSS 测站网	42

3.1.4 ITRF2014 与 IGS 的比较	43
3.1.5 DTRF2014 与 IGS 比较	48
3.1.6 JTRF2014 与 IGS 比较	50
3.2 IGS 各分析中心解与 ITRF2014 的比较	54
3.3 本章小结	57
第 4 章 坐标时间序列分析	59
4.1 坐标时间序列的基本模型	59
4.2 基于精密单点定位技术的测站坐标时间序列	60
4.2.1 精密单点定位的函数模型	61
4.2.2 软件介绍	62
4.2.3 数据介绍	63
4.2.4 一致性分析	64
4.3 坐标时间序列模型应用	65
4.3.1 速度场	65
4.3.2 周期信号	67
4.4 GNSS 时间序列噪声特性分析	69
4.4.1 功率谱分析	70
4.5 时间序列空间域噪声分析	71
4.6 本章小结	74
第 5 章 北斗参考框架的建立与维持	77
5.1 北斗参考框架现状	77
5.2 北斗卫星导航系统	78
5.2.1 北斗卫星星座	78
5.2.2 北斗坐标系	79
5.3 北斗全球参考框架分析	80
5.3.1 数据和产品介绍	80
5.3.2 基于精密单点定位技术的北斗参考框架	80
5.3.3 基于网平差技术的北斗参考框架	91
5.4 北斗区域参考框架初探	103
5.4.1 可靠性分析	103
5.4.2 一致性分析	107
5.4.3 速度场	109

5.5 本章小结.....	112
第 6 章 总结和展望	115
6.1 本文主要工作总结.....	115
6.2 进一步工作展望.....	118
参考文献.....	119
图片汇总.....	127
表格汇总.....	131
致 谢.....	133
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果.....	135

第1章 引言

1.1 研究背景和选题意义

固体地球及其表面流体以及其周围大气组成了完整意义上的地球。而这个地球受地球物理过程，人类活动等的影响，它不是一成不变相对静止的，而是相对运动的。除地球自转和公转外，地球运动状态的主要表现形式为板块运动，同震和震后形变，地球物理流体力学，以及冰川融化等。为探究和量化地球系统在空间和时间上的变化，地球观测就变得至关重要。随着空间大地测量技术的发展成熟，地球表面位置的精确获取已成为可能。国际地球自转服务组织（International Earth Rotation and Reference System Service, IERS）决议定义了地球参考系统（International Terrestrial Reference System, ITRS），为地球科学的研究提供了参考基准。目前公认权威的地球参考系统为国际地球参考框架（International Terrestrial Reference Frame, ITRF），它是 ITRS 的实现，它的建立为研究地球科学以及精确确定人造地球卫星的轨道提供了准确、长期稳定的全球地球参考框架。国际地球参考框架的建立由四种空间大地测量技术综合完成，包括星载多普勒定轨定位系统（Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite, DORIS）、全球卫星导航定位系统（Global Navigation Satellite Systems, GNSS）、卫星激光测距（Satellite Laser Ranging, SLR）及甚长基线干涉测量技术（Very Long Baseline Interferometry, VLBI）。由于四种空间大地测量技术都无法提供完整的参考框架定义参数，因此 ITRF 汇集了四种空间大地测量技术的优势，并弥补了它们各自的弱势和系统误差，被证明是当今可用的最精确的参考框架。

1.1.1 四种空间大地测量技术

国际地球参考系的实现是基于 VLBI、SLR、GNSS、DORIS 四种空间大地测量技术的观测。这些技术在国际大地测量协会都有各自的分析中心作为科学服务组织负责监测台站、观测计划、分析、验证和综合观测数据，并生成特定技术的大地测量产品。

1.1.1.1 VLBI

1980 年代，VLBI 在大地测量学和天体测量学中开始发挥着重要的作用

([Sovers 等人, 1998 年](#))。VLBI 是基于对河外射电源发射的信号 (波前) 的观测确定地球上远距离台站的相对位置、确定射电源位置和地球在空间的方向的基本技术。两台具有较大的空间距离的射电望远镜接收同一无线电源的信号, 通过信号的相关性获得信号到达两个台站之间的时间延迟。根据时间延迟, 可以计算出台站之间的几何距离。通过在全球台站网络中同时进行观测, 可以获得各个台站的坐标以及地球定向参数 (Earth orientation parameter, EOP)。VLBI 的基本原理在 [Sovers 等人 \(1998 年\)](#) 和 [Takahashi 等人 \(2000 年\)](#) 中有详细描述。20 世纪 80 年代初, VLBI 技术首次进行大地测量观测。近年来, 测站网得到了大幅扩展, 但主要分布在澳大利亚、新西兰和德国, 目前仍显示出全球分布不均的状态。国际 VLBI 大地测量和天体测量服务 (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS) ([Schlüter 等人, 2007](#)) 为下一代 VLBI 大地测量观测系统定义了一系列标准 (VLBI2010), 以满足实现高精度地球参考框架的要求, 特别是 GGOS 对地球参考框架提出的满足 1mm 精度和 1mm/yr 稳定度的需求。VLBI 提供了以下对实现地球参考系统非常重要的特征:

- 1) VLBI 能够提供高精度确定远距离台站之间的距离。
- 2) VLBI 延迟和延迟率是纯几何观测量, 其中没有包含地球引力场的信息, 因此观测量的获得也不受地球引力场的影响。
- 3) 通过观测河外准恒星射电源可以确定地球在空间中的方向。因此, VLBI 是唯一一种能够直接有助于 ITRS 和 ICRS 实现的技术。
- 4) 通过观测 VLBI 中的标准频段, 能够消除电离层引起的时间延迟误差。
- 5) VLBI 不受轨道相关误差的影响。
- 6) VLBI 提供了长时间的精确观测序列 (约 40 年)。

值得注意的是, VLBI 存在着难以克服的技术缺陷:

- 1) VLBI 是相对测量, 仅利用 VLBI 技术只能测定出两个天线之间的相对位置, 而不能直接测出各天线的地心坐标, 因此对地心是不敏感的。
- 2) 延迟率观测量中不包含基线分量 Z 的影响。所以, 仅由延迟率观测无法解算出基线分量 Z。另外, 将延迟率的数据加到延迟数据中, 并不会减少为求得所有未知参数所需观测的射电源数目。延迟率仅作为辅助观测量参加数据处理和参数解算, 而起决定作用的是延迟观测量。
- 3) VLBI 技术观测数据输出代价极为庞大, 因此无法通过卫星数据传输。

- 4) 受地球大小的限制, 地面 VLBI 的最长基线只能达到 1 万千米。如果想要提升基线长度需要将观测点放到月球或卫星上, 但测量点之间的数据传输无法实现。

用于参考系统实现的 VLBI 观测由 24 小时时段的全球或大面积台站网络实施。IVS 负责 VLBI 观测值的相关性和分析, 不同分析中心获得的结果的比较和综合, 以及最终 VLBI 产品的生成。

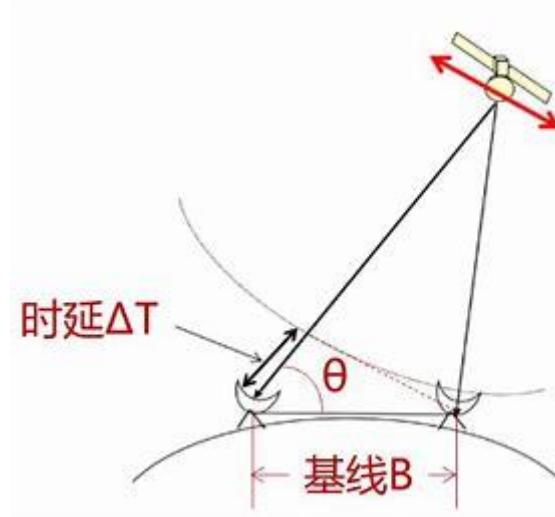


图 1.1 VLBI 测量原理示意图¹

1.1.1.2 SLR

卫星激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR) 是一种光学观测技术。利用安置在地面上的卫星激光测距系统所发射的激光脉冲, 跟踪观测装有激光反射棱镜的人造地球卫星, 以测定测站到卫星之间的距离的技术和方法。经典的 SLR 卫星是被动球形卫星, 其表面被反射器完全覆盖。今天, 大多数遥感卫星以及全球导航卫星系统卫星都装载了激光反射器, 因为 SLR 是确定和验证卫星轨道的最重要技术之一。通过对全球 SLR 台站网络的观测, 可精确测定地面测站的地心坐标、长达几千千米的基线长度、卫星的精确轨道参数、地球自转参数、地心引力常数、地球重力场球谐系数、潮汐参数以及板块运动和地壳升降速率等。SLR 是通过对球面卫星的观测, 特别是对 Lageos 1 和 2 卫星的观测实现地球参考系统。首次 SLR 观测发生在 20 世纪 80 年代初。Seeber (2013 年) 给出了 SLR 技术的详细描述。SLR 在参考坐标系计算方面的独特特点是:

¹ <http://uploadimg2.moore.ren/images/news/2020-08-26/150714.jpg>

- 1) SLR 是一种非差分观测技术。观测到的时间延迟仅由一个时钟测量，因此不受时钟同步错误的影响。
- 2) SLR 是一种光学技术，因此不像微波技术那样受大气中水汽的影响。这是至关重要的，因为信号要经过大气两次。中性大气中的干延迟部分造成的时间延迟可以被很好地建模，并且与微波技术相比，对流层参数（通常与台站高度高度相关）不需要估计。
- 3) 作用在球状卫星上的外部扰动力能够被高精度地建模。
- 4) 由于大多数卫星具有仅为 700-5900 公里的低轨道高度，因此 SLR 对地球重力场非常敏感。因此，SLR 观测被用于实现地球参考系的原点。

SLR 技术的一个缺点是，只有在非阴天的情况下才能进行观测。国际激光测距服务机构 (International Laser Ranging Service, ILRS) (Pearlman 等人, 2002 年) 负责制定 SLR 观测计划、分析观测数据以及计算和推广最终的 SLR 产品。对 SLR 观测的实施是连续进行的。每周对观测结果进行分析，并估计每周卫星轨道和台站位置以及每天的 EOP。

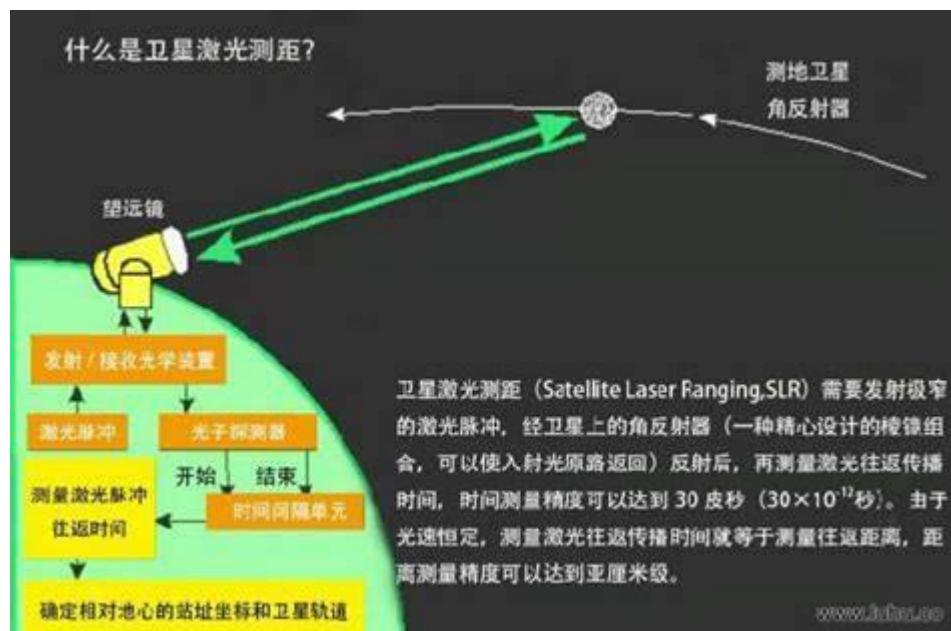


图 1.2 卫星激光测距原理图²

1.1.1.3 GNSS

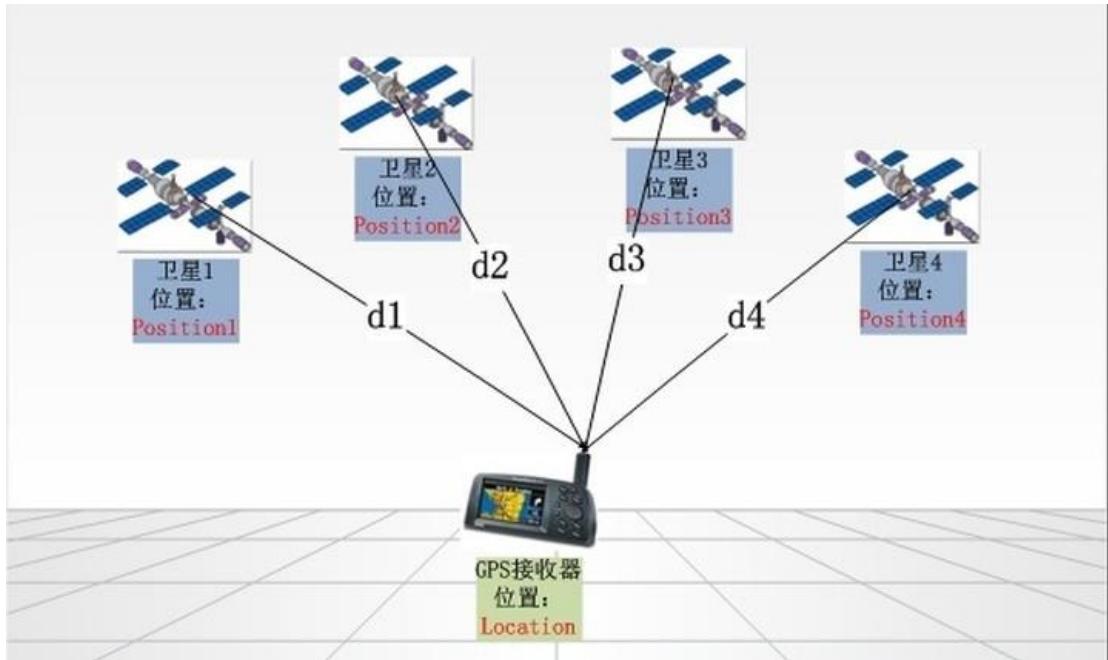
目前提供全球导航定位服务的全球导航卫星系统包括，美国的 GPS，俄罗斯

² <https://tse2-mm.cn.bing.net/th/id/OIP-C.0UQEmBgeUOOH0mK7BF7wbwHaE6?pid=ImgDet&rs=1>

的 GLONASS 系统、中国的 Beidou 系统和欧洲的 Galileo 系统。以 GPS 系统为例，24 颗卫星在 6 个轨道平面上绕地球运行，这保证了在任何时候都可以在地球表面的每个位置（或接近地球表面的位置）进行定位。该系统于 1998 年完成。第一次 GPS 大地测量观测是在 20 世纪 80 年代末进行的。卫星发射两种微波载波信号，对其编码信息进行调制。精确的 GNSS 大地测量接收机可以非常精确地测量到达载波信号的相位。接收机接收由卫星发射而来的载波信号，通过对载波相位的精密确定和模糊度整周数的恢复，以及来自于卫星端，接收机端，以及大气延迟误差的改正或者建模，可以精确获得接收机的位置。台站分布全球的测站网允许轨道、台站位置和 EOP 参数中极移和 LOD 的精确确定。GPS 技术的详细描述，可以在许多参考书中找到，例如 [Teunissen 和 Kleusberg \(1998 年\)](#)。全球导航卫星系统的优点是：

- 1) 由永久性 GNSS 站组成的全球 IGS 网络提供了大量精确的观测数据。因此，GNSS 获得的大地测量参数的精度非常高。
- 2) 与 VLBI 或 SLR 仪器相比，GNSS 站的建造成本较低。因此，GNSS 网络的全球覆盖和密度非常好，在全球范围内的分布比 VLBI 和 SLR 网络更均匀。
- 3) 通过对两个不同频率的 GNSS 信号的观测，可以对信号经过电离层折射的时间进行修正。
- 4) 对于不同技术的结合，并置站（两种或两种以上技术共同观察的地点观测的台站）的存在是非常重要的。大多数并置站都安装了 GNSS 站，便于与其他技术的高精度组合。

国际全球导航卫星系统服务机构 (International GNSS Service, IGS) ([Dow 等, 2009](#)) 负责监测观测站的质量，并分析 GNSS 观测结果和生成 GNSS 产品。GNSS 的观测是连续进行的，每周分析一次，近年来也每天分析一次。

图 1.3 GNSS 定位原理图³

1.1.1.4 DORIS

DORIS 和 GNSS 一样, 是一种双频微波卫星观测技术。地面天线(信标)发送 DORIS 卫星接收到的信号, 观测到由地面站和卫星的相对速度使得信号发生的频移(多普勒效应)。根据卫星通过时频移的变化, 可以得到地面站的位置信息。通过观测三颗以上经过的卫星, 可以计算出地面站的位置。利用 DORIS 站的全球分布网络, 可以确定台站的位置、卫星轨道和 EOP 参数中的极移和 LOD。许多地球观测卫星都装载 DORIS 接收器, 因为 DORIS 是除 SLR 外用于轨道确定的最重要的技术之一。Willis 等人([2005, 2012](#))对 DORIS 技术作了详细的描述。1993 年第一次进行了 DORIS 大地观测。今天, DORIS 卫星的数量增加到可以同时观测到六颗卫星。DORIS 的独特特点是:

- 1) 由于 DORIS 能够产生和传输信号, 因此它们只需要电力供应, 测站间的网络连接是不需要的。使用独立的电源(太阳能电池板或风力涡轮机和电池)使得该类台站广泛实现自动化, 同时也可以安装在偏远地区。因此, DORIS 测站网在全球的分布非常均匀。
- 2) 均匀的台站分布能够确保最佳的观测几何形状。
- 3) 观测两个不同频率的信号, 可以消除电离层引起的折射效应。

³ https://pic1.zhimimg.com/v2-1ef23c46ec9c93f4762751bb7eacf68_r.jpg

4) DORIS 在遥感卫星定轨中起着重要的作用。

国际 DORIS 服务(International DORIS Service, IDS) (Willis 等, 2010) 负责 DORIS 观测分析和产品生成。像其他卫星技术一样, DORIS 的观测是连续进行的, 数据分析每周进行一次。

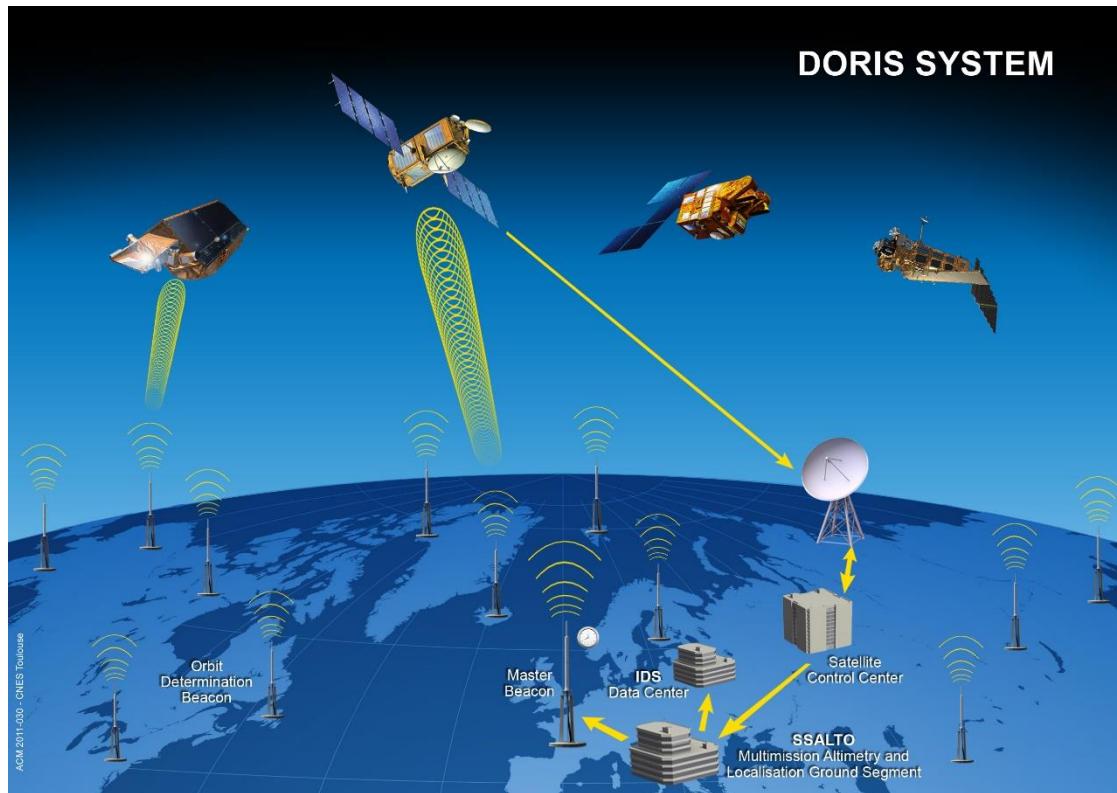


图 1.4 DORIS 系统观测示意图⁴

1.1.2 选题意义

地球参考框架不仅在测绘学科领域内为经典大地测量和现代卫星导航与定位等工作提供重要的点位参考基准, 同时也在天体测量、板块运动、地壳形变监测、地震监测、地球动力学研究、全球平均和区域海平面变化、陆地水或冰川变化等方面得到了广泛的应用。目前所建立的参考框架还有局限性:

由历史观测数据可以知道, 在测站坐标的时间序列中除线性信号外, 非线性信号也很明显。而测站的非线性运动在 ITRF 的测站坐标中没有得到表达, 这也意味着 ITRF 所指示的原点只是地球质心运动的线性近似。多数地球科学和大地测量应用都可以利用 ITRF 这一类线性参考框架实现。而卫星精密定轨等一些应用地球参考框架提出了更高的要求。因此, 非线性参考框架应运而生。最具代表

⁴ https://www.cls.fr/wp-content/uploads/r9_9_shema_doris.jpg

性的非线性参考框架是由 JPL 建立的 JTRF2014。它是基于时间序列表示的参考框架, 其原点和尺度都在一定程度上代表了历元意义上的参考框架。但遗憾的是, 参与框架建立的四种空间大地测量技术的测站坐标时间序列中都包含了与技术本身相关的系统性误差。其中, GNSS 测站坐标的时间序列中的非线性运动包含真实的地球物理运动 (Ray 等, 2011; Xu 等, 2017; Rebischung 等, 2018), 由模型误差导致的交点年信号 (Ray 等, 2008), 以及区域地面变形等未解释的变化。相比 GNSS, 其他三种技术的测站坐标时间序列的噪声较大, 因此非线性信号也更难刻画。与技术相关的系统性误差不仅包含在测站坐标时间序列中, 也体现在由相关技术确定的地心运动和尺度变化中。就目前而言, SLR 技术确定的非线性地心运动最为可信, 但也受测站网络分布的限制难逃系统性误差的嫌疑。此外, SLR 确定的尺度受测站距离偏差的影响很大 (Appleby 等, 2016), VLBI 确定尺度时未考虑天线受温度和重力的影响会产生变形等因素, 因此 VLBI 确定的尺度也不准确 (Sarti 等, 2009, 2010; Gipson, 2018)。

本文的选题意义在于, 基于各空间大地测量技术在参考框架建立时所扮演的角色和技术本身存在的不足之处和局限性, 探讨综合理论和方法的局限性, 并对已有参考框架展开研究和分析。另外, 通过对测站坐标时间序列进行分析, 为地球参考框架的建立提供更有效的坐标输入。基于北斗卫星导航系统对区域参考框架的精度进行分析和评估, 为国内区域框架的建立提供有意义的参考。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国际地球参考框架

前文已经提到过, ITRF 的实现是基于 VLBI、SLR、GNSS、DORIS 四种空间大地测量技术通过技术内综合和技术间综合得到。GPS 观测数据和 DORIS 观测数据分别于 1991 年、1994 年起加入 ITRF 框架的解算。各个技术的观测数据首先由各自的技术中心-IVS、ILRS、IGS 和 IDS 进行多个分析中心解的综合处理得到一个当前研究水平下的最优解, 最后提交到 IERS 的分析中心进行多技术综合得到 ITRF 的最终解。自 1988 年起, IERS 已经发布了累计 13 个版本的参考框架, 其中最早的是 ITRF1988, 最具代表性的是 ITRF2005。ITRF2005 是由 IGN (Institut Géographique National) 于 2006 年正式发布, 首次采用站坐标时间序列作为输入数据, 通过综合给出了框架点的位置和速度, 以及与参考框架一致的地

球定向参数 (Altamimi 等, 2007 年)。ITRF2008 的解算策略与 ITRF2005 基本一致 (Altamimi 等, 2011 年), 因此不再赘述。最新的版本 ITRF2014 于 2016 年发布, 参考历元为 J2010.0。相较 ITRF2008, ITRF2014 除增加 5 年的观测数据长度外, 在综合策略上也有所创新, 主要有两点 (Altamimi 等, 2016 年): 1) 对测站坐标时间序列的非线性信号 (周年和半年项) 进行估计; 2) 对受地震影响的测站利用震后形变模型 (Postseismic Deformation Models, PSD) 进行拟合。由于采用了最先进的改进模型和方法, 框架解的精度也得到进一步的提升。ITRF2014 的原点的长期稳定性小于 3mm; 尺度的稳定性小于 1.4ppb (在赤道面上约等于 8.7mm)。

根据《IRES Conventions 2010》中的决议, ITRS 的定义的原点是地球的质量中心; 尺度是米, 由相应的相对论模型得到; 方向初始值采用国际时间局 (BIH) 给出的 1984.0 的方向, 定向随时间的演变采用相对于整体地球的水平板块运动无整体旋转的条件 (Petit 等, 2010)。ITRS 的定义在理论上是理想的, 但真正实现完全符合 ITRS 定义的参考框架是十分困难的。尽管 ITRF2014 的框架点的位置和速度的精度, 原点和尺度的精度相较于历史参考框架都有显著提升。但 ITRF2014 实现的原点和尺度受技术因素等的限制, 目前只能达到毫米级的精度水平。要达到 GGOS (Global Geodetic Observing System) 要求的 1mm 精度水平和 0.1mm/yr 的稳定度还有很大的差距 (Gross 等, 2009; Altamimi 等, 2008)。

ITRF 是由 IGN 负责维持的官方 ITRF 解。另外两个 ITRS 的综合中心, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI) an der Technischen Universität München (TUM) (Seitz 等, 2012) 和 Jet Propulsion Laboratory (JPL) (Wu 等, 2015), 利用与 ITRF 相同的输入数据, 采用不同于 ITRF 的综合策略建立了另外两个高精度的全球参考框架, 分别为 DTRF 和 JTRF。DTRF 和 ITRF 同为利用一组框架点在参考历元的坐标和速度表示的线性参考框架。而 JTRF 是非线性参考框架, 是基于时间序列的一组框架点坐标表示的参考框架 (Abbondanza 等, 2017)。

1.2.2 IGS 参考框架

国际 GNSS 服务 (IGS) 是由 80 多个国家的 200 多个组织自愿合作组成。由 300 多个永久、持续运行的 GPS 站组成的 IGS 全球跟踪网络为 IGS 分析中心提供着丰富的数据集, 根据成熟的数据处理理论进而生成卫星星历和钟差等精密产

品。目前，多达 8 个 IGS 分析中心每天为 IGS 组合提供超快速、快速和最终 GPS 轨道和钟差解。IGS 提供的厘米精度的精密轨道和钟差产品，是以与最新的 ITRF 同期的 IGS 参考框架为基准进行解算的。为与 ITRF 保持一致，IGS 在 ITRF 发布之后也相应更新了与 ITRF 原点，方向和尺度一致的参考框架。目前已经发布的有 IGS97、IGS00、IGS00b、IGS05、IGS08、IGb08、IGS14 和 IGb14，其中 IGS00b、IGb08、IGb14 分别为 IGS00、IGS08、IGS14 的更新。

IGS 参考框架是仅由 GNSS 站表示的与 ITRF 的原点和方向相一致的参考框架。其表达形式为一组经过接收机天线相位中心改正的 ITRF 站坐标 (Rebischung 等, 2012) 和速度。以 IGS14 为例，首先选取一组 ITRF2014 框架内全球分布良好、稳定的 GNSS 站，然后对 GNSS 站坐标进行天线相位中心改正的更新。进行天线相位中心改正更新的原因是，ITRF2014 的测站坐标与 igs08.atx 中天线相位中心纠正一致，IGS14 的测站坐标需要与 igs14.atx 中的天线相位中心改正一致。研究表明，天线校正的更新在坐标轴的任一方向上都超过 1mm，因此这一改正不可忽视。IGS 参考框架的实现情况见表 1.1⁵。

表 1.1 IGS 参考框架的实现情况

参考框架	参考站个数	使用日期
IGS97	51	2000 年 6 月 4 日-2001 年 12 月 1 日
IGS00	54	2001 年 12 月 2 日-2004 年 1 月 10 日
IGS00b	99	2004 年 1 月 11 日-2006 年 11 月 4 日
IGS05	132	2006 年 11 月 5 日-2011 年 4 月 16 日
IGS08	232	2011 年 4 月 17 日-2012 年 10 月 6 日
IGb08	283	2012 年 10 月 7 日-2017 年 01 月 28 日
IGS14	252	2017 年 1 月 29 日-2020 年 5 月 16 日
IGb14	261	2020 年 5 月 17 日至今

1.2.3 区域参考框架

尽管 ITRF 是国际上最权威、精度最高的全球参考框架，但 ITRF 网测站数目有限，分布较为稀疏，且受地域条件的影响，导致测站在全球的分布并不均匀。部分用户对于测站网的分布和密度提出了更高的要求，以便于展开城市测绘等建

⁵ <http://acc.igs.org/igs-frames.html>

设性服务。因此,一些国家和地区相继组织建立了各自的区域参考框架,如:欧洲的 EUREF、非洲的 AFREF、南美洲的 SIRGAS 和北美的 SNARF,以及中国的 CGCS2000,这些参考框架的实现大致类似。

以 EUREF 为例, EUREF 是由整个欧洲大陆分布的 GNSS 连续观测站所建立的区域参考框架 (Carine 等, 2019)。EUREF 同时是 IAG 参考框架欧洲小组委员会联合下属的区域参考框架小组委员会, EUREF 负责处理欧洲区域参考框架的定义、实现与维持问题。由 EUREF 维持的参考框架已经发布了 ETRF89、ETRF90、ETRF91、ETRF92、ETRF93、ETRF94、ETRF96、ETRF97、ETRF2000、ETRF2005 和 ETRF2014 共 11 个版本, ETRF2014 的框架定义参数与 ITRF2014 一致。

我国的 CGCS2000 是以 ITRF1997 为参考基准通过陆太网加密在中国区域内建立的区域性地球参考框架,该框架也在不断地更新。蒋志浩 (2019), 成英燕等人 (2017) 对 CGCS2000 参考框架的维持和更新方法进行了研究。

1.3 本文研究内容

本文以建立高精度地球参考框架的终极目标为导向,首先阐述建立地球参考框架的基本原理,以及各空间大地测量技术在参考框架建立时所扮演的角色和技术本身存在的不足之处和局限性;分析综合理论和方法的局限性,并对已有参考框架展开研究和分析。另外,通过对测站坐标时间序列进行分析,以及对坐标残差时间序列的噪声特性进行分析和区域空间滤波。在北斗卫星导航系统的自主运控的背景下,建立了基于 BDS-3 数据的全球和区域参考框架,并对其可靠性和速度场精度进行分析和评估。本文的研究内容具体安排如下:

第一章,阐述了论文的研究背景和选题意义,系统介绍了国际地球参考框架、IGS 参考框架和区域参考框架的研究现状。

第二章,论述了建立地球参考框架时涉及的数据处理理论,总结了国际地球参考框架的定义、综合理论和具体实现流程。

第三章,以框架对准后的 IGS 解为参考基准,分析了国际地球参考框架 ITRF2014 和 DTRF2014 在确定期和预报期的精度变化,以及 JTRF2014 与 IGS 解相比存在的差异。

第四章,通过对测站坐标时间序列构建恰当的数学模型,利用最小二乘估计

出最优的拟合参数，并以估计的速度、周期项和残差项为研究对象，分析了基于精密单点定位技术确定的速度场精度和周期项与 IGS 解的差异，利用功率谱分析方法明确了残差项的噪声特性。此外，利用主成分分析法研究了第一主成分指示的共模误差在区域网残差坐标时间序列中的贡献。

第五章，在目前北斗三号卫星导航系统(BDS-3)数据长度有限的背景下，分别基于精密单点定位技术和网平差技术建立了全球和区域地球参考框架，并对建立的全球和区域参考框架的可靠性和速度场精度进行了评估。

第六章，对论文中的研究工作和结果进行了总结，并针对论文存在的不足之处提出了进一步工作的展望。

图 1.5 为本文中各章研究内容之间的关系图。

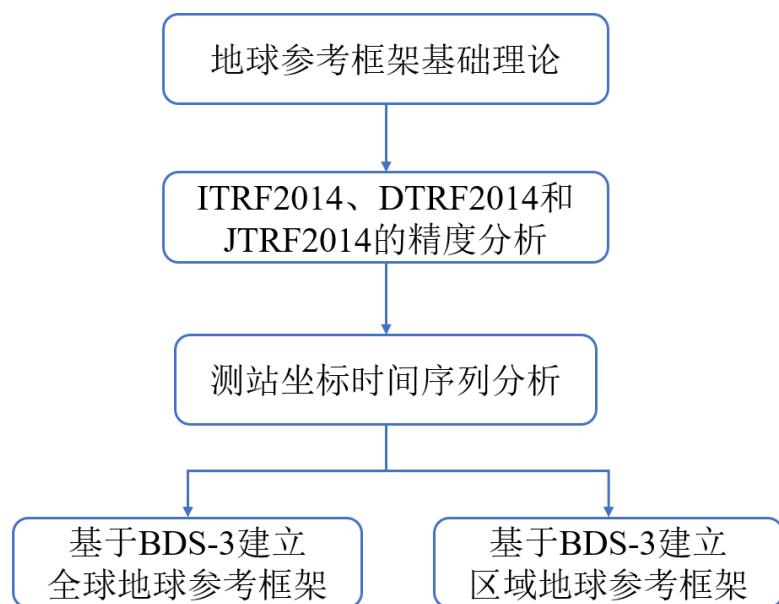


图 1.5 论文架构图

第2章 地球参考框架基础理论

由 IERS 定义的地球参考系是理想的，难以通过实测资料完成。因此，科学家们为逼近地球参考系这一定义，提出了地球参考框架的概念。如前文所述，地球参考框架是利用 SLR、VLBI、GNSS 和 DORIS 四种空间大地测量技术，根据一定的综合理论实现的由一组在地球表面分布良好的框架点在某一参考历元的坐标和速度表示的参考框架。因此，地球参考框架是地球参考系的实现，也是地球参考系的具体应用形式。本章中介绍了实现地球参考框架时涉及的数据处理理论；阐述了国际地球参考框架的定义、综合理论和建立步骤。

2.1 最小二乘估计理论

建立地球参考框架的几个关键步骤（生成技术解、技术内综合以及技术间综合）都离不开对空间大地测量数据的处理，进行数据处理时广泛使用的参数估计理论为最小二乘估计理论。由于观测值误差的存在，在建立的观测方程中常常需要引入一个误差向量来弥补观测值与真值之间的差异。由此产生的参数最优估计方法是数据处理中最关键的问题。常用的数据处理算法包括最小二乘估计和卡尔曼滤波。最小二乘估计是根据最小二乘准则，即误差向量的平方和最小，求解的最优估计；卡尔曼滤波是基于最小二乘估计递归地估计动态系统的状态。

2.1.1 Gauss-Markov 模型

一般来讲，一组未知参数 x 由一组相互独立的测量观测值 \hat{o} 进行估计。每个测量观测值表示为未知参数的函数：

$$\hat{o} = f(x) \quad (2-1)$$

由于测量观测值是一种随机变量，它不仅要考虑描述已知观测量与未知参数之间的函数模型，还要考虑随机模型。因此实际应用中，在观测值向量中引入一个表征观测值误差的向量 v ，以符合实际情况：

$$\hat{o} = o + v = f(x) \quad (2-2)$$

式(2-2)就是我们所熟知的观测方程。在多数情况下待估参数 x 的函数 $f(x)$ 是非线性的。但 Gauss-Markov 模型要求函数 $f(x)$ 为线性关系式。式(2-2)的线性化是对未知参数的先验值 x_0 的一阶泰勒级数展开。一阶泰勒级数展开的系数矩阵 A

为所谓的雅可比矩阵或者设计矩阵, Δx 为未知参数的改正值。式(2-2)线性化后的表达式为:

$$o + v = f(x_0) + \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x=x_0} \cdot \Delta x \quad (2-3)$$

$$o + v = f(x_0) + A \cdot \Delta x \quad (2-4)$$

引入向量 l

$$l = o - f(x_0) \quad (2-5)$$

至此, 可以将方程(2-3)写作误差方程:

$$v = A \cdot \Delta x - l \quad (2-6)$$

为求得待估参数的最佳估计值, 假定观测值误差是随机的, 最小二乘准则, 要求误差的平方和最小, 也即:

$$v^T P v \rightarrow \min \quad (2-7)$$

式中, 矩阵 P 为由观测值标准差 σ_i 和先验标准差 σ_0 表示的对角矩阵。矩阵 P 的主对角元素定义为:

$$P(i, i) = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_i}\right)^2 \quad (2-8)$$

根据式(2-7)中最小二乘理论的要求, 得到法方程:

$$A^T P A \cdot \Delta x = A^T P l \quad (2-9)$$

令,

$$N = A^T P A \quad (2-10)$$

$$b = A^T P l \quad (2-11)$$

未知参数的改正量可以通过法方程(2-9)进行解算:

$$\Delta x = N^{-1} \cdot b \quad (2-12)$$

未知参数的最终解为:

$$x = x_0 + \Delta x \quad (2-13)$$

验后残差的单位权可以写作:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{v^T P v}{n-u} \quad (2-14)$$

根据误差传播理论, 待估参数的协方差阵为:

$$Q_{xx} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot N^{-1} \quad (2-15)$$

在线性化时, 使用的先验值 x_0 必须足够接近真值才能确保近似值的一阶泰勒级数展开是正确的。如果无法保证这一点, 则需要在后续计算时使用估计参数作为新的先验值进行迭代。

2.1.2 Kalman 滤波

Kalman 滤波是一种递归的优化算法，它在观测数据和状态联合服从高斯分布时，根据线性系统的状态方程，分析带有噪声和扰动的输入数据对系统的状态进行更新和最优估计。经典的 Kalman 滤波包括状态方程和观测方程。状态方程是在参数空间，描述了状态向量在相邻时刻的线性化的动态变化规律；观测方程是在数据空间，给出了观测向量和状态向量之间的解析关系（董大南等，2018）。

假定观测方程(2-4)中的观测噪声和状态扰动噪声相互独立且均为白噪声。那么由 n-1 时刻到 n 时刻的状态转移预测方程为：

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}^-(n) &= \Phi(n-1)\hat{\mathbf{x}}^-(n-1) \\ \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- &= \Phi(n-1)\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n-1)}^-\Phi^T(n-1) + \mathbf{Q}(n-1)\end{aligned}\quad (2-16)$$

式中 Φ 为参数状态转移矩阵， \mathbf{Q} 为过程噪声矩阵，通过 \mathbf{Q} 可以在观测方程中增加先验信息和未被模型化的误差。

预测模型和历元 n 的观测模型为：

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}^-(n) \\ \mathbf{y}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{G}(n) \end{bmatrix} \mathbf{x}(n), \quad \mathbf{P}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}(n) \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

上式的最小二乘解为：

$$\begin{aligned}\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- &= \left[\left(\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \right)^{-1} + \mathbf{G}^T(n) \mathbf{R}^{-1}(n) \mathbf{G}(n) \right]^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}(n) &= \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \left[\left(\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \right)^{-1} \hat{\mathbf{x}}^-(n) + \mathbf{G}^T(n) \mathbf{R}^{-1}(n) \mathbf{y}(n) \right]\end{aligned}\quad (2-18)$$

而传统的 Kalman 滤波的公式为：

$$\begin{aligned}\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}(n)\mathbf{G}(n)]\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \\ \hat{\mathbf{x}}(n) &= \hat{\mathbf{x}}^-(n) + \mathbf{K}(n)[\mathbf{y}(n) - \mathbf{G}(n)\hat{\mathbf{x}}^-(n)]\end{aligned}\quad (2-19)$$

其中 $\mathbf{K}(n)$ 为 Kalman 滤波的增益矩阵。

$$\mathbf{K}(n) = \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \mathbf{G}^T(n) [\mathbf{G}(n) \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}(n)}^- \mathbf{G}(n)^T + \mathbf{R}(n)]^{-1} \quad (2-20)$$

2.1.3 线性参数变换

对于一组旧的参数和新的参数之间的线性转换，它们之间的线性关系必须是已知的

$$x = C \cdot y + c \quad (2-21)$$

在误差方程和法方程中，如果(2-21)被旧的参数 x 和改正值 Δx 替换。变换结果通过推导得到：

$$N_{new} = C^T N_{old} C \quad (2-22)$$

$$b_{new} = C^T \cdot (b_{old} - N_{old} \cdot C) \quad (2-23)$$

$$l_{new} = l_{old} - A \cdot c \quad (2-24)$$

2.1.4 参数预消除

空间大地测量学中有几种类型的参数需要估计,但其值仅对某些特殊研究有意义。GPS 相位模糊度或时钟参数就是此类参数类型的示例。此外,如果用户只对一类参数感兴趣,那么在估计它们之后,通过参数预消除使得法方程矩阵变小,在后续的处理中不再估计对预期应用不感兴趣的参数。值得一提的是,部分参数是隐式估计的,尽管它们被预先消除。因此,必须在不估计这些参数的情况下,将这种方法与参数调整明确区分开来。预消除算法将法方程划分为两部分: x_1 包括将保留的参数, x_2 包括将预消除的参数。相应的法方程组如下所示:

$$\begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

或者分解为两部分:

$$N_{11} \cdot x_1 + N_{12} \cdot x_2 = b_1 \quad (2-26)$$

$$N_{21} \cdot x_1 + N_{22} \cdot x_2 = b_2 \quad (2-27)$$

求解第二个方程中的 x_2 , 并将结果表达式引入第一个方程中, 得到参数 x_2 被预先消除的法方程:

$$(N_{11} - N_{12} N_{22}^{-1} N_{21}) \cdot x_1 = b_1 - N_{12} N_{22}^{-1} \cdot b_2 \quad (2-28)$$

最后, 约化法方程可以用下式表示:

$$N_{reduc} = N_{11} - N_{12} N_{22}^{-1} N_{21} \quad (2-29)$$

$$b_{reduc} = b_1 - N_{12} N_{22}^{-1} \cdot b_2 \quad (2-30)$$

2.1.5 法方程叠加

综合法方程的基本操作是法方程叠加。法方程叠加意味着正确处理多个法方程的公共参数: 至少有一个相同的参数包含在至少两个法方程中, 并且在最后综合的法方程中用同一个参数去表达。这一过程也被称为“赫尔默特分区法”(Helmert, 1872)。Brockmann (1997) 已经证明, 如果不同的观测序列是独立的, 序贯最小二乘平差与普通平差一步运算得到的结果相同。此处省略了二者的等价性证明, 仅简要概述综合两个观测序列所需的形式体系。

从式(2-6)的两组误差观测方程出发, 确定同一组未知参数 x , 在两组观测方

程之间没有相关性的假设下，综合的雅可比矩阵 A 和权矩阵 P 将表示为：

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

经过简单的计算之后，相应的法方程可以写作：

$$(A_1^T P_1 A_1 + A_2^T P_2 A_2) \cdot x = A_1^T P_1 l_1 + A_2^T P_2 l_2 \quad (2-32)$$

在两步法的情况下，首先将两个观测方程组独立地转化两个法方程：

$$A_1^T P_1 A_1 \cdot x = A_1^T P_1 l_1 \quad (2-33)$$

$$A_2^T P_2 A_2 \cdot x = A_2^T P_2 l_2 \quad (2-34)$$

通常，在第二步中，用户不再访问矩阵 A, P 和向量 l 。而相应的法方程矩阵 N_1, N_2 和法方程右手边的向量 b_1, b_2 是可以访问的：

$$N_1 = A_1^T P_1 A_1, \quad b_1 = A_1^T P_1 l_1 \quad (2-35)$$

$$N_2 = A_2^T P_2 A_2, \quad b_2 = A_2^T P_2 l_2 \quad (2-36)$$

比较方程(2-35)和(2-36)与(2-32)，很明显，对于公共参数 x 的综合解，只需要对两个法方程矩阵和右边的向量分别求和：

$$(N_1 + N_2) \cdot x = b_1 + b_2 \quad (2-37)$$

2.1.6 参数约束

在大多数情况下，可用的观测方程并不包含获得解所需的所有信息。这意味着法方程组(2-9)是奇异的或几乎是奇异的。这种情况下，法方程矩阵不可逆，因此不能得到未知参数的解 x 。为了解决这个问题，必须在原有的观测方程中加入关于未知参数的外部附加信息，即所谓的约束，以弥补秩亏的问题。约束的加入可以通过不同的方式来实现。经典的增加约束的方法，被称为“带有约束/附加条件的高斯-马尔科夫模型”(参见 Ebner, 1997 或 Koch, 1988)，要求待估参数精确地满足附加条件。在大地测量应用的情况下，往往是不希望这种强约束存在的，因为会导致参数没有自由度。此外，在许多情况下，引入的附加信息不一定准确，因此，它会降低而不是提高参数的估计精度。通过伪观测方程进行约束可以避免这两个缺点。虚拟观测方程与“真实”观测方程(2-6)相似：

$$v_h = H \cdot x + h \quad (2-38)$$

约束方程的权矩阵是根据伪观测方程的已知方差 $\sigma_{h(i)}^2$ 建立的，并以与“真实”观测方程相同的方式用先验方差因子 σ_0^2 进行缩放，即：

$$P_h(i, i) = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{h(i)}^2} \quad (2-39)$$

当然, 如果伪观测值方程之间的相关性已知, 则可能存在更复杂的约束 (权矩阵 P_h 为一个全矩阵而非对角矩阵)。伪观测方程同样也产生一个法方程:

$$H^T P_h H \cdot x = H^T P_h \cdot h \quad (2-40)$$

结合原始的法方程得到:

$$(A^T P A + H^T P_h H) \cdot x = A^T P l + H^T P_h \cdot h \quad (2-41)$$

[Brockmann \(1997\)](#) 指出, 通过增加虚拟观测值的权重, 将引入虚拟观测方程作为约束条件的方法可以转化为具有强约束的Gauss-Markov模型。因此, 从非常宽松的约束条件到强约束条件的过渡成为可能。

2.1.6.1 绝对约束

如果待估参数 x 的“理想”值 w 已知, 且待估参数 x 的估计值应用这些值理想值作为约束。由此可以建立伪观测方程:

$$v_h = x - w \quad (2-42)$$

法方程(2-41)可以简化为:

$$(A^T P A + P_h) \cdot x = A^T P l + P_h \cdot w \quad (2-43)$$

式(2-42)的一个特殊应用是约束参数的先验值, 因为在这种情况下, 加到法方程矩阵中的权矩阵 P_h 是非常关键的。

2.1.6.2 最小约束

自由网约束 (也即最小约束) 的方法提供了将估计的网解与先验参考框架对齐的可能性。用Helmert变换可以描述二者之间的关系。利用坐标估计值 $\mathbf{X}_i = [X, Y, Z]$ 和参考坐标 $\mathbf{X}_{0,i} = [X_0, Y_0, Z_0]$, 可以对测站网中的每个站*i*进行Helmert变换:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = (1 + \mu) \cdot \begin{bmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} \quad (2-44)$$

其中, T_X , T_Y , T_Z 为平移参数; α , β , γ 为旋转参数; μ 为尺度因子。

将(2-44)中的变量重新组合, 并假设变换参数的值为小量, 可以将式(2-44)变换为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -Z_0 & Y_0 & X_0 \\ 0 & 1 & 0 & Z_0 & 0 & -X_0 & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -Y_0 & X_0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \mu \end{bmatrix} \quad (2-45)$$

或用矩阵表示为:

$$X_i = X_{0,i} + B_i \cdot \zeta \quad (2-46)$$

通过对比, 得到了Helmert参数 ζ 向量和单站系数矩阵 B_i 的表达式。把所有对自由网约束有贡献的测站放在一起可以得到:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}, X_0 = \begin{bmatrix} X_{0,1} \\ X_{0,2} \\ \vdots \\ X_{0,n} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \quad (2-47)$$

Helmert参数向量 ζ 的误差方程可以写成:

$$v = B \cdot \zeta - (X - X_0) = B \cdot \zeta - x \quad (2-48)$$

因此, Helmert参数 ζ 的解为:

$$\zeta = (B^T B)^{-1} B^T \cdot x \quad (2-49)$$

自由网约束本身是基于方程(2-49), 并且要求部分Helmert参数的值为零。由此得到自由网约束的观测方程为:

$$\zeta = (B^T B)^{-1} B^T \cdot x = 0 \quad (2-50)$$

对比方程(2-50)与方程(2-38), 可以看出 $h = 0$, 雅可比矩阵 H 为:

$$H = (B^T B)^{-1} B^T \quad (2-51)$$

对于自由网约束, 权矩阵由变换参数的方差组成。最后, 包含自由网约束的法方程形式为:

$$(A^T P A + H^T P_h H) \cdot x = A^T P l \quad (2-52)$$

与绝对约束相比, 应用自由网约束的优点是, 如果只对基准进行约束(如旋转、平移和尺度), 网本身不会变形。最后, 必须提到自由网约束的一个特殊应用。如果只对Helmert参数进行约束, 使其与网某个自由度相对应, 这种约束为最小约束。因此, 在全球VLBI解中, 必须对三个旋转和三个平移参数进行约束, 而对于全球GPS或SLR解, 只需要约束三个旋转参数。如果只考虑三个旋转参数, 则约束称为无整体旋转(NNR)条件。在只约束三个平移参数的情况下, 使用表达式无整体平移(NNT)条件, 而无整体尺度(NNS)条件只约束尺度。

2.1.6.3 相对约束

在某些情况下, 参数 x_i 和参数 x_j 之间的关系是已知的, 充分利用这些附加信息对解参数是非常有帮助的。在观测方程中引入一个约束条件

$$x_i - x_j = w \quad (2-53)$$

相应地, 误差方程为:

$$v = x_i - x_j - w = [1 \quad -1] \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ x_j \end{bmatrix} - w \quad (2-54)$$

其中, x_i 和 x_j 表示两个有关联的参数, w 是关联它们的已知量。设 w 的标准差为 σ_w 。得到的法方程为:

$$\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_w}\right)^2 \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ x_j \end{bmatrix} = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_w}\right)^2 \cdot \begin{bmatrix} w \\ -w \end{bmatrix} \quad (2-55)$$

相对约束在并址站的坐标差 (local-ties)和对流层天顶延迟差异(tropospheric-ties)上得到了很好的应用。在这两种情况下, w 通常都不为0。 $w = 0$ 意味着这两个参数在约束的强度范围内应该是相同的。这种特殊情况的一个例子是约束两个连续参数之间的差异, 以防止它们在时间尺度上变化太大。例如, 如果参数设置的时间分辨率非常高。 $w = 0$ 条件下的相对约束也可以作为两个参数的叠加。更准确地说, 两个相应的参数都存在于法方程中, 但由于相对约束, 它们必须在约束条件的限制下相等。

2.2 地球参考框架的建立

本节中主要讨论了国际地球参考框架的定义、综合理论以及解算步骤。借助 2.1 节中的参数估计理论可以解算得到各空间大地测量技术解, 并作为建立地球参考框架时的输入解。更重要的是, 在框架解算步骤的每一个环节都与 2.1 节中的参数估计理论息息相关。

2.2.1 国际地球参考框架的定义

国际地球自转和参考系统服务(IERS)负责 ITRS 的定义和实现。ITRS 定义的参考系是一个与地球一起共同旋转、原点位于地球质心的三维参考系。根《[IERS Convention 2010](#)》, ITRS 的定义如下:

原点位于考虑海洋和大气的地球质量的中心。

长度单位为米(SI)。尺度与质心的坐标时一致。

ITRS 的方向与 BIH(Bureau International de l'Heure)地球系统在 1984.0 时的

方向一致。

方向随时间的变化定义为相对于整个地球表面的水平构造运动无整体旋转。

以上条件定义的是一个理想的参考系，难以通过有限的观测资料实现。为解决这一难题，科学家们利用分布在地面上的观测站，通过空间大地测量技术与地面观测站之间有限的观测资料，实现了与ITRS无限接近的地球参考框架。目前参与地球参考框架建立的空间大地测量技术包括VLBI、SLR、GNSS和DORIS，四种技术在地球参考框架建立时发挥各自的优势，使得所建立的地球参考框架的可靠性得到保证。国际上把最权威的地球参考框架称为国际地球参考框架（ITRF）。国际地球参考框架是由原点、尺度和方向这三类参数表示。

原点

SLR卫星在800公里至19000公里的轨道高度绕地球运行。低轨卫星对地球重力场非常敏感，因此SLR适用于地球参考框架原点的确定。参考框架的原点被定义在地球质心。

$$\begin{aligned}x_0 &= \iiint x \frac{dm}{M} = 0 \\y_0 &= \iiint y \frac{dm}{M} = 0 \\z_0 &= \iiint z \frac{dm}{M} = 0\end{aligned}\quad (2-56)$$

其中， x_0 ， y_0 ， z_0 是相对于地球质心的原点的坐标， M 是包括大气和海洋的地球的总质量。在SLR中应用这个条件，得到的解在任何历元都指向地球质心。理论上，GNSS和DORIS也是对原点敏感的，但由于它们的轨道模型比SLR球面卫星复杂的多，解算的参数精度受到限制，因此无法参与地球参考框架原点的定义。

尺度

ITRS的尺度被定义为米，是由真空中的光速来定义的。在SLR和VLBI分析中固定光速可以实现高精度的尺度。ITRF的尺度是SLR和VLBI尺度的平均值（ITRF2014为算数平均值，DTRF2014为加权平均值）。实现的尺度通常与地面时（Terrestrial Time, TT）一致。这不符合《[IERS Conversion 2010](#)》中的决议，但由于大地空间技术的观测与TT有关，而且大多数ITRF应用需要TT相关的坐标，因此更偏向于选择与TT的一致

性。

不同尺度之间的转换可以通过应用相关相对论模型来实现。与原点一样, GNSS和DORIS原则上也对尺度敏感, 但由于上述轨道模型的误差, 这些技术确定的尺度受到了系统性影响。因此, 在建立ITRF时, 将尺度参数引入GNSS和DORIS的观测方程中, 以吸收与技术相关的尺度误差, 从而在最后综合的ITRF中尺度参数仅由SLR和VLBI来实现。

方向

ITRF的方向最初是由BIH地球参考系统BTS87给出。对于之后实现的ITRF, 其方向是根据前一个地球参考框架(ITRF)的方向在参考历元处应用无整体旋转条件 (No-Net-Rotation, NNR) 条件实现的。

$$\sum_{i=1}^n \mu_i \mathbf{r}_i^0 \times \Delta \mathbf{r}_i = 0 \quad (2-57)$$

其中, \mathbf{r}_i^0 为第 n 个测站的先验坐标向量, $\Delta \mathbf{r}_i$ 为评估的位置改正向量, μ_i 代表测站的权重。

在ITRF2000中, 方向是采用相对于对于板块构造模型NNR-NUVEL-1A无整体旋转实现的(DeMets等, 1994)。对于后续ITRF2005、ITRF2008、2014的实现, 方向的变化是通过应用一个相对于前一个ITRF无整体旋转条件(NNR)来实现的。

$$\sum_{i=1}^n \mu_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{v}_i = \sum_{i=1}^n \mu_i \mathbf{r}_i^0 \times \mathbf{v}_i^0 \quad (2-58)$$

其中, \mathbf{v}_i^0 , \mathbf{v}_i 分别为测站的先验和评估速度。 μ_i 表示位置和速度向量叉积的权重。

实际操作是将无整体旋转条件作为伪观测值添加到法向方程系统中, 旋转和旋转率参数的标准差分别为 0.1mm 和 0.01mm/年。

2.2.2 国际地球参考框架的综合理论

如前所述, ITRS的实现是基于VLBI、SLR、GNSS和DORIS的长时 间序列数据的综合。技术间的综合可以在观测水平上进行, 也可以在法 方程水平上进行, 也可以在参数水平上进行。目前, 在观测水平上的综 合还没有广泛应用于ITRS的实现。

四种空间大地测量技术的观测结果对不同的大地测量参数有各自的敏感性。表2.1概述了与ITRF直接相关的参数的敏感性。

表 2.1 空间大地测量技术对大地测量参数的敏感性

技术	测站坐标	极移	ΔUT1	LOD	原点	尺度
VLBI	x	x	x	x	x	x
SLR	x	x		x	x	x
GNSS	x	x		x		
DORIS	x	x		x		

2.2.2.1 在观测水平上综合

VLBI、SLR、GNSS 和 DORIS 的基本观测方程分别可以在 [Sovers 等 \(1998\)](#)、[Sengenes 等 \(2002\)](#)、[Teunissen 和 Kleusberg \(1998\)](#)、[Seeber \(2013\)](#) 中找到。GNSS 的基本观测方程（包括伪距观测方程(2-59)和载波相位观测方程(2-60)）为：

$$p_r^s = \rho_r^s + c \cdot (dt_r - dt^s) + T_r^s + I_r^s + e_r^s \quad (2-59)$$

$$\varphi_r^s = \rho_r^s + c \cdot (dt_r - dt^s) + T_r^s - I_r^s + \lambda \cdot M_r^s + \epsilon_r^s \quad (2-60)$$

其中， p_r^s 和 φ_r^s 分别为卫星到接收机的伪距和载波相位观测值， $\rho_r^s = \sqrt{(x^s - x_r)^2 + (y^s - y_r)^2 + (z^s - z_r)^2}$ 为卫星到接收机之间的几何距离， dt_r 和 dt^s 为接收机和卫星钟差， T_r^s 为对流层延迟误差， I_r^s 为电离层延迟误差， λ 为载波的波长， $M_r^s = N_r^s + \delta_r - \delta^s$ 是整周模糊度 N_r^s 与接收机相位延迟 δ_r 和卫星相位延迟 δ^s 之和， e_r^s 和 ϵ_r^s 代表未模型化的误差（包括接收机噪声，多路径及其他误差）， c 为光速。GNSS 观测方程中的未知参数包括测站位置，卫星轨道，接收机钟差和地球自转参数等。VLBI、SLR 和 DORIS 的基本观测方程也相应建立。表 2.1 中总结了四种空间大地测量技术的基本观测方程中与地球参考框架相关的未知参数。

在观测水平上综合空间大地测量技术，由软件对不同的观测类型采用相同的模型和参数化生成一个通用的设计矩阵 A 。技术相对应的观测方程及其待估参数协方差阵为

$$A_k x_k = b_k + v_k \quad (2-61)$$

$$Q_k x_k = b_k + v_k \quad (2-62)$$

式中， k 代表观测技术 VLBI、SLR、GNSS 或 DORIS。把四种技术的观测方程写到一起组成观测方程

$$\begin{bmatrix} A_R \\ A_L \\ A_P \\ A_D \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} b_R \\ b_L \\ b_P \\ b_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_R \\ v_L \\ v_P \\ v_D \end{bmatrix} \quad (2-63)$$

其中, R 、 L 、 P 、 D 分别代表观测技术VLBI、SLR、GNSS和DORIS。

根据最小二乘理论解算式(2-63)得到未知参数包括参考框架点的坐标和地球定向参数EOP等的最优解。当然在解算这一方程时需要加入必要的伪观测方程作为约束条件实现参考框架的最终解。

这种方法的优点是:1) 所有的观测数据使用相同的模型和参数化使利一个软件进行统一处理; 2) 异常值分析和技术内部观测数据的加权是基于贡献于综合的所有观测数据; 3) 综合观测方程时采用必要的约束使参数稳定并实现了大地基准解, 而非技术层面的。观测值的加权可以通过应用方差分量估计来实现 (Koch, 1988)。在观测水平上综合是严密的综合模型。所有的观测值类型使用相同的参数化和简化模型生成观测方程统一进行处理。

2.2.2.2 在法方程水平上综合

在法方程水平上的综合是基于方程(2-9)实现的。综合时输入的法方程由一个或不同的软件包生成。现今, 对大地空间技术的分析通常是由特定技术的软件包来完成的。各技术的分析结果存储在 SINEX(Software and technique INdependent EXchange)格式的文件中, 其中包括参数解和方差/协方差阵等信息。综合这些技术解时, 从 SINEX 文件中读取法方程相关的信息, 并把与基准相关的约束(见公式(2-52))删除。对不同分析软件的模型和参数化进行调整后, 在法方程水平上的综合是在观测水平上的综合的近似。与在观测水平上综合的不同之处在于, 异常值分析和观测技术内部的加权仅基于单技术的观测量。为了能够处理大型法方程矩阵, 在综合前对不直接相关的参数进行了“预消除”(方法见 2.1.4)。在“预消除”前被约束且具有足够精度的参数(如钟差)不能再被估计, 与这些参数相关的约束在综合时也不能再被消除。为了避免解的变形, 引入与简化参数相关的先验约束时必须非常小心。更严格的方法是在综合之前不约束和减少参数, 但这会导致非常大的矩阵。

根据最小二乘估计理论, 各空间大地测量技术的观测方程(2-61)对

应的法方程为

$$N_k \hat{x}_k = y_k \quad (2-64)$$

其中, $N_k = A^T P A$, $y_k = A^T P b$ 。那么四种技术综合的法方程形式为

$$N \hat{x} = y \quad (2-65)$$

法方程系数矩阵和右手边的值分别为

$$N = \frac{1}{\sigma_V^2} N_V + \frac{1}{\sigma_S^2} N_S + \frac{1}{\sigma_G^2} N_G + \frac{1}{\sigma_D^2} N_D \quad (2-66)$$

$$y = \frac{1}{\sigma_V^2} y_V + \frac{1}{\sigma_S^2} y_S + \frac{1}{\sigma_G^2} y_G + \frac{1}{\sigma_D^2} y_D \quad (2-67)$$

由(2-66)加必要的约束和伪观测方程解得的地球参考框架参数就是在法方程水平上综合得到的框架参数解。IERS 综合中心 DGFI 实现的 ITRS 就是基于这种方法。[Bloßfeld 等人\(2020\)](#)给出了最新实现的 DTRF2014 的综合策略和详细的计算流程。

2.2.2.3 在参数水平上综合

在参数水平上对技术解进行综合时, 由各技术的法方程(2-64)解的框架参数解作为综合时的输入, 也即技术解参数是综合时的伪观测值。在参数水平上进行综合的观测方程为

$$I \begin{bmatrix} x_V \\ x_S \\ x_G \\ x_D \end{bmatrix} = \hat{x} + \begin{bmatrix} v_V \\ v_S \\ v_G \\ v_D \end{bmatrix} \quad (2-68)$$

由(2-68)加必要的为观测方程形成的法方程解算的框架解就是在参数水平上综合的参考框架解。

在参数水平上综合的观测方程与在观测之水平上和在法方程水平综合观测方程不同。在实现 ITRF 时, 输入解通常通过应用最小约束或松约束来生成, 以消除与基准参数相关的秩亏(见 2.1.6 节)。这两种约束的优点是它们不会导致测站网几何形状的变形。最小约束可以去掉法方程中对应于基准参数的奇异性, 并且不会引起测站网几何形状的任何变化(无变形约束); 松约束意味着对所有参数或者某一参数组中所有参数约束条件相对比较宽松(例如, 测站坐标使用 1m 的约束)。松约束的标准差非常高(远大于假定的参数的精度), 所以测站网几何形状也没有明显改变。通过施加松约束, 不仅去掉了与基准相关的奇异点, 也去掉了所有类型的奇异点。当使用最小约束时, 求解参数的标准差较小; 当使

用松约束时，求解得到的所有参数的标准差都较大。

所有的输入解都实现了大地测量基准。为了避免技术解中应用的约束对综合解(ITRS 实现)的基准产生影响，对每个输入的技术解建立了一个相对于综合解的三维相似变换参数，称为 Helmert 变换([Seitz, 2009](#))。这是一个在法方程水平上进行综合和在观测值水平上进行综合的重要的区别。

在参数水平上综合的理论应用在综合中心 IGN 实现 ITRF 时。[Altamimi 等人 \(2016\)](#) 对最新实现的 ITRF2014 中使用的综合策略进行了详细的描述。

在参数水平上综合与在法方程水平上综合的差异主要表现为以下几点：

- 1) 在参数水平上进行综合包括两个步骤：技术解的生成和技术解的综合。在求解技术解时，基准参数的秩亏是通过应用最小约束去除的。输入参数和与输入参数相关的方差-协方差矩阵(用于综合中参数的权重)依赖于应用的约束。在技术解中应用松约束可能导致：i) 不理想的相关性；ii) 由解相对于大地测量基准的不确定度所支配的标准偏差；iii) 在综合时对未经验证的参数降权。因此，松约束的输入解在综合之前应该应用最小约束来调整。
- 2) 为了能够独立于输入的技术解提供的基准实现综合解的大地测量基准，在综合时对于每个输入的技术解都设置了 7 个 Helmert 变换参数(平移、方向和尺度)。为每个输入解选择一组在全球分布良好的测站，以确定变换参数。这意味着 Helmert 变换和综合解依赖于参与参数变换选定的测站集。
- 3) 由于测站在全球范围内是非均匀分布的，测站分布与 Helmert 变换参数是相关的，因此 Helmert 变换参数也可以吸收非基准效应。这种现象在测站网空间分布不好的情况下尤其严重，在 VLBI 和 SLR 的观测（尤其是早期）中经常发生。

2.2.3 国际地球参考框架的建立

ITRF 的建立是综合 VLBI、SLR、GNSS 和 DORIS 的长时间序列解实

现的。分布全球的观测站的坐标(参考历元处台站位置及其随时间的线性变化, 即台站速度)构成国际地球参考框架(ITRF)(图2.1)。在最新的实现ITRF中, IERS的三个综合中心——法国巴黎的IGN、德国慕尼黑的DGFI和美国的JPL——各自进行独立计算。三个机构分别从同一组输入数据中使用不同的综合策略和不同的软件进行计算。经过交叉验证后, IERS综合中心选择其中一个解 (ITRF2014) 作为ITRF的官方解发布。ITRF解的可靠性通过三个框架的交叉验证得到了极大的提高, 这也证明了由三个机构参与计算是非常有必要的。未来, 三个综合中心将继续致力于ITRF的实现, 以进一步提高ITRF的准确性和可靠性。IERS每3-5年提供一个新的ITRF解。其原因在于利用先前发布的ITRF模型对一个长时段尤其是在框架发布之后发生地震区域的坐标进行外推, 其准确性会变差。除了更长的观测数据长度、设备的跟换以及新台站的安装外, 用于技术分析的简化模型的改进也对新的ITRF提出更高精度的要求。

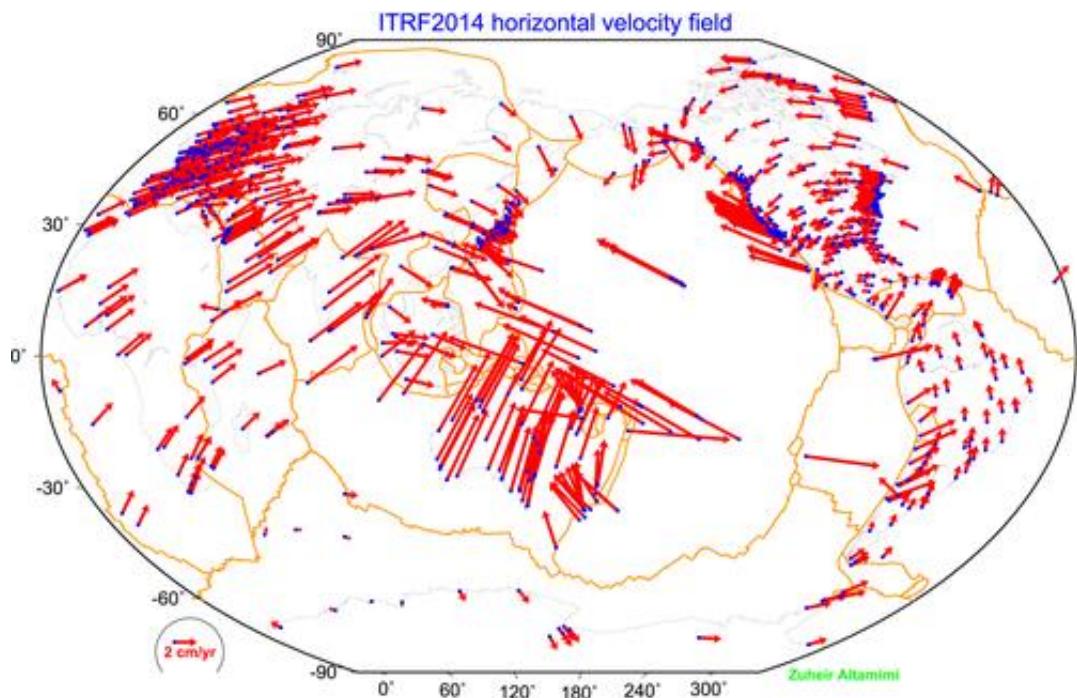


图 2.1 ITRF2014 的水平速度场 (Altamimi, 2016)

图 2.2 是实现 ITRF 的基本流程图。三个 ITRS 综合中心实现 ITRF 的基本步骤是相同的:主要包括技术内综合和技术间综合两个方面。除了上述两个核心步骤外, 还包括: i) 生成长期技术解时对时间序列参数进行分析, 以探测时间序列中存在的不连续、拟合出测站速度和震后形

变, 同时删除异常值; ii) 在技术间综合时引入“本地连接”以实现技术间的综合; iii) 实现参考框架基准时, 对各技术进行区别处理; iv) 技术间综合时各技术的方差因子的确定。[Altamimi 等人 \(2016\)](#), [Bloßfeld 等人\(2020\)](#), [Abbondanza 等人 \(2017\)](#) 分别对 IGN, DGFI-TUM 和 JPL 最新实现的 ITRF2014, DTRF2014 和 JTRF2014 进行了详细描述。

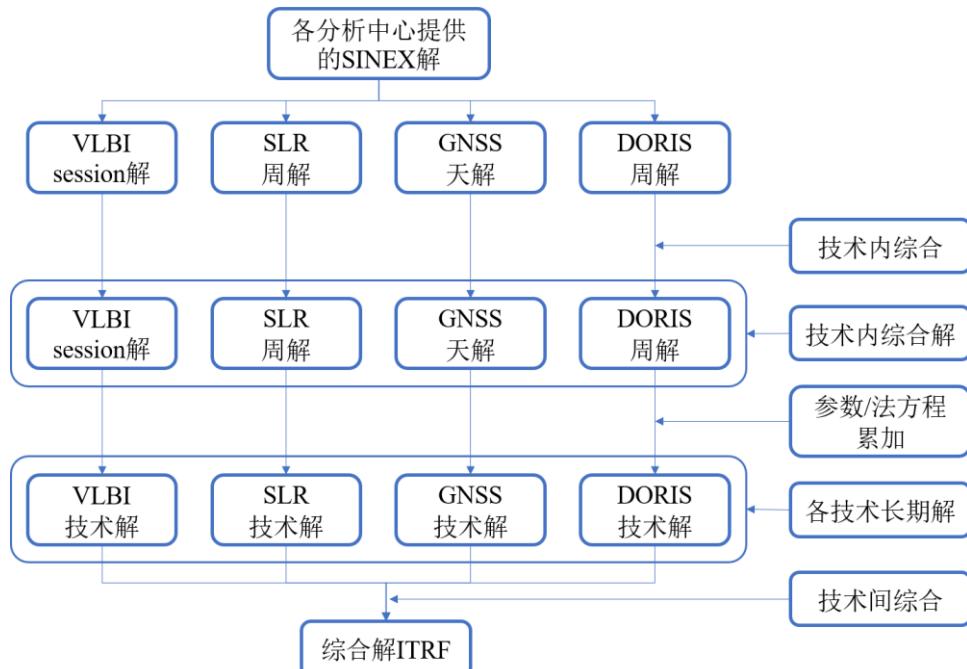


图 2.2 实现 ITRF 的流程图

2.2.3.1 技术解分析

国际大地测量协会 IAG 负责收集由空间大地测量技术 VLBI、SLR、GNSS 和 DORIS 的服务中心 IVS、ILRS、IGS 和 IDS 提供的 SINEX 文件。每个服务中心包括几个分析中心 (Analysis Center, AC), 每个分析中心根据空间大地测量观测数据估计一组参数。估计的参数中包含:

- 测站坐标
- 描述 SLR、GNSS 和 DORIS 卫星轨道的参数
- VLBI 观测到的类星体的坐标
- 描述对流层延迟的参数
- 其他与技术相关的偏差, 如 SLR 的测站距离误差, GNSS 的测站和卫星钟差, GNSS 的模糊度参数, DORIS 的信标频率偏差等

各个技术的分析中心使用不同的参数估计方法和策略得到一组大地测量参

数解。无论哪一种解都包含一个法方程：

$$N(x - x_0) = b \quad (2-69)$$

其中， x_0 为待估参数 x 的先验值。利用 2.1.4 节中介绍的方法可以从法方程 (2-69) 中消除特定的参数，从而只保留感兴趣的参数。在最后建立的地球参考框架参数中，我们感兴趣的只有测站坐标和 EOP 参数，因此其他参数都被消除掉了。

没有一种空间大地测量技术能够提供足够的信息来准确地估计测站坐标和 EOP 参数，这就导致法方程的系数矩阵是奇异的。四种技术所固有的奇异性如下：

- 四种技术都不能同时确定测站网相对地壳的方向和 EOP 参数。实际上，极移坐标和 DUT1 不是固有的量，完全依赖于由站坐标表示的地球参考框架的方向。换句话说，测站网的旋转可以由 EOP 参数的变化来补偿，而不会对大地测量观测造成任何影响。因此，所有技术的法方程系数阵都有三个方向奇异。
- VLBI 作为一种干涉测量技术，对地球参考框架的原点不敏感。对整个测站网进行七参数转换不会改变不同望远镜接收类星体信号的时间差。因此，VLBI 的法方程系数阵有三个原点奇异。
- 即使将测站网的方向固定，三种卫星技术（SLR、GNSS 和 DORIS）也对 DUT1 不敏感。DUT1 的变化可以通过整个卫星星座的旋转来补偿，而不影响卫星的跟踪观测。因此，SLR、GNSS 和 DORIS 的法方程系数阵具有一个 DUT1 的奇异。

为了得到法方程的唯一解，需要对待估计的参数增加一些额外的约束（例如，最小约束和松约束），以补偿法方程系数矩阵中存在的奇异性。增加约束后的法方程为：

$$(N + N_c)(x - x_0) = b \quad (2-70)$$

式中， N_c 为约束的法方程系数矩阵， $N + N_c$ 是可逆矩阵。法方程(2-70)有一个唯一解：

$$\hat{x} = x_0 + (N + N_c)^{-1}b \quad (2-71)$$

与待估参数 \hat{x} 相关的协方差阵为：

$$Q_{\hat{x}\hat{x}} = (N + N_c)^{-1} \quad (2-72)$$

各分析中心提供给技术服务中心的是以每周、每日或每一时段(VLBI)为单元

的时间序列解，这些时间序列解在综合前需要将法方程还原为无约束的法方程：

$$\begin{cases} N = Q_{\hat{x}\hat{x}}^{-1} - N_c \\ b = Q_{\hat{x}\hat{x}}^{-1}(x - x_0) \end{cases} \quad (2-73)$$

对于在观测方程中通过增加最小约束来补偿法方程的奇异性的解中，只提供 x 、 x_0 和 $Q_{\hat{x}\hat{x}}$ 。

2.2.3.2 并址站连接问题

因为各空间大地测量技术的信号接收原理不同，它们的观测站只能单独使用。而建立地球参考框架时因为技术缺陷的问题，需要将各空间大地测量技术的解综合起来。综合时需要足够的公共参数，以实现高精度的地球参考框架参数。常规处理是把不同技术位置相近的测站（并址站）通过大地测量技术获得测站之间的位置差异作为伪观测值加入观测方程，并对这一类测站的速度施加相同的速度，以此为约束条件实现技术间的综合。实现技术间连接的这种测量技术被称作“本地连接”技术。

“本地连接”的测量是通过大地测量或者GNSS技术完成。由于SLR和VLBI望远镜的天线参考点不能直接访问，给“本地连接”的测量带来一定的障碍。为了重建天线的几何参考点，即方位角和仰角轴的交点，必须给望远镜建立复杂的数学-物理模型。Johnston和Dawson (2004)、Sarti等人 (2004) 和 Michel等人 (2005) 给出了“本地连接”测量的具体描述。ITRS中心收集、准备和提供实现ITRF的“本地连接”测量结果。图2.3展示了ITRF2014建立时所用的所有并址站的分布。

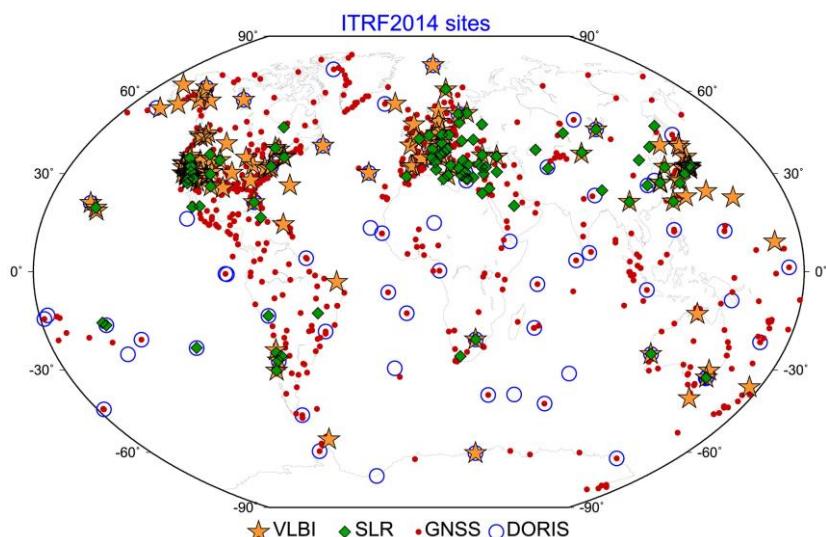


图 2.3 ITRF2014 中四种空间大地测量技术的测站分布图 (Altamimi, 2016)

对于大多数并址站而言，“本地连接”技术测量的结果与空间大地测量技术获得坐标差向量相差几毫米至厘米。造成这一现象的原因是一部分来源于“本地连接”技术的测量误差，另一部分则是由空间大地测量技术中使用了不精确的改正模型或者未模型化的误差导致的。为了提高综合解的精度，“本地连接”技术以具有适当标准差的伪观测方程的形式 $x_{sta1} - x_{sta2} = \Delta x_{local\ tie}$ 引入到综合方程中。在多数情况下，“本地测量”的标准差太小不足以反映“本地测量”与空间大地测量技术的差异。因此需要为“本地连接”技术单独确定一个合适的方差因子，目的在于避免四种空间大地测量技术综合后框架网发生变形，最后导致不准确的框架定义参数。“本地连接”是一个复杂的迭代过程，[Altamimi等人\(2007\)](#)在ITRF2005中对此进行了详细描述。

当作为并址站的两个站之间的速度差异很小时，则利用具有 0.1 mm/yr 的标准差的伪观测方程 $v_{sta1} - v_{sta2} = 0$ 对并址站的速度进行约束。

2.2.3.3 方差分量估计

在综合不同空间大地测量技术的观测数据时，为了考虑不同技术的方差水平的差异，必须估计方差分量。经典的方法是通过方差分量估计(VCE)直接估计综合平差中的方差分量([Koch, 1988](#))。然而，这种方法的问题在于，经典的VCE无法考虑观测技术存在的随机模型误差。GNSS的随机模型由于忽略了观测值之间的相关性而难以建模。这是GNSS分析中一个众所周知的问题([Schön和kutter, 2006](#))，导致GNSS估计的参数的标准差过于乐观。

为了获得可靠的方差分量，采用了一种基于测站位置时间序列变化分析的经验方法。目的是使由平差得到的测站位置的形式误差 σ_{est} (形式误差 σ_{est} 为协方差阵 $C_{\hat{x}\hat{x}}$ 中主对角元素的平方根)与由测站位置时间序列得到的测站平均位置的标准差 σ_{TS} 相同。每个测站 σ_{TS} 的计算公式为

$$\sigma_{TS} = \frac{RMS}{\sqrt{n}} \quad (2-74)$$

式中，RMS是测站位置残差序列的均方根， n 为历元数。对于方差分量的计算，由各技术长期解的验后残差获得。ITRF2014中，利用VLBI、SLR、GNSS和DORIS技术长期解的验后方差因子对各技术长期解将进行

加权 (各技术验后方差因子的均方根依次为4.8、5.02、2.30和2.62)。为确保四种技术解的验后方差因子不超过整体的10%，把DORIS长期解的方差因子调整为原来的3.5倍 (Altamimi, 2016)。

2.2.3.4 大地测量基准的实现

技术内综合

每一种空间大地测量技术服务有一个综合中心，其作用是将各分析中心提供的解综合为一个综合解。这种技术内的综合与分析在相同的时间基础上执行(即一周、一天或一个 VLBI 观测时段)，综合时涉及对各分析中心解进行加权平均。技术内综合既可以描述为法方程的综合，也可以描述为解的综合。我们在这里将技术内综合方法描述为解的综合。

每个分析中心提供给技术综合中心的解要么是无约束的解，要么是松约束解，要么是最小约束解。对于松约束解，可以通过使用(2-73)去除应用的约束条件，并使用最小约束条件反求无约束法方程，将每个分析中心的解都转化为最小约束解。下面以最小约束解为例进行描述。

各分析中心的解由测站位置和 EOP 参数组成。在将各分析中心的解进行综合时，将测站位置和 EOP 参数作为伪观测值，通过以下观测方程估计综合的测站位置和 EOP 参数 (Rebischung, 2016)：

$$\left\{ \begin{array}{l} X_i^s = X_i^c + T_X^s + D^s X_i^c + R^s X_i^c + v_i^s \\ X_{CM}^s = X_{CM}^c + T_X^s + v_{CM}^s \\ x_p^s = x_p^c + r_Y^s + v_{xp}^s \\ x_p^s = y_p^c + r_X^s + v_{yp}^s \\ \dot{x}_p^s = \dot{x}_p^c + v_{xp}^s \\ \dot{y}_p^s = \dot{y}_p^c + v_{yp}^s \\ UT^s = UT^c - \frac{r_z^s}{f} + v_{UT}^s \\ LOD^s = LOD^c + v_{LOD}^s \end{array} \right. \quad (2-75)$$

式中， X_i^s 代表测站*i*的坐标， X_{CM}^s 代表地心坐标， x_p^s 、 x_p^s 和 \dot{x}_p^s 、 \dot{y}_p^s 代表极移和极移率， UT^s 为世界时， LOD^s 为日长变化，*s*代表某一个分析中心； X_i^c ， X_{CM}^c ， x_p^c ， \dot{x}_p^c 、 \dot{y}_p^c ， UT^c 及 LOD^c 代表相应参数的综合解； T_X^s 、 D^s 、 R^s 分别为各分析中心解与综合解之间的平移、尺度和旋转参数； $f=1.00273781191135448$ 为世界时 UT 与恒星时之间的换算系数； v_i^s ， v_{CM}^s ， v_{xp}^s 、 v_{yp}^s ， $v_{\dot{xp}}^s$ 、 $v_{\dot{yp}}^s$ ， v_{DUT1}^s 和 v_{LOD}^s 代表分析中心*s*各参数的综合残差。

在综合最小约束解的条件下，得到的综合法方程与各分析中心的法方程具有相同的奇异性。因此与各分析中心的法方程一样，综合法方程需要在增加额外的约束条件(例如最小约束或松约束)的情况下求解。

技术长期解

ITRF 实现的下一步就是将四种技术各自综合的时间序列叠加成一个长期解。与技术内综合一样，这种长期解的叠加既可以描述为法方程的叠加，也可以描述为解的叠加。我们在这里将长期解的叠加方法描述为解的叠加。

这里我们以最小约束的技术内综合解为例进行说明。自 ITRF2005 (Altamimi 等, 2007) 以来，地球定向参数 (EOP) 也包含在各技术的长期解中，但为了简化起见，我们在这里假设参数集仅涉及测站位置。将一个长时间序列解叠加为一个长期解的算法，就是将技术内综合的解作为伪观测值拟合出某一参考历元测站的位置和速度的最优解的方法。每个观测站在历元 t_i 所对应的观测方程如下：

$$x(t_i) = x(t_0) + (t_i - t_0) \cdot \dot{x}(t_0) + T(t_i) + D(t_i) \cdot x(t_0) + R(t_i) \cdot x(t_0) + v_i \quad (2-76)$$

式中， $x(t_i)$ 为在历元 t_i 时刻某测站的坐标； $x(t_0)$ 为同一测站在参考历元 t_0 时刻的综合坐标； $\dot{x}(t_0)$ 为综合解的速度； $T(t_i)$ 、 $D(t_i)$ 、 $R(t_i)$ 分别为平移、尺度、旋转参数。

由于转换参数的加入，叠加的法方程可能有一些奇异点。例如，如果为所有输入设置了平移参数 $T(t_i)$ ，得到的叠加法方程就会有一个“平移奇异点”以及一个“平移速度奇异点”。当为所有输入解设置了所有七个变换参数时，叠加的法方程可能有多达 14 个奇异点。这 14 个奇点中的每一个都可以用两种不同的约束来补偿。例如，在为所有输入解设置三个平移参数的情况下，可以通过在参数（或法方程）叠加的参考框架和外部参考框架之间施加整体平移和无整体平移率约束来补偿 6 个奇异点。另一种选择是使用所谓的内部约束(Altamimi 等, 2008, 2017)，即强制输入解和组合解之间的转换参数的时间序列具有零均值和零漂移。

技术间综合

实现 ITRF 的最后一步是将四种空间大地测量技术的长期解综合成

一个参考框架, 即 ITRF 本身。这一步骤由 IERS 的 ITRS 综合中心执行, 与技术内综合一样, 也可以描述为解的综合或法方程的综合。在综合解的形式下, 从四个特定技术的长期参考框架解中获得的测站位置和速度作为伪观测值来估计综合的 ITRF 中测站的位置和速度。技术间综合时的主要观测方程为 (Altamimi, 2016):

$$\left\{ \begin{array}{l} X_i^Q = X_i^c + (t - t_0) \cdot \dot{X}_i^Q + T_X^Q + D^Q X_i^c + R^Q X_i^c \\ \quad + (t - t_0) \cdot (\dot{T}_X^Q + \dot{D}^Q X_i^c + \dot{R}^Q X_i^c) + v_i^Q \\ \dot{X}_i^Q = \dot{X}_i^c + \dot{T}_X^Q + \dot{D}^Q X_i^c + \dot{R}^Q X_i^c + v_i^Q \\ x_p^Q = x_p^c + r_Y^Q + v_{xp}^s \\ x_p^Q = y_p^c + r_X^Q + v_{yp}^s \\ \dot{x}_p^Q = \dot{x}_p^c + v_{\dot{y}p}^Q \\ \dot{y}_p^Q = \dot{y}_p^c + v_{\dot{y}p}^Q \\ UT^Q = UT^c - \frac{r_z^Q}{f} + v_{UT}^Q \\ LOD^Q = LOD^c + v_{LOD}^Q \end{array} \right. \quad (2-77)$$

式中, X_i^Q 和 \dot{X}_i^Q 分别代表测站 i 的坐标和速度, x_p^Q 、 x_p^Q 和 \dot{x}_p^Q 、 \dot{y}_p^Q 代表极移和极移率, UT^Q 为世界时, LOD^Q 为日长变化, Q 代表某一种技术; X_i^Q 、 \dot{X}_i^Q 、 x_p^Q 、 x_p^Q 和 \dot{x}_p^Q 、 \dot{y}_p^Q 、 UT^Q 及 LOD^Q 代表相应参数的综合解; T_X^Q 、 D^Q 、 R^Q 以及 \dot{T}_X^Q 、 \dot{D}^Q 、 \dot{R}^Q 分别为技术解与综合解之间的平移、尺度和旋转参数以及平移率, 尺度变化率, 旋转率参数; $f=1.00273781191135448$ 为世界时 UT 与恒星时之间的换算系数; v_i^Q , v_{xp}^Q , v_{yp}^Q , $v_{\dot{y}p}^Q$, v_{UT}^Q 和 v_{LOD}^Q 代表各技术解中各参数的综合残差。

可以看出, 与技术间综合时的观测方程(2-75)相比, 增加了技术间速度的综合的方程, 减少了地心坐标的估计的方程。与方程(2-75)类似, 在每个特定技术解和组合解之间, 也可以估计多达 14 个转换参数(三个平移、一个尺度因子、三个旋转和所有它们的速率)。当这 14 个参数中的任何一组需要被估计, 那么相应的奇异点就会出现在综合法方程中, 则需要用一些约束来补偿。

由于技术间的公共参数只包含部分 EOP 参数, 为获得高精度的框架解。在技术间进行综合时, 利用“本地连接”技术获得并址站间的相对位置信息, 与空间大地测量技术解确定的测站相对位置一起作为伪观测方程包含在 ITRF 技术间综合的方程中。此外, 可以在观测方程中为

并址站增加速度相等的约束条件。

在并址站上的“本地连接”和速度相等约束是把四种空间大地测量技术框架解联合为一个框架解的关键信息，因此在 ITRF 的建立中具有非常重要的作用。尽管这一重要性在过去几年一直被强调，但并址站的分布以及“本地测量”的质量仍然是 ITRF 精度的主要限制因素。

2.2.3.5 参数的时间序列分析

测站位置和基准参数的时间序列是 ITRF 的副产品。它们是从输入解的时间序列到特定技术的长期解的 7 参数（3 平移、3 旋转和 1 尺度参数）Helmert 变换得到的。以技术解作为输入为例，通过应用表 2.2 中给出的所需最小约束条件，对这些方程进行初步求解。分析剩余台站位置的时间序列，以识别坐标不连续性（例如，由地震或仪器变化引起）、长期非线性台站运动（在实现 ITRS 时通过分段线性函数进行参数化）和异常值。应用于显著性检验的阈值取决于技术，根据时间序列的离散度首先进行定义。图 2.4 显示了 ITRF2014 解和 IGS 解中获得的 GNSS 站 ASPA 和 JPLM 高程方向的测站位置时间序列。ASPA 站受到地震的影响，导致高程分量在地震发生后产生非线性运动轨迹。测站 JPLM 频繁遭受设备更换的影响导致测站位置随之发生不连续性变化。在 ITRF2014 的实现中，测站位置随时间的变化由分段线性函数加震后形变模型 PSD（仅对受地震影响的测站）表示。

表 2.2 应用到 ITRF 框架网上的最小约束

基准参数	最小约束条件	单技术解中的应用
原点	无整体平移	VLBI, GNSS 和 DORIS
方向	无整体旋转	所有技术
尺度	无整体缩放	GNSS 和 DORIS

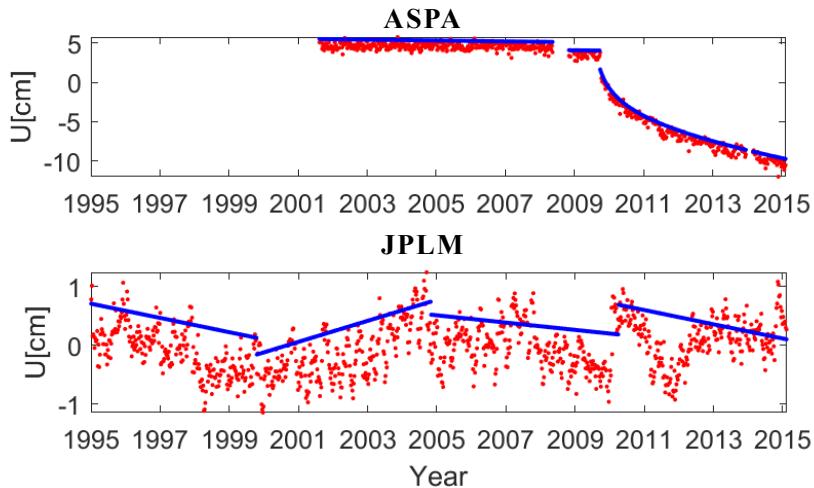
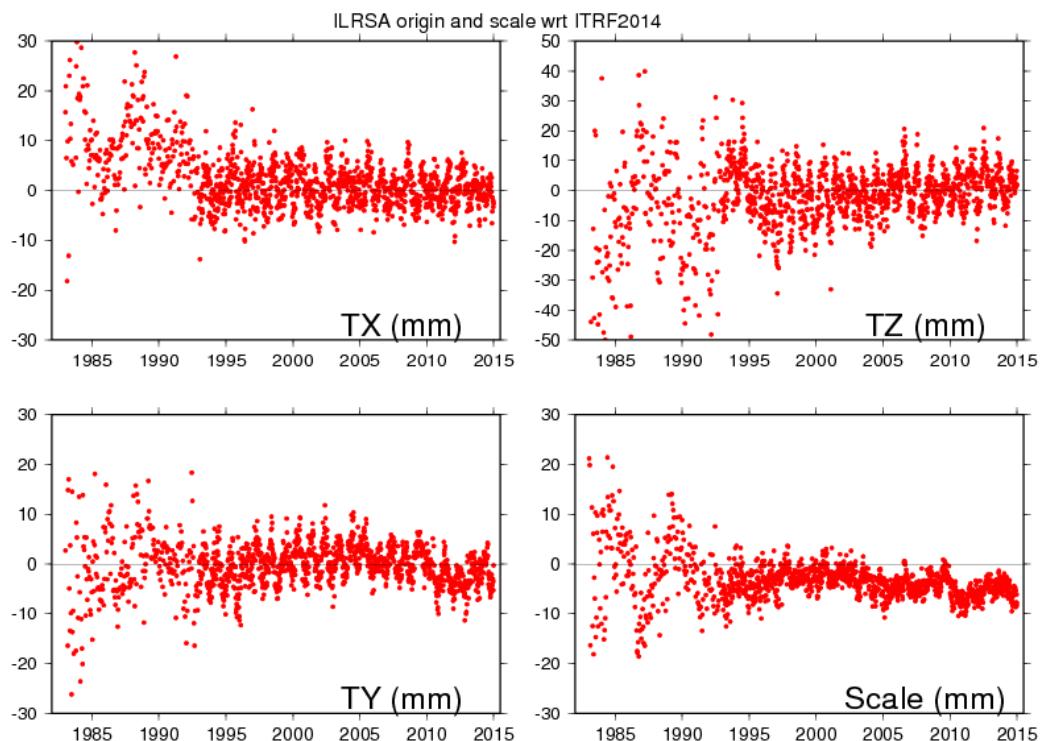
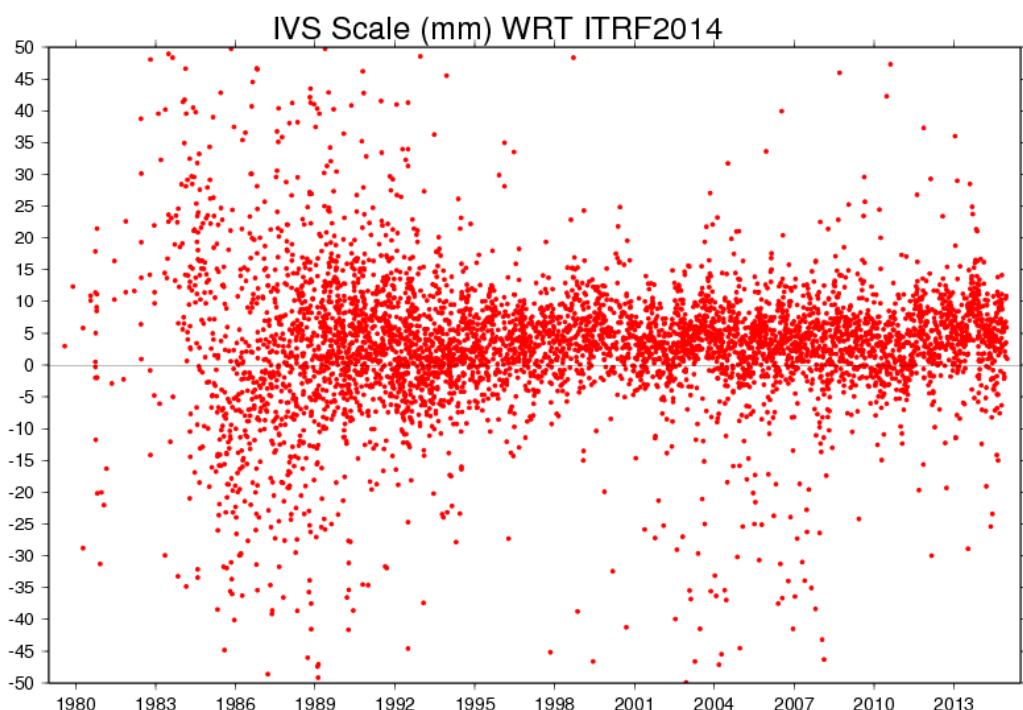


图 2.4 GNSS 站 ASPA (子图上) 和 JPLM (子图上) 高程上测站位置时间序列 (红色为 IGS 解, 蓝色为 ITRF 解)

参考框架的原点由 SLR 实现, 尺度由 SLR 和 VLBI 共同实现。在地球参考框架建立时也会对由 Helmert 转换获得的基准参数时间序列的时变特征进行分析。图 2.5 中是 SLR 的周解相对于 ITRF2014 的平移和尺度参数。在时间序列的开始到 1992 年底 (LAGEOS2 发射前), 时间序列中存在较大的周期信号, 同时相较后期时间序列噪声也很大。而在 1993 年之后的时间序列不仅噪声相对变小, 周期信号也消失不见。噪声变小是因为 LAGEOS2 的加入, 而周期信号的消失则归功于在生成 SLR 长期解时应用内部约束把地心和尺度运动的周期信号约束为零 (Altamimi 等, 2017)。另外 SLR 的尺度相对于 ITRF2014 除长时间序列偏差的均值不为零之外, 还存在不稳定的非线性变化。而图 2.6 中 VLBI 的尺度相对于 ITRF2014 则只存在稳定的偏差和相较 SLR 更大的噪声。这也表明, 由 SLR 和 VLBI 确定的尺度之间存在偏差, 这种偏差来源于技术中还未模型化或者模型本身存在的误差。距离偏差是 SLR 独有的障碍 (Appleby 等, 2016); 热膨胀以及重力引起的天线变形是 VLBI 目前还未解决的问题 (Gipson, 2018); 网分布不均且台站分布较为稀疏是二者共有的问题。

图 2.5 SLR 相对于 ITRF2014 的地心和尺度运动时间序列⁶图 2.6 VLBI 相对于 ITRF2014 尺度变化的时间序列⁷

⁶ https://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/plot/trf-ilrs.png

⁷ https://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/plot/scale-ivs.png

2.3 本章小结

本章中首先阐述了建立地球参考框架时所涉及的数据处理算法和理论,接着以 IERS2010 协议中国际地球参考系的定义为先导引出国际地球参考框架的概念,并对国际地球参考框架在观测值域、法方程域和参数域的综合理论进行了叙述,最后对构建国际地球参考框架时的几个关键问题(技术解的约束、并址站连接问题、方差分量估计、基准实现和参数的时间序列分析)分别进行了讨论。

第3章 国际地球参考框架的精度分析

地球参考框架的实现和维持是理解和研究由各种地球物理过程,如板块构造 (Argus 等 1995, 2014; Altamimi 等, 2012)、冰川均衡调整 (Argus 等, 1996, 1999) 和大尺度地表质量(大气、雪、冰川、土壤湿度和地下水储量等)的变化 (Borsa 等, 2014; Fu 等, 2015), 以及海平面上升(Gross 等, 2009; Blewitt 等, 2010; Collilieux 等, 2011; Woppelmann 等, 2016) 等造成的固体地球形状的线性和非线性时间变化的基础。在精客单点定位、精密轨道确定和自然灾害监测等大地测量应用中, 地球参考框架作为参考基准也发挥着关键的作用。地球物理和大地测量应用要求地球参考框架精度高、一致性好、长期稳定, 要求地球参考框架的精度和稳定性分别在 1mm 和 0.1mm/yr 水平 (Gross 等, 2009; Altamimi 等, 2008)。

Abbondanza 等人 (2020) 的研究表明, 最新实现的三种国际地球参考框架之间的长期一致性水平在 0.18mm/yr 左右。Angermann 等人(2020)的结果表明: 1) 通过使用精密轨道测定(POD)和 SLR 数据进行比较, ITRF2014、DTRF2014 和 JTRF2014 的精度水平几乎相同, 其中, JTRF2014 和 DTRF2014+NTL 的精度最好;2) 通过对四种不同的空间技术分别应用 14 个参数的 Helmert 变换, ITRF2014 和 DTRF2014 两种长期解之间的大地基准(原点、尺度和方向)的一致性在 5-6mm 以内。

Dach 等人 (2016) 认为, 最新的 ITRF 的实现之间的差异小于通过地球质心与原点一致而引入到解中的变形的影响; Dach 等人 (2017) 的研究表明, ITRF 实现之间的差异小于 GNSS 卫星轨道模型误差和 SLR 技术引入的站/卫星特定效应的影响。

由于模型的缺陷, ITRF2014、DTRF2014 和 JTRF2014 的精度不可避免地会随着时间的推移而下降。本文以连续观测的 GNSS 框架解, 即 1995 年 1 月至 2015 年 1 月的 IG2 解和 2015 年 2 月至 2020 年 7 月的 IGS 解为参考基准, 研究了这三种实现中的信号及其框架预报性能。Helmert 变换方法和相关参数被用来研究 IGS 解和最新的 ITRF 之间的

差异和一致性。对用于实施相似变换选定的测站进行了说明。接着，将 IGS 解与 ITRF2014、DTRF2014、JTRF2014 和它们的预测进行比较。

3.1 三种国际地球参考框架与 IGS 解的比较

3.1.1 三种国际地球参考框架的介绍

最新实现的国际地球参考框架（伴随综合策略和物理模型增强）分别是 ITRF2014（Altamimi 等，2016）、DTRF2014（Seitz 等人，2015）和 JTRF2014（Abbondanza 等，2017）。这三个地球参考框架都是基于四种空间大地测量技术实现的，包括全球卫星导航系统(GNSS)、多普勒轨道和卫星综合无线电定位技术(DORIS)、卫星激光测距技术(SLR)和卫星激光测距技术和甚长基线干涉测量技术 (VLBI)。由于没有一种空间大地测量技术能够提供完整的参考框架定义参数，因此实现的地球参考框架融合了四种空间大地测量技术的优点，同时各技术的缺点和系统误差也得到了缓解。

三个实现的地球参考框架使用来自四种空间大地测量技术提供的相同的输入数据定义了不同的概念的地球参考框架（Angermann 等，2020）。ITRF2014 和 DTRF2014 是基于全球分布站在参考历元的位置和速度的分段线性运动模型，而 JTRF2014 是基于时间序列的框架。两个长期解 ITRF2014 和 DTRF2014 的建立遵循两步法：(1)叠加各空间大地测量技术的时间序列解为各技术的长期解；(2)将四种技术的长期解利用“本地连接”技术综合在一起。

ITRF2014 和 DTRF2014 分别通过解的综合和法方程的综合计算得到（Altamimi 等人，2016；Seitz 等人，2015）。它们对于测站的非线性运动使用不同的模型：ITRF2014 采用震后变形（post-earthquake deformation, PSD）模型描述大地震后的测站变形，而 DTRF2014 采用分段线性模型描述受地震影响的测站位置。此外，在 DTRF2014 的计算中应用了大气和水文非潮汐负荷 (NTL)，而在 ITRF2014 的计算中估计了测站位置的季节性（年和半年）信号。ITRF2014 和 DTRF2014 的尺度平均策略分别为 VLBI 和 SLR 尺度的算术平均和加权平均。地球参考框架使用的不同的综合策略和“本地连接”的综合模型会导致参考框架定义参数

的差异。

3.1.2 IGS 解的介绍

得益于地面大地测量站数量多、分布广泛以及其数据精度的不断提高, 国际 GNSS 服务(IGS)在地球参考框架的实现和加密的过程中发挥着至关重要的作用。地球参考框架的方向定义通常依赖于分布良好的地面测站网, 而其他空间大地测量技术由于地面站的数目和分布有限而无法使用。此外, 当将四种技术综合在一起时, GNSS 站点充当了并址站的连接器, 这得益于 GNSS 站的精确位置和低成本建设。

除了在实现国际地面参考系统(ITRS)中的重要地位外, IGS 维持的基于 GNSS 的地球参考框架, 如 IGb08 和 IGS14, 作为精密轨道确定和变形监测等的参考基准。由于 IGS 基准的实时更新, 在台站位置时间序列中包含了真实的地球物理地壳运动、人为变化和无法解释的变化 (Altamimi 等, 2019) 等非线性变化, IGS 解优于仅包含线性信息的长期解。此外, 在 IGS 解中, 由设备更换或地震等引起的位置不连续性得到了正确的处理。

一个新的地球参考框架的确定需要对大量的历史数据进行分析。国际地球参考框架的更新通常每 5-6 年一次。在最新的 ITRF 和下一个版本 ITRF 产生之间的这段时间里, IGS 解基于应用于核心站子集的最小约束条件, 提供地面站的精确位置。IG2 框架解是基于第二次 IGS 重处理运动(repro2), 为上述三个 ITRF 的实现提供数据处理模型一致的 IGS 输入解(Rebischung 等 2016; Bloßfeld 等 2018)。共有 9 个分析中心(ACs)使用最新可用的模型和方法对 1994 年至 2014 年的 GNSS 数据进行了重新处理和分析。

GNSS 技术估计的地心运动由于轨道模型误差和其他参数(如时钟偏移和对流层参数)的严重相关性而存在偏差 (Dong 等, 2003; Meindl 等 2013; Rebischung 等 2014), 因此 IG2 框架解的原点和方向使用应用于一组核心站的最小约束条件(无净平移、NNT 和无净旋转、NNR)(Petit 和 Luzum, 2010)与 IGb08 对齐; IG2 的尺度利用基于 igs08.atx 中的天线相位中心值定义 (Rebischung 等, 2016; Ray, 等 2016)。2017 年 2 月

28 日之前, IGS 解基于 IGb08 框架; 2017 年 2 月 29 日至 2020 年 5 月 16 日, IGS 解基于 IGS14 框架, 2020 年 5 月 16 日之后 IGS 解与 IGb14 框架对齐。

IGS14 和 IGb14 的定义类似。它们与 ITRF2014 的原点、方向和尺度一致。相比 IGS14, IGb14 框架的建立涉及了额外 9 个测站和 5 年多的数据⁸。目前 IGS 服务中心正在进行 GNSS/DORIS/SLR/VLBI 观测的第三次重处理, 这些重新处理结果将纳入即将完成的版本 ITRF2020 的建立。新的国际地球参考框架相比 ITRF2014, 将包括额外 6 年的观测数据、新的观测站和并址站, 以提高国际地球参考框架的整体精度。

3.1.3 选定的 GNSS 测站网

作为实现 TRF 不可或缺的组成部分, 尤其是 GNSS 地面站的广泛分布和测站位置的精确确定, IGS 解在全球参考框架的时间序列综合中显示出其优越的地位。IGS/IG2 解对来自不同 GNSS 分析中心基于不同的测站网和各自的数据处理策略的常规解进行了综合。IGS 服务中心采用先进的综合策略, 将几个分析中心解中的所有可用信号进行综合, 同时综合的 IGS 时间序列解中的虚假信号也得到抑制。利用 NNT 和 NNR 约束将日解的原点和方向与 IGb08/IGS14 对齐。IGS 实现的参考框架 IGb08 和 IGS14 分别从线性参考框架 ITRF2008 和 ITRF2014 中提取得

到。Helmert 变换是一种典型的参考框架分析方法, 其参数估计可能会受到测站网分布的影响。本研究中选取了 165 个地面站, 组成的测站网分布良好, 测站分布如图 3.1 所示。图 3.2 显示了所选地面站数量随时间的变化情况。测站的选择标准包括两个要点: 参与每日解的测站坐标的连续性和稳定性, 其中所有测站至少包含连续 2 年的数据跨度。

⁸ <https://lists.igs.org/pipermail/igs-mail/2020/007917.html>

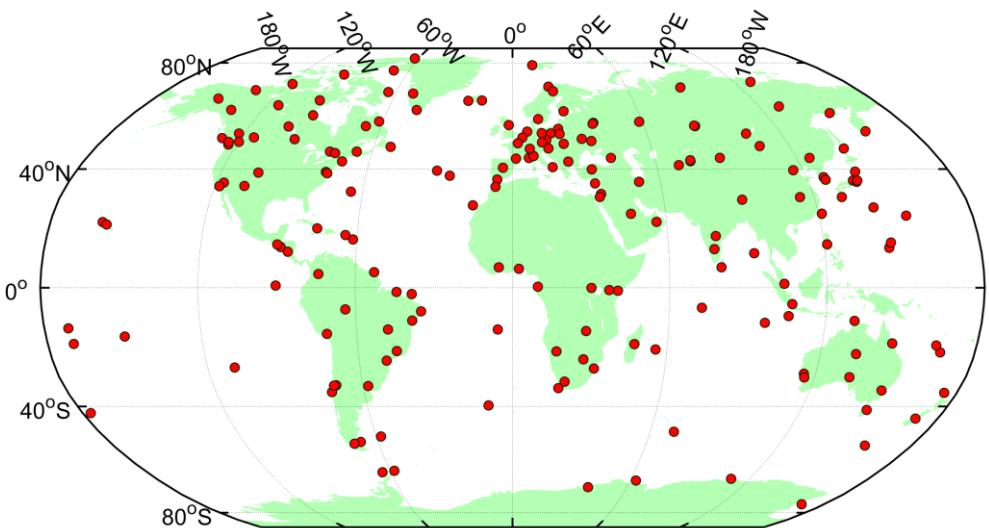


图 3.1 Helmert 变换所涉及的测站分布图

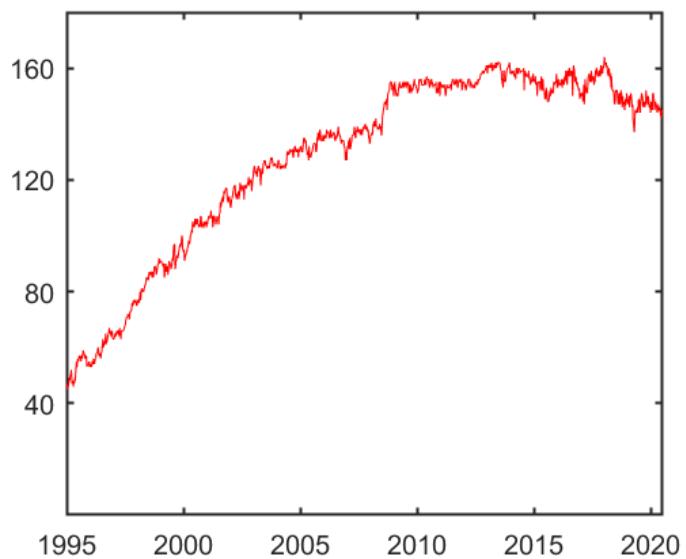


图 3.2 参与比较的测站的数量变化

3.1.4 ITRF2014 与 IGS 的比较

与过去版本的 ITRF 相比, ITRF2014 是一个更优越的版本, 在构建 ITRF2014 的中实现了两个创新 (Altamimi 等人, 2016): 首先, 为受大地震影响的测站提供了线性运动模型加震后形变(PSD)模型; 其次, 在实现技术解阶段对季节性信号(周年和半年)进行估计, 以获得更精确的地面站速度。由于 ITRF2014 精确地模拟了台站位置时间序列的实际轨迹, 因此它被证明是一个更稳健的长期参考框架。

本节选取 1995 年 1 月-2015 年 1 月的 IG2 日解和 2015 年 2 月-2020 年 7 月的 IGS 解与所选站点的 ITRF2014 坐标进行对比, 其中 2015 年 1 月以后 ITRF2014

的测站坐标为基于 ITRF2014 模型的预测。

下文中 IG2 和 IGS 统一称为 IGS。测站 ALBH 和 MIZU 的 IGS 和 ITRF2014 站坐标时间序列如图 3.3 所示。在 2015 年 9 月 15 日, 由于天线的更换, 测站 ALBH 的坐标发生了突变, 而相应的坐标改正无法从 ITRF2014 模型中获取从而导致了测站位置的错误外推。2015 年 1 月以后, 由于 PSD 模型的预测的位置不准确, 导致 ITRF2014 模型中测站 MIZU 的位置误差增加。当与测站 ALBH 和 MIZU 相同情况的测站达到一定数量时, ITRF2014 的准确性会变差。

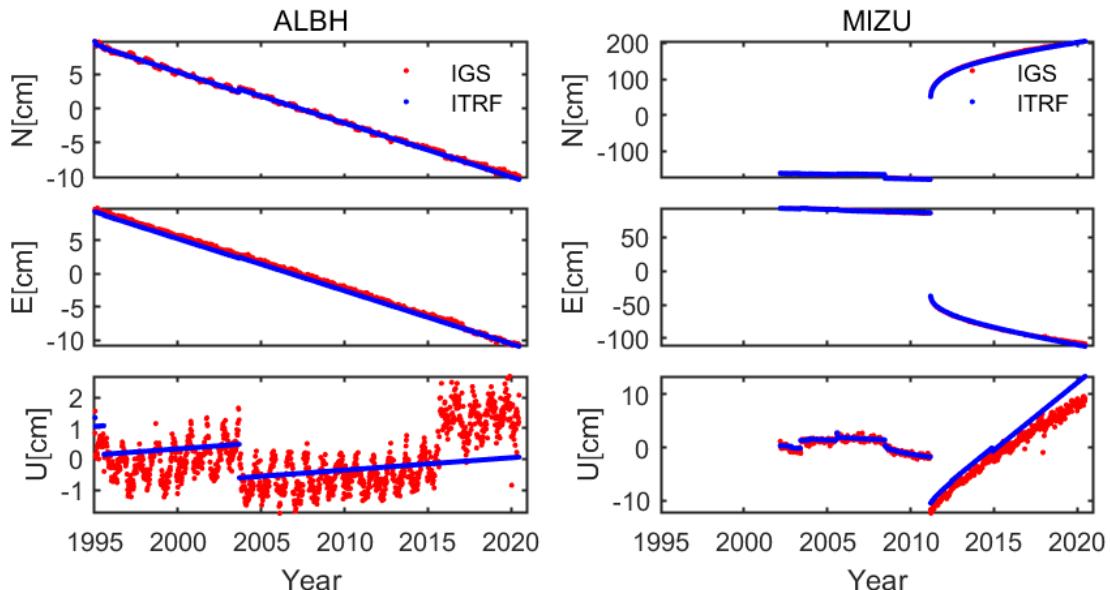


图 3.3 测站 ALBH(左)和 MIZU(右)在 NEU 坐标系下的坐标时间序列。IGS 解的平均值从各坐标分量去除。

为了进一步评估两个线性框架之间的差异, 在它们之间进行了 Helmert 变换。Helmert 变换过程中, N、E 和 U 坐标分量的离群值阈值分别设置为 10、10 和 30mm (Fritsche 等, 2014)。图 3.4 显示了 ITRF2014 和 IGS 解之间估计的平移、旋转和尺度参数的时间序列。发生在 2017 年 2 月的不连续是由于 2017 年 2 月 28 日 IGS 日解由基于 IGb08 切换到基于 IGS14 解算得到。

2017 年 2 月 28 日之前, 在平移参数的时间序列中可以看到 X、Y 分量的非零常量偏移量分别为 -2.16 ± 0.51 mm 和 -1.97 ± 0.59 mm。平移和尺度时间序列中 Z 分量的斜率分别为 0.12 mm/yr 和 -0.03 ppb/yr, 这与 ITRF2014 到 ITRF2008 (Altamimi 等人, 2016) 的转换参数相一致。原因是, 2017 年 2 月 28 日之前, IGS 的原点和方向与 IGb08 对齐, 尺度采用 igs08.atx 中的天线相位中心改正值确定 (Rebischung 等 2016)。

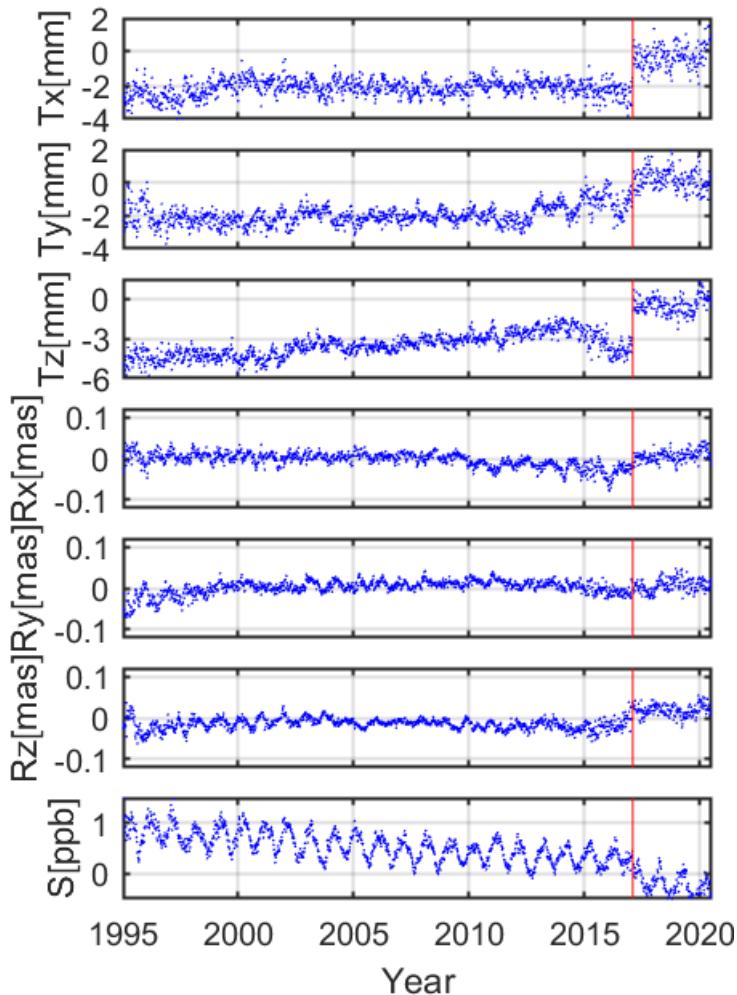


图 3.4 ITRF2014 与 IGS 间的 Helmert 变换参数的时间序列。红色的垂直线表示 IGS 时间序列中的不连续时间点。

平移参数的时间序列中 Z 分量的斜率和尺度参数的斜率都表明, 由于 ITRF2014 中相应改进的特定技术分析策略, 重处理的数据精度得到了提高。在 2015 年 2 月 14 日之前, 由于对连续实现的 ITRF 施加了 NNR 约束, 旋转参数在三个方向上具有可忽略的偏差和时变特征, 因此表明 IGS 解和 ITRF2014 的方向具有很好的一致性。1995 年至 1998 年期间的较大偏差可能是由于 IGS 日解中为最小约束选择的可用的 GNSS 站的几何分布不佳造成的。

为了获得一致的比较结果, 我们使用 [Rebischung 等人 \(2012\)](#) 推荐的两步变换法对 2017 年 2 月 29 日之前的 IGS 解进行了校正, 使其与 IGS14 框架解一致。转换方法如下:

首先, 将天线相位中心改正由 IGb08.atx 到 IGS14.atx 变化的值加到测站上

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{IGb08} + \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix}_{igb08.atx \rightarrow igs14.atx} \quad (3-1)$$

接着, 利用 Helmert 转换公式计算改正后的测站坐标与 IGS14 参考框架的转换参数

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{IGS14} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + T + \lambda \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}_{IGS14} = \begin{bmatrix} \dot{x}' \\ \dot{y}' \\ \dot{z}' \end{bmatrix} + \dot{T} + \lambda \begin{bmatrix} \dot{x}' \\ \dot{y}' \\ \dot{z}' \end{bmatrix} + \dot{R} \begin{bmatrix} \dot{x}' \\ \dot{y}' \\ \dot{z}' \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3-2)$$

其中,

$$R = \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix}$$

此外, 在 2017 年 1 月之后的尺度参数的时间序列中减去 ITRF2014 和基于 igs14 的 IGS 解之间尺度速率差 0.026ppb/yr 所产生的偏移量, 以寻求完整的一致性 (Rebischung 等人, 2016)。框架对齐后的变换参数及其幅度谱如图 3.5 所示。经过校正后, 7 个变换参数的时间序列变得更加一致, 尤其是平移和尺度参数。在 2012 年 10 月至 2017 年 1 月的平移时间序列中仍然存在差异, 其中 X 和 Y 分量的偏移量分别可达 1.8mm 和 2.0mm。这可能是由于在此期间 IGb08 核心站的几何构型退化造成的。

为了研究 ITRF2014 的精度退化程度, 将转化参数的时间序列分为两段: 将 1995 年 1 月至 2015 年 2 月定义为 ITRF2014 的确定期, 2015 年 2 月至 2020 年 7 月定义为 ITRF2014 的外推(预测)期。ITRF2014 与校正的 IGS 解在两个阶段的转换参数时间序列的斜率和标准差如表 3.1 所示。

与确定期相比, 预测期拟合的斜率不可忽略, 尤其是旋转参数的 X、Y、Z 分量的斜率分别为 11.9、5.5、8.4 μ as/yr, 反映了 ITRF2014 方向精度的下降。在平移参数的 Y 和 Z 分量的时间序列中也有明显的漂移斜率。尺度偏差的速率为 -0.038ppb/yr, 这与 ITRF2014 的尺度精度退化有关。

在 IGS 时间序列的所有季节性和交点年信号中, 平移参数的时间序列中振幅最大的周年信号小于 0.24mm, 旋转参数的时间序列中振幅最大的周年信号小于 6.5 μ as。在图 3.5 的最后一张子图中, 约为 0.25ppb 周年幅度的非线性尺度偏差主要来自所选测站网的非线性垂直变形 (Altamimi 等人, 2011; Collilieux 等人, 2010), 还有一小部分来自所采用的卫星天线 z-PCO 值中的缺陷 (Ge 等人 2005)。

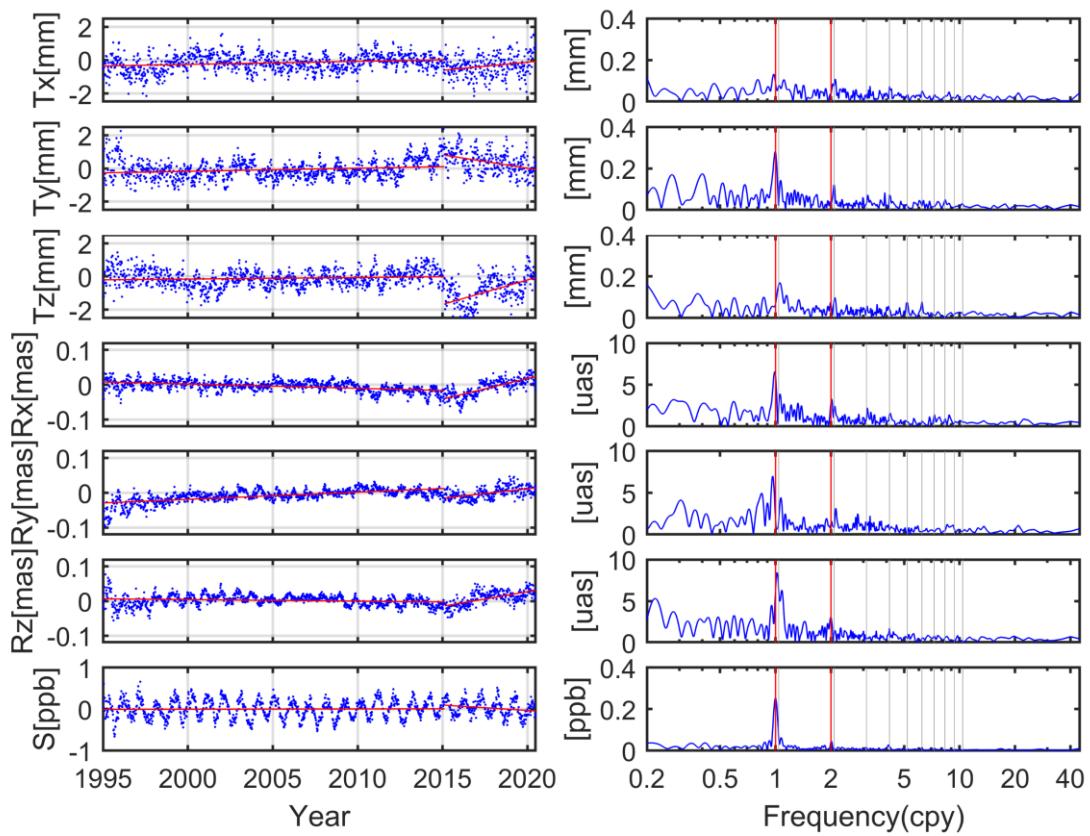


图 3.5 ITRF2014 与校正的 IGS 解之间估计的平移、旋转和尺度偏移量的时间序列及其幅度谱(蓝点); 2015 年 2 月 14 日前后 Helmert 参数的线性趋势曲线(红线)。垂直的灰线表示 GPS 交点年的前 10 个谐波, 两条垂直的红线指示周年和半年信号。

表 3.1 ITRF2014 与校正的 IGS 在 2015 年 2 月 14 日前后估计的转换参数时间序列的趋势和标准差

Period	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz	Scale
	mm/yr			μas/yr			Ppb/yr
Determination	0.02	0.02	0.01	-1.2	2.1	-0.5	0.001
	±0.46	±0.47	±0.46	±11.6	±13.3	±13.2	±0.120
Prediction	0.05	-0.17	0.23	11.9	5.5	8.4	-0.038
	±0.65	±0.57	±0.67	±14.3	±14.4	±15.0	±0.113

注: 尺度参数的标准差为幅值为去除幅度为 0.25ppb 的周年信号后的结果。

3.1.5 DTRF2014 与 IGS 比较

DTRF2014 是由另一个负责 ITRS 实现的综合中心德国大地测量研究所-慕尼黑技术大学 (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut der Technischen Universität München, DGFI-TUM) 提供的, 其构建是基于四种贡献空间技术的法方程的综合, 而不是 ITRF2014 构建中的解的综合 (Angermann 等人, 2020)。DTRF2014 采用分段线性模型和大气水文模型(NTL)描述了测站的非线性运动 (Seitz 等人, 2015); 对受大地震影响的测站采用分段线性模型, 这种处理方式会导致由 DTRF2014 拟合的测站位置在大地震发生后与实际轨道有一定的偏离。

在测站 ASPA 的坐标时间序列 (如图 3.6 所示) 中我们发现 ITRF2014 模型拟合 IGS 坐标时间序列的效果比 DTRF2014 更好, 尤其是在 2014 年 12 月 31 日之后。由于震后响应可能持续数年, 受影响的测站位置将包含与系统误差不同的不规则的误差信号。大多数测站的 DTRF2014 与 IGS 解的坐标时间序列之间同样存在恒定的偏差, 但其偏差值可能与上节 ITRF2014 与 IGS 的比较中有所不同。

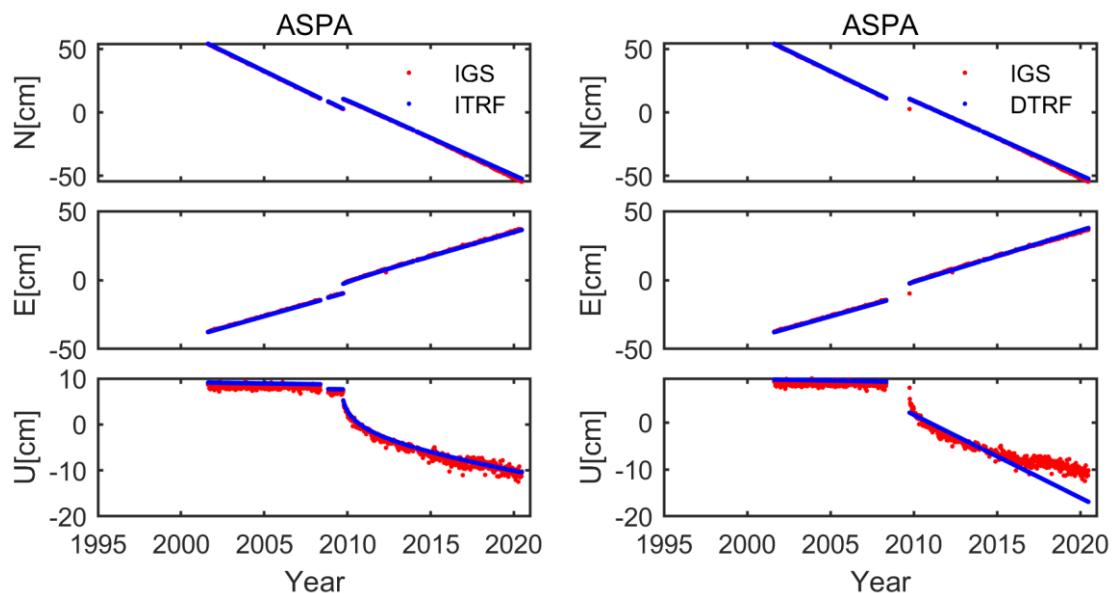


图 3.6 ASPA 测站位置时间序列: ITRF2014 为左, DTRF2014 为右, IGS 解作为对比同时在左和右子图中展示。IGS 解的平均值是从各子图中去除。

我们在 DTRF2014 和校正的 IGS 解的时间序列之间进行了 Helmert 变换, 并采用与前一节相同的异常值排除条件。校正后的变换参数的时间序列及其振幅谱如图 3.7 所示。参照上一节中使用的比较策略, 将 Helmert 参数在 2015 年参考时期分为两个部分。两个阶段转换参数时间序列线性回归产生的斜率和标准差如表 3.2 所示。

DTRF2014 与 IGS 解之间的转换参数时间序列的三个分量在确定期和预测期均表现出明显的线性信号。平移参数的斜率由 0.07、0.11 和 -0.15mm/yr 变化为 -0.17 、 -0.18 和 -0.12mm/yr ；旋转参数的斜率由 -3.6 、 -1.9 和 $2.9\mu\text{as/yr}$ 变化为 15.9 、 -2.3 和 $13.2\mu\text{as/yr}$ ；尺度参数的斜率由 0.007ppb/yr 转变为 -0.005ppb/yr 。对比 ITRF2014 与 IGS 解的比较，DTRF2014 与 IGS 解的变换参数的斜率在两个阶段之间（尤其是平移参数 X 分量和旋转参数的所有分量的时间序列）存在较大差异。虽然在平移参数 Y 和 Z 分量的时间序列中存在复杂的信号，但两者的趋势在一定程度上揭示了 DTRF2014 精度的下降。

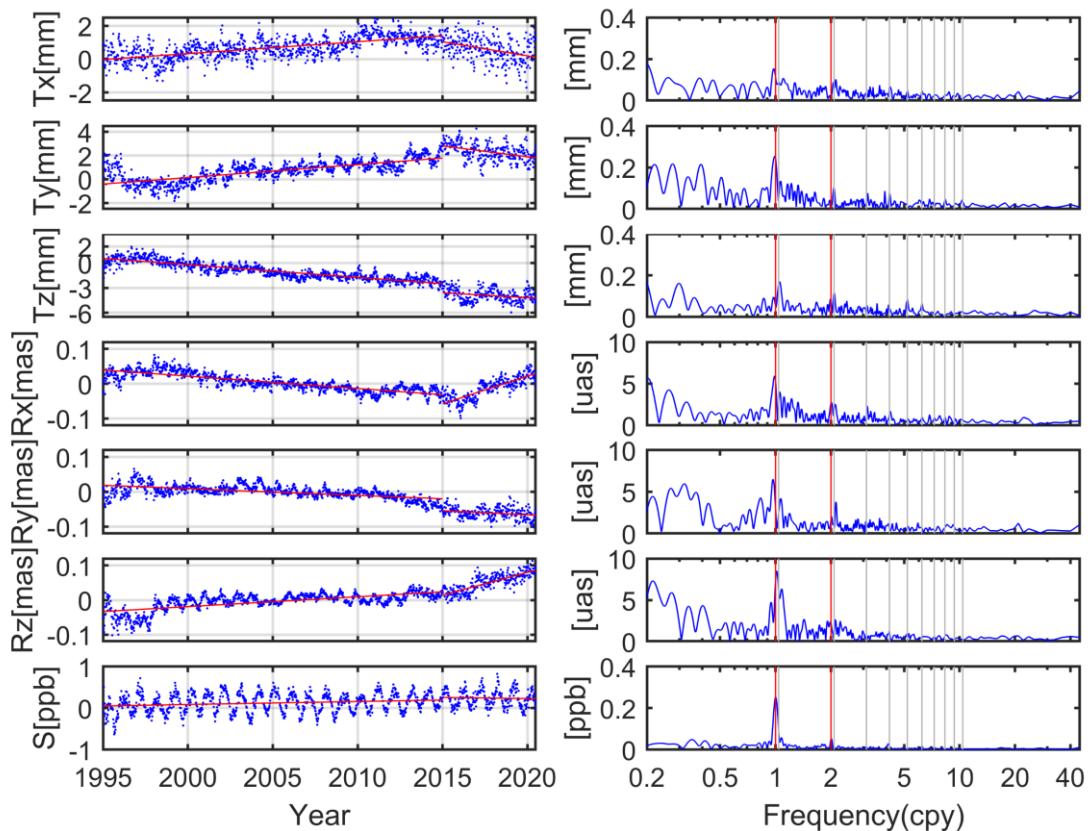


图 3.7 DTRF2014 与校正的 IGS 解之间估计的平移、旋转和尺度偏移量的时间序列及其幅度谱（蓝色）；2015 年前后 Helmert 参数的线性趋势曲线（红线）。垂直的灰线表示 GPS 交点年的前 10 个谐波，两条垂直的红线指示周年和半年信号。

在 DTRF2014 与校正的 IGS 解之间估计的尺度偏差中存在 $0.123 \pm 0.135\text{ppb}$ 的平均偏差和 0.007ppb/yr 的斜率，是平均 VLBI 和 SLR 的尺度时所采用的尺度处理策略和在两种空间大地测量技术的并址站上使用的约束的结果（Moreaux 等人，2020）。尺度偏差中的周年和半年信号幅度分别为 0.25ppb 和 0.05ppb ，与 ITRF2014 和 IGS 时间序列之间的估计值相似。

表 3.2 DTRF2014 与校正的 IGS 解在 2015 年前后估计的变换参数时间序列的趋势和标准差

Period	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz	Scale
	mm/yr			μas/yr			ppb/yr
Determination	0.07	0.11	-0.15	-3.6	-1.9	2.9	0.007
	±0.47	±0.59	±0.47	±14.0	±14.0	±16.4	±0.135
Prediction	-0.17	-0.18	-0.12	15.9	-2.3	13.2	-0.005
	±0.68	±0.65	±0.73	±18.4	±14.8	±16.8	±0.121

注：尺度参数的标准差为幅值为去除幅度为 0.25ppb 的周年信号后的结果。

除了尺度偏差中的非线性信号外，在平移参数时间序列的 X 分量中可以看到小于 0.25mm 的最大谱峰，其他峰在 GPS 交点年的几个谐波中观测到。例如，Z 分量的平移参数在第 6 个谐波和第 7 个谐波处有明显的峰值，X 分量的旋转参数在第 3 次谐波处有明显的峰值。各谱峰的幅值均与 ITRF2014 与 IGS 估算的幅值略有不同，这一点暗示了不同的综合策略和不同的非线性信号处理方式等导致的坐标差异。

3.1.6 JTRF2014 与 IGS 比较

与长期参考架 ITRF2014 和 DTRF2014 不同的是，JTRF2014 是一个基于时间序列的参考框架。通过综合空间大地测量技术（包括 VLBI、SLR、GNSS 和 DORIS）的输入实现的周分辨率的参考框架，其原点是 SLR 测量的准瞬时地球质量中心（Center of Mass, CM）；尺度是由 SLR 和 VLBI 观测结果确定的准瞬时尺度的加权平均值；通过应用 NNR 约束于周分辨率的框架，使得框架的方向按惯例与 ITRF2008 对齐。JTRF2014 作为一种准瞬时参考框架，试图提供参考准瞬时地心位置的测站位置。

图 3.8 显示了 IGS 和 JTRF2014 框架下测站 ALGO 的坐标时间序列，结果表明在两个位置时间序列之间不仅有稳定的偏差，而且周期信号的振幅也不相等。两个站坐标时间序列之间的稳定偏差表示它们之间的长期平均原点偏差。周期信号的振幅在 JTRF2014 与 IGS 的坐标时间序列中不相等是因为 JTRF2014 是一个类历元参考框架，非线性地心运动的短期变化和固体地球表面的季节性变化在准瞬时参考框架 JTRF2014 中得到表示，而 IGS 解中仅包含地球表面的季节性变化。

同样，在 JTRF2014 和校正的 IGS 解之间进行了 Helmert 变换。JTRF2014 为

准瞬时框架, 无法访问 2015 年 2 月以后的时间段; 因此, 本节中只比较 1995 年至 2015 年 2 月的 IGS 解与 JTRF2014 框架解。变换参数的时间序列及其幅度谱如图 3.9 所示。表 3.3 给出了转换参数时间序列的线性回归所产生的偏移量、漂移量和标准差 (STD)。JTRF2014 与校正的 IGS 解之间估计的平移和旋转参数时间序列的周年和半年幅值如表 3.4 所示。

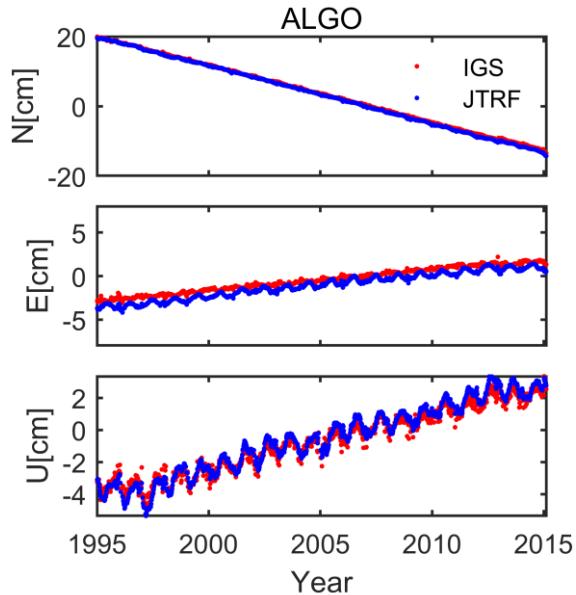


图 3.8 测站 ALGO 的测站坐标时间序列。IGS 解的平均值在各坐标分量上去除

表 3.3 对 JTRF2014 与 IGS 之间估计的转换参数时间序列进行线性回归得到历元 2010.0 处的偏移量和趋势

	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz	Scale
offset	-2.1	-0.6	-0.4	-49.3	-5.2	2.4	0.35
drift	-0.10	0.03	0.33	-5.72	4.25	2.87	0.05
STD	0.99	0.94	1.36	17.2	18.2	18.5	0.25

注: 变换参数的标准差为减去周年、半年信号后的结果。偏移量的平移、旋转、尺度参数的单位分别为 mm、 μ as、ppb; 趋势的平移、旋转和尺度参数的单位分别为 mm/yr、 μ as/yr 和 ppb/yr。

表 3.4 JTRF2014 与 IGS 之间估计的平移和旋转参数时间序列的周年和半年幅值

	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
annual	1.5	3.0	2.4	18.6	9.7	7.5
semiannual	0.6	0.3	1.4	7.1	-	-

注: 平移和旋转参数的周年振幅和半年振幅的单位分别为 mm 和 μ as。

原点

在平移参数时间序列幅度谱的周年和半年频率上可以看到较大的谱峰，它反映了地球物理，更多的是与地球表面质量转移有关，最终在很大程度上反映了季节性地心运动（[Blewitt 等人，2005](#)）。减去周年和半年信号的 JTRF2014 与 IGS 解之间平移参数的时间序列显示在图 3.10 的左面板中，从图中可以看到 Helmert 参数随时间变化不规律，且可以将其分成三个与长期趋势不一致的分段。

对于 Y 分量，平移参数的线性拟合的斜率为零。在长期拟合中，X 和 Z 分量的斜率分别为 -0.10 和 0.33mm/yr 。结果表明，由 SLR 确定的原点不仅是非线性的，而且具有短期变化趋势。因此，在 ITRF2014 和 DTRF2014 的确定中，使用 SLR 观测的长期平均原点来描述固体地球的地心运动是不严谨的，并且会在与地球物理相关的研究中引入不适当的误差。

方向

图 3.9 的第四至第六行是 JTRF2014 与校正的 IGS 解之间评估的旋转偏移量，以及对应的振幅谱。 X 和 Y 分量估计的周年振幅分别为 18.6 和 $9.7\mu\text{as}$ 。此外，在 2011.0 历元前后，旋转参数时间序列的趋势也有明显的转折。因此，[Wu 等人（2015）](#) 设计的 NNR 约束可能不能精确满足 JTRF2014 的方向定义。总体上，IGS 与 JTRF 的方向一致性较差，三个坐标分量上 -5.72 、 4.25 和 $2.87\mu\text{as/yr}$ 呈现的明显的线性趋势是不期望发生的。如何减少季节变化和线性差异是下一各版本的 ITRF 关注的重点。

尺度

图 3.9 所示的尺度偏差时间序列的季节性信号和交点年信号不明显。由于周期信号在 JIRF2014 和 IGS 解这两种历元参考框架中都有表示，因此所选测站网垂直分量的非线性运动消失。在整个尺度偏差的时间序列中，JIRF2014 和 IGS 解的尺度不一致小于 1ppb （在赤道面上约等于 7mm ）。此外，在尺度偏差时间序列中可以注意到一个正的长期线性变化趋势（约 0.05ppb/yr ）。

尺度偏差中显著的变化趋势可能来自 IGN 和 JPL 在平均 VLBI/SLR 信息时采用的尺度处理策略不同。从 SLR 相对于 ITRF2014 的尺度的时间序列中，我们可以清楚地发现随时间变化的尺度高达 10mm ，而 VLBI 相对于 ITRF2014 的尺度变化相对稳定，但显示出较大的噪声。

因此，尺度偏差非线性变化中的绝大部分应该来自于 SLR 的结果。SLR 测

站的数量在周与周之间显示出不稳定的变化（见 Sosnica, 2014 中的图 2.16 和 Zajdel 等人, 2019 中的图 5），从而表现出的几何变化可能是尺度偏差随时间不稳定变化的主要因素 (Altamimi 等人, 2007)。VLBI 和并址站糟糕的几何构型，以及在并址站上施加的约束和权重也是尺度差异随时间的变化趋势的不可忽略的因素。

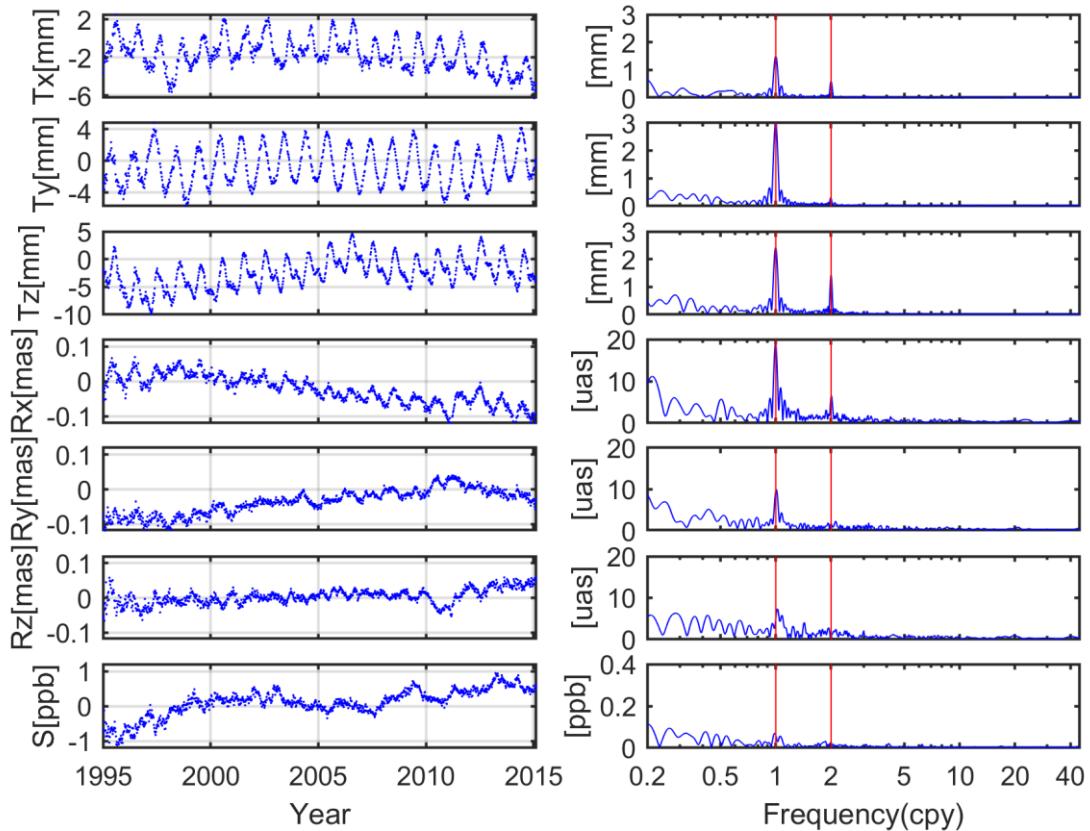


图 3.9 JTRF2014 与 IGS 之间估计的平移、旋转和尺度偏移量的时间序列及幅度谱

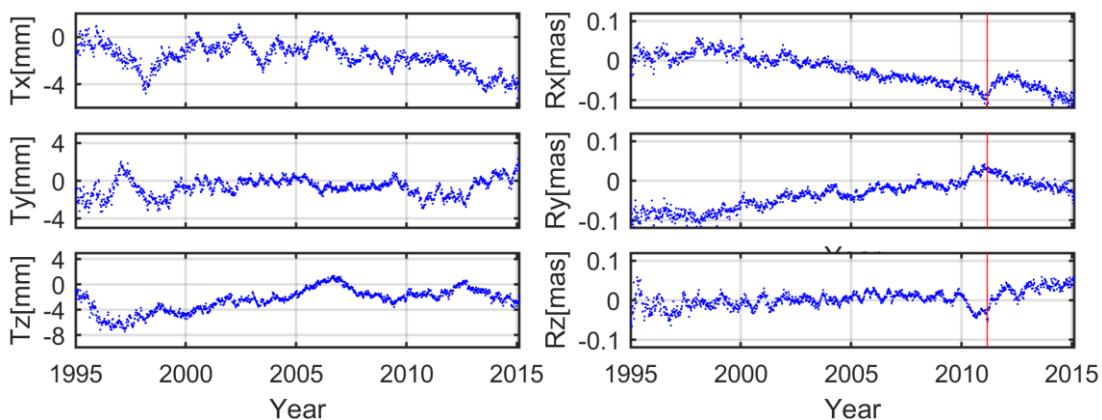


图 3.10 JTRF2014 与 IGS 之间的平移和旋转参数减去周年和半年信号的时间序列

3.2 IGS 各分析中心解与 ITRF2014 的比较

如前所述, IG2 是 IGS 服务中心进行的第二次重处理结果。共有 9 个分析中心参与了此次重处理, 时间跨度为 1994 到 2015。各分析中心在数据处理时使用了最新可用的模型和方法, 因此重处理的产品在整个时间跨度内具有很好的一致性。IG2 是由 9 个分析中心的产品综合得到, 其中三个分析中心 (GRG, ULR 和 GFZ) 的产品在综合时权重为零 (Rebischung 等人, 2016), 因此在与 ITRF2014 的比较中没有展示这三个分析中心与 ITRF2014 的比较。各分析中心参与比较的测站数目时变序列如图 3.11 所示。从图中可以看出, 分析中心 EMR 和 JPL 参与比较的测站数目较少而且在整个时间跨度内比较稳定。分析中心 COD, GTZ, MIT 的测站数目较多且有逐年增长的趋势, 而分析中心 ESA 在 2009 至 2014 年间发生了测站数目突然减少和增加的现象。

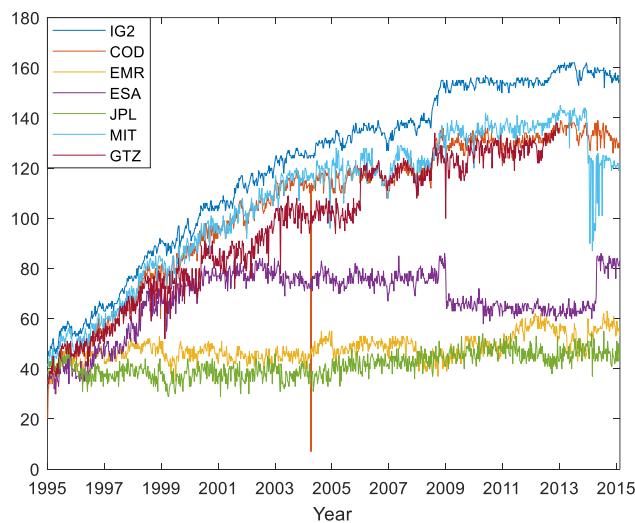


图 3.11 各分析中心参与比较的测站数目时间序列

与 IG2 一样, 所有分析中心第二次重处理解 (repro2) 的参考基准都是与 igb08 对齐的。图 3.12 展示了各分析中心解与 ITRF2014 的平移参数时间序列。相比其他分析中心, EMR, JPL 和 MIT 的平移参数中富含明显的周期特征, 尤其 MIT Z 方向的周年幅度值高达 5mm, 由卫星轨道误差导致的交点年信号也非常显著 (Ray 等人, 2008); 各分析中心解的方向参数与 ITRF2014 具有较好的一致性 (如图 3.13 所示), 除 ESA 外, 其他分析中心的最大峰值均小于 10uas; 尺度参数 (如图 3.14 所示) 中各分析中心的周期特征迥异, 各分析中心间的最大峰值差异小于 0.04 ppb (约等于 0.28mm), 与测站分布几何构型高度相关 (Altamimi 等人, 2011; Collilieux 等人, 2010)。

由表3.5和表3.6线性回归拟合参数可知,各分析中心解的原点与ITRF2014的原点间的偏差存在较大差异,这是由于GNSS解对地心位置不敏感和轨道模型误差联合产生的结果(Meindl等人,2013; Rebischung等人,2014);各分析中心解与ITRF2014的方向参数的一致性小于3uas/yr;尺度参数的长期线性特性较为一致,小于0.006ppb/yr。

表3.5 各分析中心与ITRF2014转换参数在历元2010.0处的偏差值

	IG2	COD	EMR	ESA	JPL	MIT	GTZ
T_X	-2.0	-2.3	0.6	-1.4	-1.0	1.4	-2.5
T_Y	-2.0	-2.1	-1.7	-1.5	2.0	-2.9	-2.1
T_Z	-3.0	-3.8	2.5	-4.0	4.6	2.6	-3.9
R_X	-6	-4	-17	-12	-9	-15	1
R_Y	11	10	12	18	14	3	13
R_Z	-14	-13	-1	-10	-7	3	-3
Scale	0.41	0.39	0.56	0.42	0.43	0.43	0.43

注: 平移参数的单位为mm, 旋转参数的单位为uas, 尺度参数的单位为ppb。

表3.6 各分析中心与ITRF2014转换参数在整个数据长度上的拟合斜率

	IG2	COD	EMR	ESA	JPL	MIT	GTZ
T_X	0.02	0.00	0.20	-0.13	0.36	0.52	0.03
T_Y	0.02	0.00	0.02	0.18	-0.39	-0.44	0.02
T_Z	0.12	0.11	-0.10	0.32	-0.18	-0.08	0.02
R_X	-1.0	0.0	-3.3	0.5	-0.9	-1.9	-0.3
R_Y	1.6	1.4	0.8	9.3	2.0	1.3	3.3
R_Z	0.1	-1.0	-0.6	-12.7	0.0	2.2	-0.7
Scale	-0.031	-0.036	-0.025	-0.039	-0.033	-0.028	-0.028

注: 平移参数的单位为mm/yr, 旋转参数的单位为uas/yr, 尺度参数的单位为ppb/yr。

对比几个分析中心解与ITRF2014的转换参数可以看出,分析中心COD与几个分析中心的综合解IG2的一致性最好。另外,尽管在如EMR, JPL, MIT三个分析中心的平移参数中存在显著的交点年信号,综合后的IG2解中周年信号和交点年信号都得到了很好的抑制。如前文所述,IG2与IGb08具有很好的一致性。由此表明,在将各分析中心解综合为IG2时所使用的综合策略和解算模型都是非常可靠的。

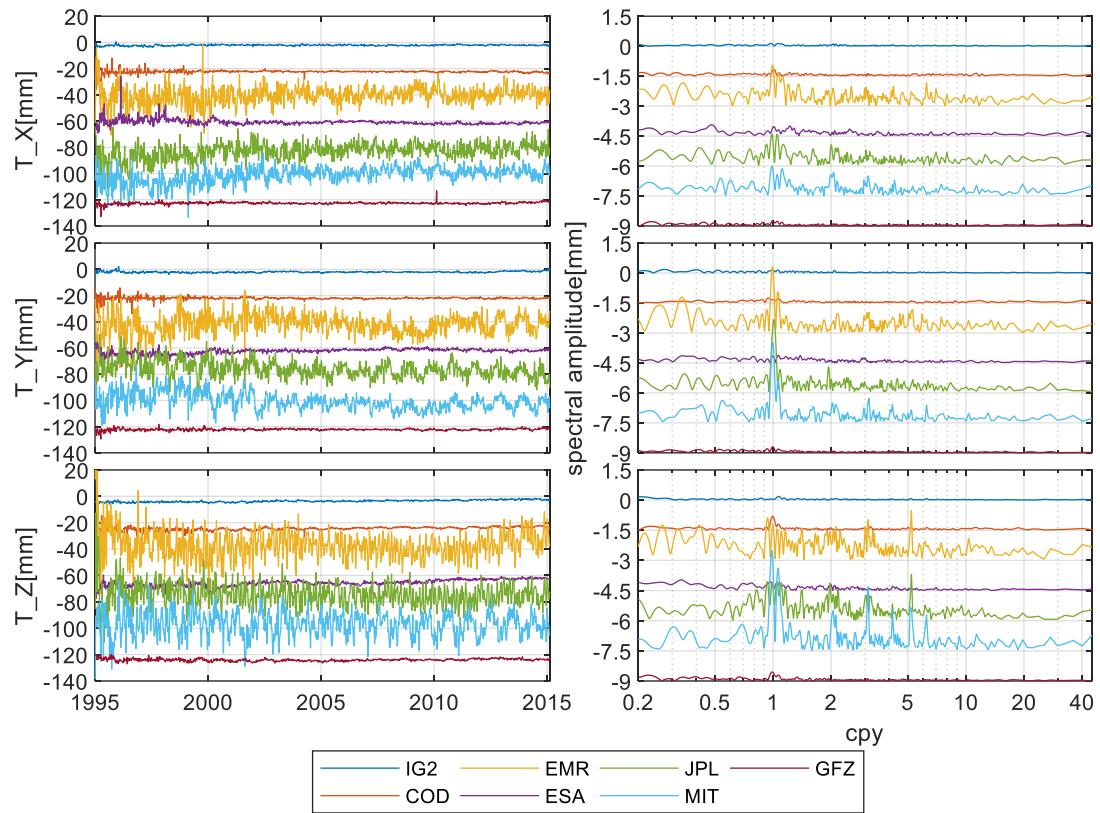


图 3.12 各分析中心与 ITRF2014 比较的平移参数时间序列及幅度谱

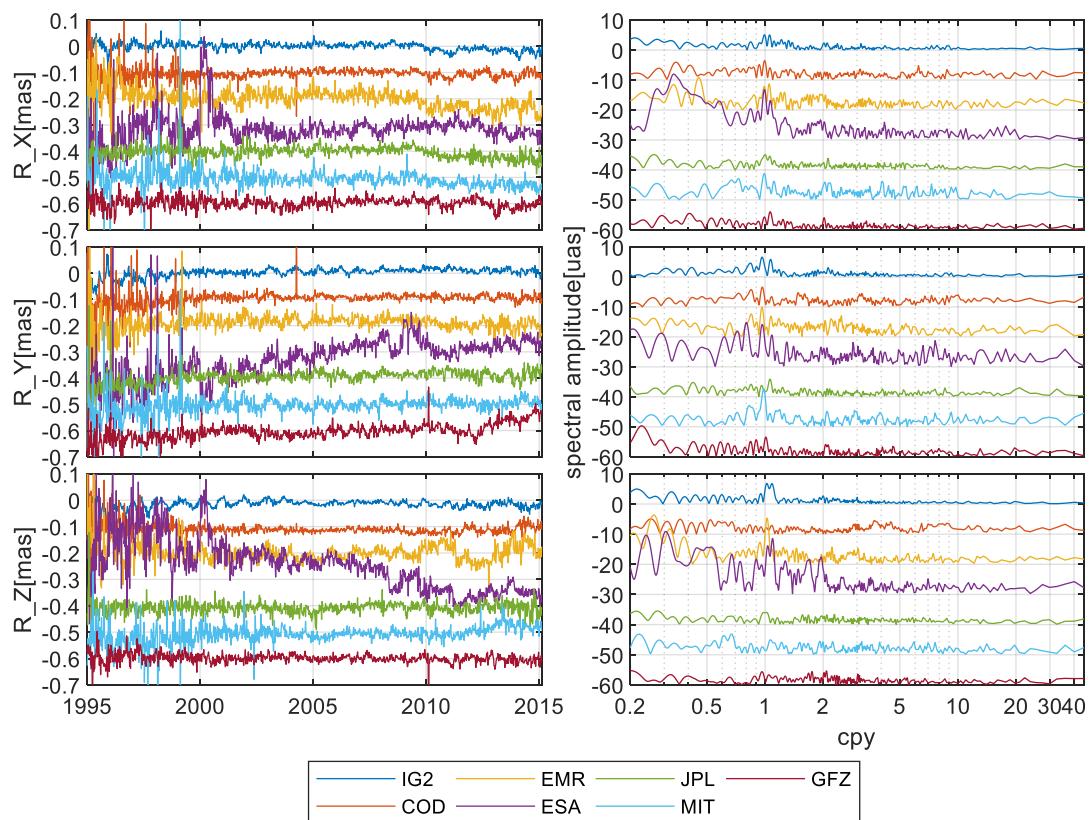


图 3.13 各分析中心与 ITRF2014 比较的旋转参数时间序列及幅度谱

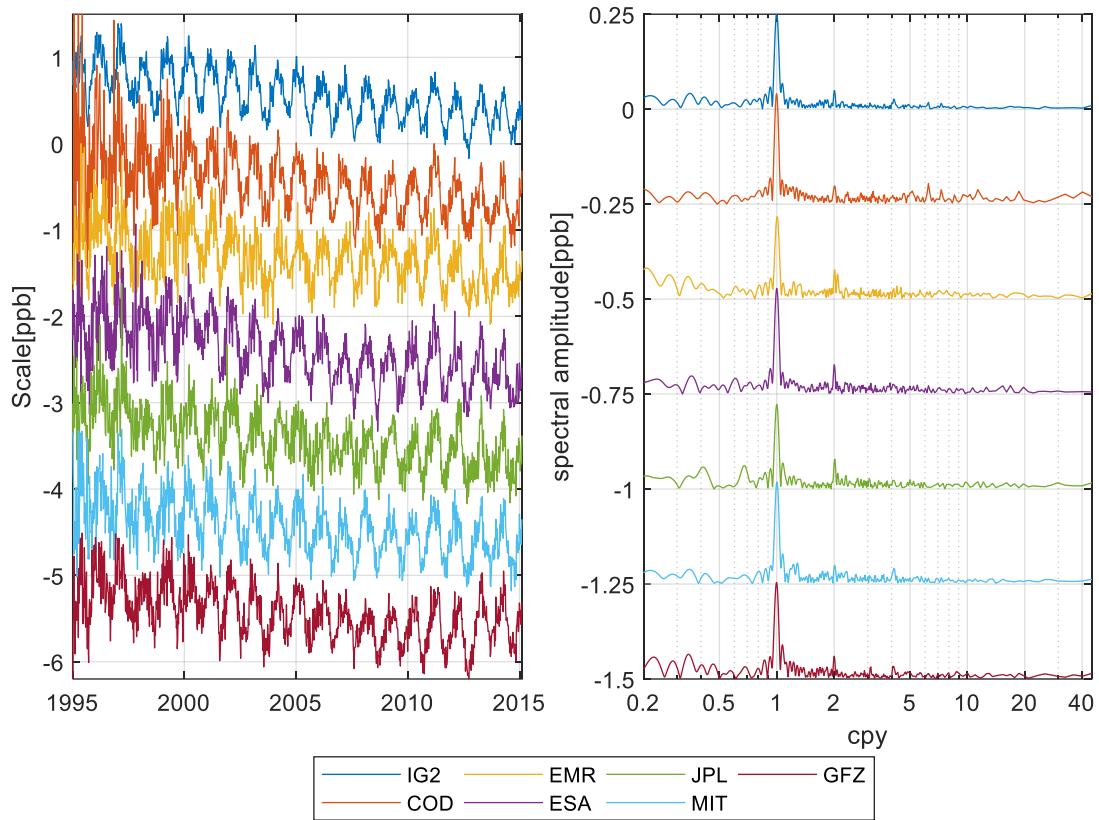


图 3.14 各分析中心与 ITRF2014 比较的尺度参数时间序列及幅度谱

3.3 本章小结

最新实现的三个 ITRF, ITRF2014、DTRF2014 和 JTRF2014, 被认为是迄今为止实现的最准确的 TRF。本章的第一节以 1995 - 2020 年连续 IGS 位置时间序列为参考, 采用 Helmert 变换方法研究了上述三个参考框架的特征。主要结论如下:

- 1) IGS 解的基准维持依赖于应用于核心站子集的最小约束条件。由于用于将 IGS 解与特定框架对齐的核心站数目的减少, 框架对齐后的 IGS 解与 ITRF2014 在 Y 分量和 Z 分量的原点差异分别达到 1.8mm 和 2.0mm;
- 2) 由于 ITRF 中部分参数未模型化和所建模型存在一定的误差, ITRF2014 的方向与定义方向(即 ITRF2008 的方向)的分别以 11.9、5.5 和 $8.4\mu\text{as/yr}$ 的速度偏离, ITRF2014 的尺度以 -0.038ppb/yr 的速度偏离定义的尺度;
- 3) 对比 DTRF2014 和 IGS 解, X/Y 方向的原点率参数和 X/Z 方向的方向率参数在确定和预测期表现出明显的差异, 其中 X/Y 原点率参数从 0.07, -0.11mm/yr 转变为 -0.17 、 -0.18mm/yr , X/Z 方向率由 -3.6 、 $2.9\mu\text{as/yr}$ 转变

为 15.9 、 $13.2\mu\text{as/yr}$;

- 4) 对于 JTRF2014, 其 X、Y、Z 分量上原点差异的周年信号分别可达 1.5 、 3.0 和 2.4mm , 其随时间的变化趋势与长期趋势不一致。此外, 除了 X 和 Y 分量上存在较大的线性差异和季节性信号外, 方向参数发生了明显的趋势切换。尺度偏移量随时间的变化特征可能与 SLR 地面测站网周与周之间存在的差异, 以及用以综合 SLR 与 VLBI 的“本地连接”和权重有关。

本章第二节以 ITRF2014 为参考基准, 分析了贡献于 IGS 服务中心第二次重处理解的 6 个分析中心的原点, 方向和尺度的特性。结果表明:

- 1) 各分析中心的原点间差异较大, 其中 EMR, JPL, MIT 三个分析中心的原点中包含了显著的季节性信号以及 GPS 交点年信号;
- 2) 各分析中心的方向一致性较好 (小于 $3\mu\text{as/yr}$), 这一点得益于各分析中心的测站分布良好;
- 3) 各分析中心的尺度一致性小于 0.006ppb/yr 。在比较的尺度参数中体现出来的不相等的周年、半年幅度值与各分析中心的测站网分布有关;
- 4) 综合后的 IG2 与 IGb08 具有良好的一致性, 体现出综合策略的可靠性。

第4章 坐标时间序列分析

GNSS 目前广泛应用于地球表面的动态变形研究和作为基本输入参与地球参考框架的建立。它们的研究对象主要为分布在地球表面的测站坐标。由不同分析中心和不同软件利用不一致的误差改正模型解算的测站坐标时间序列中不可避免地存在除随机误差外还包含未模型化和模型不精确产生的误差 (Ray 等, 2013)。对 GNSS 时间序列进行分析, 有助于地球表面的形变的量化, 从而为研究随时间变化的地球物理过程, 如冰期后反弹 (Johansson 等, 2002)、震后形变 (Dragert 等, 2001; Miller 等, 2002)、季节性形变 (Dong 等, 2002) 以及不连续性变形 (Bock 等, 2004; Ohtani 等, 2004) 等, 提供基础信息。

4.1 坐标时间序列的基本模型

对 GNSS 测站坐标时间序列而言, 通常其中包含长期的线性运动、周期运动, 对于受地震影响的测站还包含同震和震后形变。此外, 测站坐标随着设备更换也会发生不连续性变化。某一个 GNSS 站坐标的分量, 一般可使用下列模型来表示:

$$\begin{aligned}
 y(t_i) = & a + b \cdot t_i + c \cdot \sin(2\pi t_i) + d \cdot \cos(2\pi t_i) + e \cdot \sin(4\pi t_i) + f \cdot \cos(4\pi t_i) \\
 & + \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - T_{eq}) + \sum_{j=1}^{n_k} h_j H(t_i - T_{post}) t_i \\
 & + \sum_{j=1}^{n_h} k_j \log(1 + (t_i - T_{post}) / \tau_i) H(t_i - T_{post}) \\
 & + \sum_{j=1}^{n_l} l_j \exp(-(t_i - T_{post}) / \tau_i) H(t_i - T_{post}) + \nu_i
 \end{aligned} \quad (4-1)$$

式中, t_i 表示单位为年的观测历元; 系数 a 和 b 分别表示测站坐标时间序列起始位置和速度; 系数 c 和 d 表示周年运动的幅度值; e 和 f 表示半年运动的幅度值; $H(*)$ 表示阶跃函数; 系数 g_j 表示地震发生时刻 T_{eq} 测站坐标发生的突变值, h_j 表示地震发生之后测站速度的变化率, k_j 表示在震后 T_{post} 时刻松弛或者滑移位移大小, l_j 表示在震后 T_{post} 时刻松弛或者滑移位移大小; τ_i 表示测站震后松弛时间常数; ν_i 表示测量误差。

对于某一特定地震, 地震发生时刻和震后时间是已知的, 也就是 T_{eq} 和 T_{post} 已知。测站震后松弛时间常数 τ_i 的最佳值可以利用模型不拟合度最小值来确定。

式(4-1)中的参数的最佳估值可以利用最小二乘估计求解, 其观测方程可写作:

$$y = Bx + \epsilon \quad (4-2)$$

其中, $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$, $x = [a, b, c, d, e, f, g, h, k]^T$, $\epsilon = [v_1, v_2, \dots, v_n]^T$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & t_1 \sin(2\pi t_1) \cos(2\pi t_1) \sin(4\pi t_1) \cos(4\pi t_1) H(t_1 - T_{eq}) H(t_1 - T_{post}) t_1 \exp(-(t_1 - T_{post})/\tau_1) H(t_1 - T_{post}) \\ 1 & t_2 \sin(2\pi t_2) \cos(2\pi t_2) \sin(4\pi t_2) \cos(4\pi t_2) H(t_2 - T_{eq}) H(t_2 - T_{post}) t_2 \exp(-(t_2 - T_{post})/\tau_2) H(t_2 - T_{post}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_n \sin(2\pi t_n) \cos(2\pi t_n) \sin(4\pi t_n) \cos(4\pi t_n) H(t_n - T_{eq}) H(t_n - T_{post}) t_n \exp(-(t_n - T_{post})/\tau_n) H(t_n - T_{post}) \end{bmatrix}$$

构建误差方程和随机模型如下:

$$\begin{cases} V = B\hat{x} - y \\ D = \sigma_0^2 Q = P^{-1} \end{cases} \quad (4-3)$$

根据最小二乘理论, 误差方程对应的法方程为:

$$B^T PB\hat{x} = B^T Py \quad (4-4)$$

各个待估参数的估值为

$$\hat{x} = (B^T PB)^{-1} B^T Py \quad (4-5)$$

4.2 基于精密单点定位技术的测站坐标时间序列

精密单点定位 (Precise point positioning, PPP) 是指利用单台双频接收机的观测数据, 结合国际 GNSS 服务组织提供的或自己解算得到的精密卫星轨道与精密卫星钟差产品, 综合考虑各项误差模型的精确改正, 利用伪距与载波相位观测值实现单站定位, 获取该接收机在地心地固坐标系中精确坐标的方法。精密单点定位获取的坐标精度与所采用的精密卫星轨道与精密卫星钟差产品有关, 两者位于同一地球参考框架下。利用 IGS 组织提供的精密轨道及精密钟差产品进行精密单点定位时, 所获取的测站坐标是位于 IGS 坐标参考框架下。IGS 框架是与最新版本的 ITRF 框架保持一致。因此, 利用精密单点定位技术可直接获得与 ITRF 一致的高精度测站坐标。将精密单点定位技术用于高精度坐标参考框架的维持, 可以克服 GNSS 网解计算量大的问题, 从而提高了数据处理效率。

精密单点定位技术是一个全球尺度的定位技术, 只需要全球少量稀疏分布的测站确定精密的卫星轨道和卫星钟差产品, 就能够维持全球静态厘米级, 动态厘米到分米级的定位服务。与多站网解相比, 精密单点定位用户在进行测量应用之前不需要建立基准站, 在保证解算精度的同时, 实施灵活方便, 能够有效减少作业负担, 简化作业模式, 减少测量费用。此外, 与基于双差观测值的数据处理策略相比, 精密单点定位技术采用非差观测值, 数据利用率更高。精密单点定位技术利用高精度的载波相位观测值, 以及精密的精密轨道和精密钟差产品, 并对影

响定位结果的各种误差进行改正，从而获取高精度定位结果。

与基于伪距观测值的定位方式不同，利用载波相位观测值进行定位存在着整周模糊度确定的问题（Kouba, 2015）。同时，由于卫星端和接收机端初始相位偏差以及硬件延迟偏差与整周模糊度参数难以分离，使得非差观测方程中的模糊度参数为实数值，也即卫星端和接收机端硬件延迟偏差与初始相位偏差被模糊度参数吸收。精客单点定位模糊度固定的关键是问题是，分析接收机端和卫星端相位未校准硬件延迟对模糊度参数的影响，通过有效的估计或分离方法将导致模糊度参数非整数的小数偏差与实数模糊度分离，恢复模糊度的整数特性，搜索并固定模糊度，实现精客单点定位的模糊度固定解，从而提高定位精度。

4.2.1 精客单点定位的函数模型

建立正确的函数模型与随机模型是利用精客单点定位获得最优解的前提，函数模型描述观测值与待估参数之间的函数关系，随机模型则反应了观测值的统计特性。精客单点定位的观测量主要有测码伪距和载波相位两种。设 L1 和 L2 载波上的测码伪距与相位观测值（距离单位）依次为 P_1 、 P_2 、 Φ_1 、 Φ_2 ，根据不同的组合（或非组合）方式，可以构建不同的 PPP 模型。常用的 PPP 模型为无电离层组合模型。

无电离层组合模型是精客单点定位中最为常用的函数模型，其简化形式为：

$$\begin{aligned} P_{IF} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2 \\ &= \rho + c \cdot (dt_r - dt^s) + d_{trop} + d_{hd(P(L_1, L_2))}^s \\ &\quad - d_{r(hd(P(L_1, L_2)))} + d_{mult(P(L_1, L_2))} + \varepsilon_{P(L_1, L_2)} \end{aligned} \quad (4-6)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{IF} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_2 \\ &= \rho + c \cdot (dt_r - dt^s) + d_{trop} + N_{IF} + B_{IF} + d_{hd(\Phi(L_1, L_2))}^s \\ &\quad - d_{r(hd(\Phi(L_1, L_2)))} + d_{mult(\Phi(L_1, L_2))} + \varepsilon_{\Phi(L_1, L_2)} \end{aligned} \quad (4-7)$$

其中

$$N_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_1 N_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_2 N_2 \quad (4-8)$$

$$B_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_1 [\phi_r(t_0, L_1) - \phi^s(t_0, L_1)] - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_2 [\phi_r(t_0, L_2) - \phi^s(t_0, L_2)] \quad (4-9)$$

上式中, P_{IF} 、 Φ_{IF} 为无电离层组合的伪距和相位观测值 (m); f_1 、 f_2 分别为 L1 和 L2 载波相位观测值频率 (Hz); λ_1 、 λ_2 分别为 L1 和 L2 载波相位波长 (m/周); N_1 、 N_2 分别为 L1 和 L2 载波相位观测值模糊度 (周); ρ 为卫地距 (m); c 为真空中光速 (m/s); dt_r 、 dt^s 分别为接收机以及卫星钟差 (s); d_{trop} 为对流层延迟误差 (m); N_{IF} 为双频无电离层组合模糊度 (m); B_{IF} 为双频无电离层组合初始相位偏差 (m); Φ^s 、 Φ_r 分别为卫星端和接收机端初始相位偏差 (周); d_{hd}^s 、 $d_{r(hd)}$ 为卫星端和接收机端伪距硬件延迟误差 (m); d_{multi} 为组合伪距观测值多路径效应 (m); ϵ 为组合观测值噪声及未被模型化误差 (m)。

该模型通过双频组合消除电离层延迟低阶项。硬件延迟偏差是由卫星和接收机端的元器件引起的, 它对所有频率和所有通道的卫星信号具有相同的影响, 在定位过程中可被接收机钟差吸收。但卫星端的初始相位偏差则会被模糊度参数吸收, 在浮点解中一般不予考虑。对于一些其他的系统误差, 如卫星/接收机端天线相位中心偏差、相位缠绕、相对论效应、固体潮与海洋潮、地球自转 (Sagnac 效应) 等因素引起的误差可采用现有的模型精确改正, 对于其他难以精确模型化的误差, 如对流层延迟湿分量, 则附加参数进行估计; 多路径效应及观测噪声则主要通过随机模型来控制。

4.2.2 软件介绍

目前已经有很多 GNSS 精密定位软件, 包括 Bernese (Dach, 2015)⁹、GAMIT (Herring, 2006)¹⁰、RTK_LIB (Takasu, 2010)¹¹、gLAB (Hernandez, 2010)¹²、PANDA (Shi C, 2008; Li M, 2014) 等, 这些软件静态定位精度在 1-2cm 甚至 mm 级。本文中使用的精密单点定位软件 Net_diff 是由上海天文台 GNSS 高精度数据

⁹ <http://www.bernese.unibe.ch/>

¹⁰ <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/index.html>

¹¹ <http://www.rtklib.com/>

¹² <http://www.gage.es/gLAB>

处理分析中心开发的高精度定位软件¹³。其中涉及的各项参数和算法遵循各系统和 IGS 定义的框架及标准, 能实现包括 GPS、GLONASS、Galileo、BDS、IRNSS、QZSS 等系统的伪距/精密单点定位、多站网解以及 PPP RTK。

在精密单点定位时使用的配置参数见表 4.1。

表 4.1 Net_diff 精密单点定位配置参数

	滤波器	卡尔曼滤波
模型改正	观测值	GPS: L1&L2, GLONASS: L1&L2, BDS: B1&B3, Galileo: E1&E5a
	数据采样率	30s
	截止高度角	10
	观测值权重	高度角定权
	观测噪声	相位 1cm; 伪距: 1m
	卫星轨道	固定为 IGS 精密轨道 (Kouba, 2015)
	卫星钟差	固定为 IGS 精密钟差 (Kouba, 2015)
	相位缠绕	模型改正 (Wu J T, 1991)
	地球形变改正	IRES 协议 (IERS Conventions (2010))
	天线相位改正	igs14.atx
估计参数	电离层改正	无电离层组合
	对流层改正	初值: GPT2w+SAAS+VMF1 (Boehm, 2015), 湿延 迟剩余部分作为参数估计
	测站坐标	静态: 常数; 动态: 白噪声。先验信息: 10km
	测站钟差	白噪声, 先验信息: 1ms
	对流层天顶湿延迟	随机游走, 1cm/sqrt(h), 先验信息: 0.1m
	模糊度	分段常数, 浮点解, 先验信息: 20m

4.2.3 数据介绍

本节中选取了分布全球的 130 个测站的 GPS 数据作为研究对象, 时间跨度为 2010 年-2020 年共 11 年的数据长度, 利用 IGS 精密星历和钟差产品进行精密单点定位解算。测站分布如图 4.1 所示。

¹³ http://center.shao.ac.cn/shao_gnss_ac/

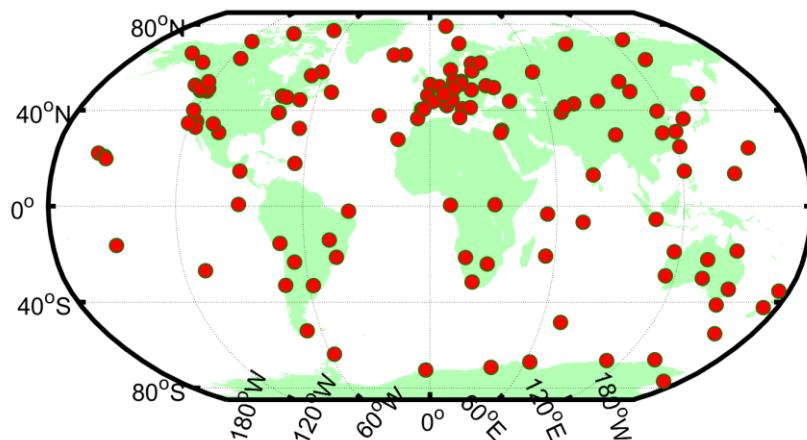


图 4.1 应用于时间序列分析的测站分布图

4.2.4 一致性分析

以 IGS 服务中心的第三次重处理解（简称 IG3）为参考对基于精密单点定位技术的测站坐标时间序列进行分析。采用第 3 章中介绍过的 Helmert 转换方法和一致的阈值标准进行分析，获得的七个转换参数（原点、方向和尺度）的时间序列如图 4.2 所示。表 4.2 统计了平移、旋转和尺度 7 个转换参数时间序列的线性和周期信号的拟合值。

由图 4.2 和表 4.2 中的结果可知，基于精密单点定位技术的原点与 IG3 相比，在 X 和 Z 坐标轴方向上的周期性信号和趋势项都比较明显，周年幅度值分别为 0.5、1.0mm，趋势项分别为 0.10、0.16mm/yr；二者之间具有非常好的方向一致性，在 X、Y、Z 三个坐标轴方向上分别为 1.4、1.8、0.4μas/yr；尺度参数存在的差异则比较大，主要表现为在历元 2010.0 时刻的偏差值为 1.4ppb，再加上 0.01ppb/yr 的变化率使得二者之间的尺度差异逐渐增大，这一点主要源于在第三次重处理时基于新建的参考框架 IGSR3，IGSR3 与 IGS14 的差异主要在于测站坐标上天线相位中心的改正。

表 4.2 基于精密单点定位技术的测站坐标与 IG3 解之间估计的平移、旋转和尺度偏移量的线性和周期拟合参数

	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz	Scale
offset	-0.6	0.0	-2.2	1.2	-20.1	-8.3	1.4
drift	0.10	0.03	0.16	1.4	1.8	0.4	0.01
STD	0.92	0.76	1.03	23.9	23.2	31.9	0.12
Annual-amplitude	0.5	0.2	1.0	17.98	-	8.4	0.13

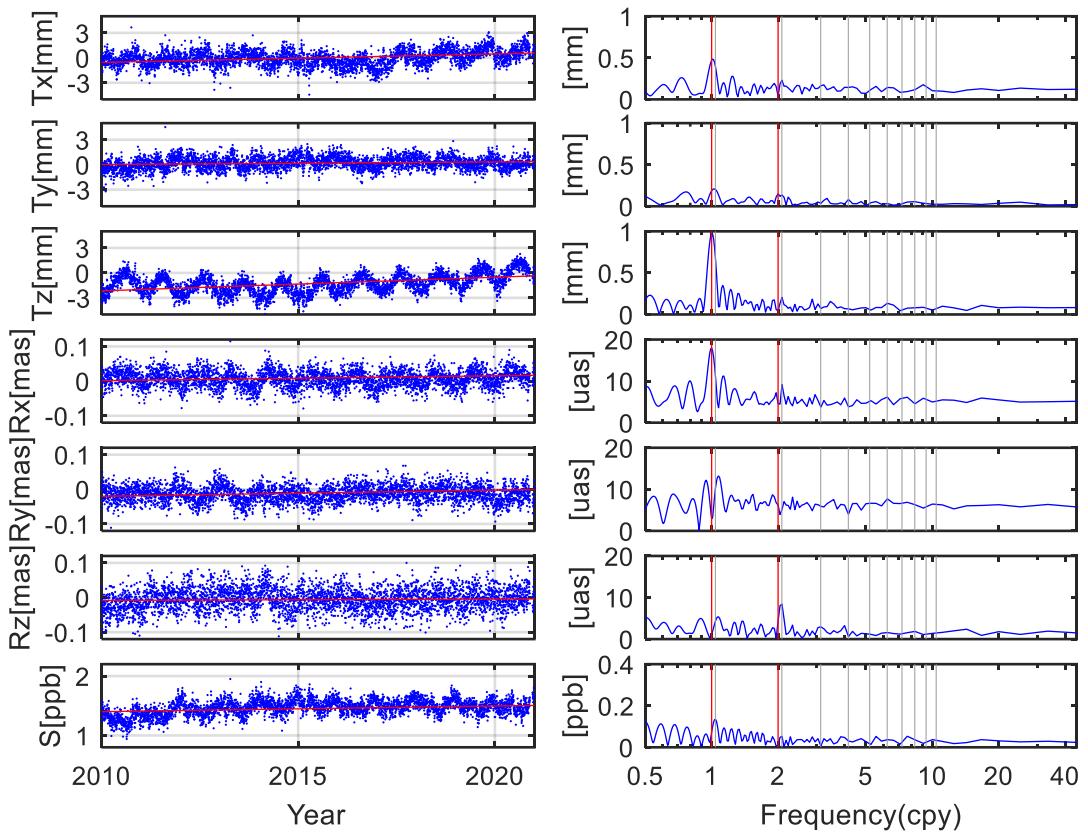


图 4.2 基于精密单点定位技术的测站坐标与 IG3 解之间估计的平移、旋转和尺度偏移量的时间序列及其幅度谱(蓝点); Helmert 参数的线性趋势曲线(红线)。垂直的灰线表示 GPS 交点年的前 10 个谐波, 两条垂直的红线指示周年和半年信号。

4.3 坐标时间序列模型应用

4.3.1 速度场

在测站坐标时间序列中固有且在地球参考框架中不可忽视的信号是随时间变化的线性信号, 因此测站坐标时间序列中线性参数的准确估计是非常关键的。利用公式(4-1)所示的时间序列模型对基于精密单点定位技术所选取的 130 个测站坐标时间序列在 N、E、U 三个方向上分别进行最小二乘估计。估计的参数 b 即为我们所关心的测站运动的速度, 以天为单位共 11 年的测站位置解算的 130 个测站的水平速度场和垂直速度场分别如图 4.3 和图 4.4 所示。作为参考和比较, 每幅图中红、绿、蓝色箭头依次为基于精密单点定位技术、IGS 解和 IGb14 框架所获得的速度场。从图中不难发现, 基于精密单点定位技术解算的速度场与 IGS 解及 IGb14 的速度场具有很好的一致性。表 4.3 和表 4.4 分别统计了基于精密单点定位技术和 IGS 解获得的速度场与 IGb14 速度场的比较(剔除差值大于 5mm/yr

的测站, 分别剔除的测站数为 6 和 4, 认为对统计结果产生的影响较小), 图 4.5 中展示了两类解与 IGb14 的速度场差异。由图 4.5 和表 4.3、表 4.4 中的统计结果表明, 基于精密单点定位技术获得的速度场与 IGS 解获得的速度场精度相当, 在 N、E、U 三个方向上的差异均小于 0.1mm/yr 。两类解的速度场精度在 N、E、U 三个方向上均优于 1mm/yr 。

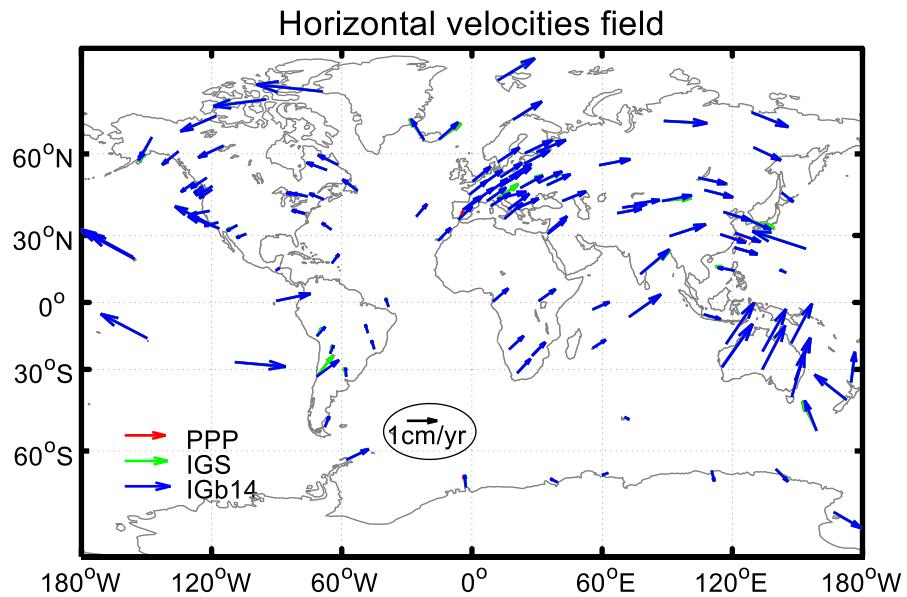


图 4.3 水平速度场

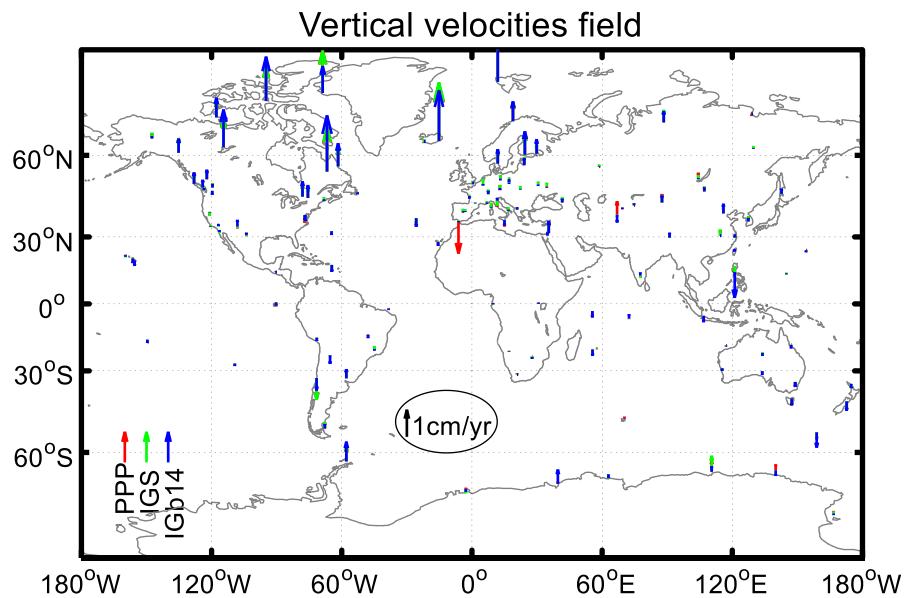


图 4.4 垂直速度场

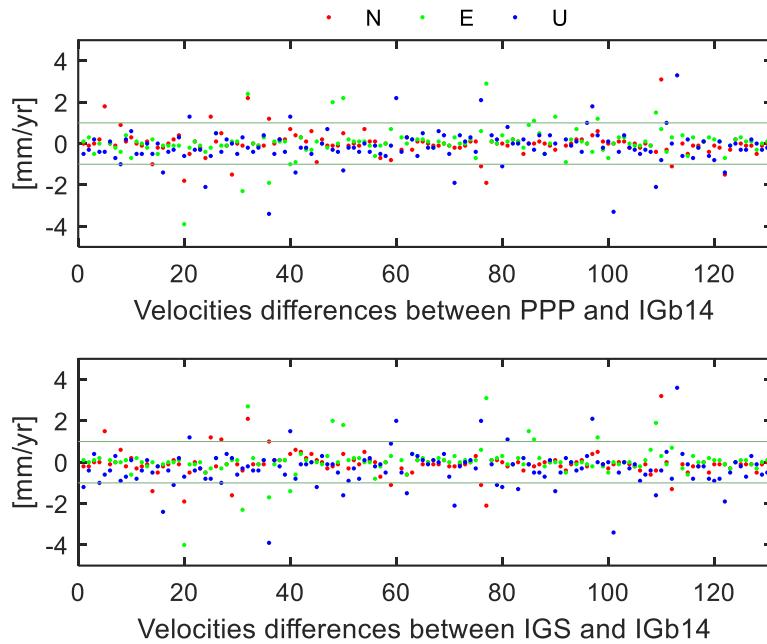


图 4.5 PPP 速度场和 IGS 速度场与 IGb14 速度场的比较

表 4.3 速度场精度统计(PPP)

	N[mm/yr]	E[mm/yr]	U[mm/yr]
均值	0.0	-0.0	0.2
标准差	0.5	0.7	0.7
均方根	0.5	0.7	0.8

表 4.4 速度场精度统计(IGS)

	N[mm/yr]	E[mm/yr]	U[mm/yr]
均值	0.1	-0.0	0.4
标准差	0.5	0.7	0.8
均方根	0.6	0.7	0.9

4.3.2 周期信号

GNSS 时间序列中存在明显的周期特性，垂直方向上尤为突出。其成因有重力激发，热效应和水文动力学因素等。重力激发是指有由于固体潮、海潮、大气潮等产生的地壳形变热效应和水文动力学因素包括非潮汐海洋质量变化，基岩的热膨胀，风剪切等。此外模型误差（卫星轨道、大气延迟、天线相位中心模型）、多路径效应等都可以造成 GNSS 位置的周期性波动。固体潮、海潮、大气潮已有较为完善的模型进行改正，当前的研究热点集中在海潮、大气负荷、地表水负荷

对 GNSS 台站位置的影响。

本节中利用 4.1 节中的数学模型对垂直方向上的坐标时间序列进行最小二乘估计, 获得垂直方向上的周年和半年幅度值。图 4.6 中展示了基于精密单点定位技术 (左) 和 IGS 解 (右) 的测站坐标时间序列估计的周年 (上) 和半年 (下) 周期幅度值; 图 4.7 展示了基于精密单点定位技术和 IGS 解的周年 (上) 和半年 (下) 幅度值差异; 表 4.5 统计了在不同幅度值差异条件下的测站数目。统计结果表明在参与测站坐标周期性分析的 130 个测站中, 基于精密单点定位技术和 IGS 解的周年幅度值差值中有 114 个站小于 2mm, 半年幅度值差值中有 113 个站小于 1mm。周年幅度值差异中有 3 个站大于 5mm, 半年幅度值差异中有 4 个站大于 5mm, 剔除幅度值差异大于 5mm 的测站之后统计的周年幅度值差异的均方根为 1.2mm, 半年幅度值差异的均方根为 0.7mm。此外由图 4.7 可以发现, 在参与分析的 130 个站中 IGS 解的周年幅度值大于 PPP 解的幅度值的测站数为 59, IGS 解的半年幅度值中仅有 21 个站的半年幅度值大于 PPP 解。由此可见, 基于精密单点定位技术解算的半年周期的幅度值相比 IGS 解更加显著, 且二者相比, 周年幅度值显示出相较半年幅度值更加明显的不确定度。

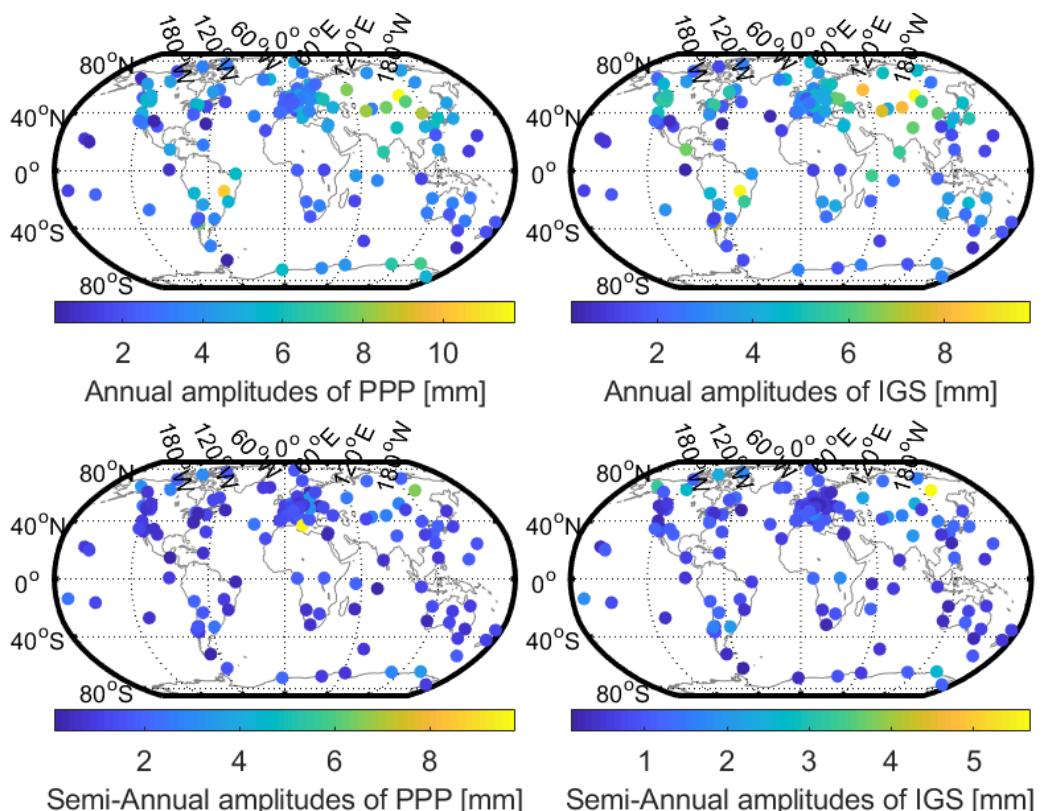


图 4.6 周年和半年幅度图

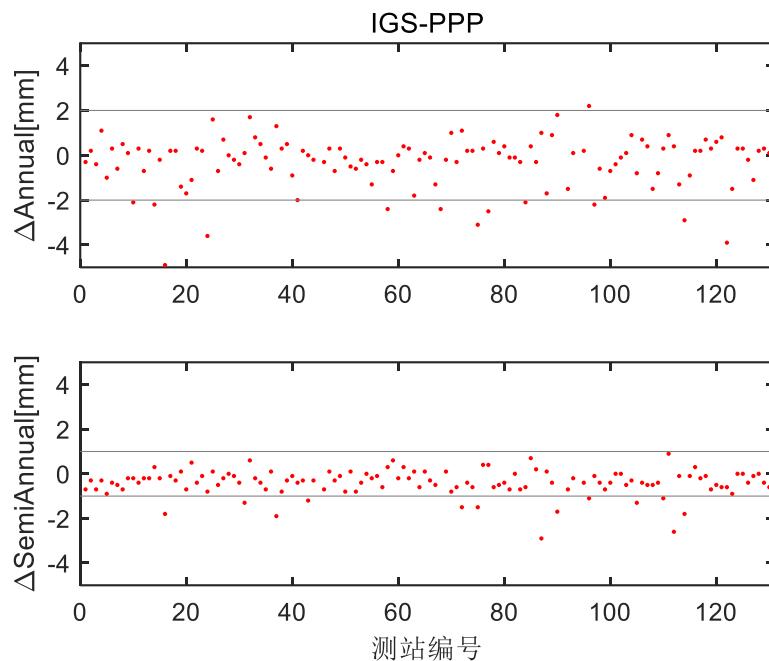


图 4.7 基于精密单点定位技术和 IGS 解的周年和半年幅度值差异

表 4.5 周年和半年幅度值差异

周年	<5mm		<2mm	
	127	114		
半年	<5mm		<1mm	
	126	113		

4.4 GNSS 时间序列噪声特性分析

对 GNSS 测站坐标的时间序列噪声进行分析的研究主要从时间域和空间域两方面着手。在时间域的分析用来确定时间序列在时间域的特征，方法主要有功率谱分析和最大似然估计；空间域方面主要采用区域叠加滤波和主成分变换方法分析共模误差（Common Mode Error, CME）。测站坐标时间序列的噪声来源主要有三类：1) 季节性的降雨造成土壤膨胀和收缩，进而使测站点位不稳定；2) GNSS 资料求解时引入了不准确或者不完善的卫星轨道模型、大气模型；3) 天线相位中心的校正不准确等。

对 GNSS 时间序列进行噪声分析主要目的是合理估计 GNSS 误差。当 GNSS 时间序列中含有与时间相关的噪声时，以高斯分布为基础的最小二乘所估计的速度场精度将会被低估。Williams (2004) 提出利用幂律噪声的非整数频谱指数振幅量估计时间序列的不确定性，以防止不确定性被低估的问题。基于功率谱分析

法可以研究在测站坐标残差的时间序列中存在的噪声类型, 为噪声模型估计参数提供依据。

4.4.1 功率谱分析

一般认为 GNSS 信号中的噪声时间序列可以视为一种幂次法则, 可以用功率谱过程来描述:

$$P_x(f) = P_0 \left(\frac{f}{f_0}\right)^k \quad (4-10)$$

其中, f 是时间频率; P_0 和 f_0 是正则化常数; k 为谱指数, 通常介于 -3~1 之间。
 $-3 < k < -1$ 时称为经典的布朗模型, $-1 < k < 1$ 时称为分式白噪声, 其中整数 k 代表一些特殊的噪声类型: $k = 0$ 时是标准的白噪声, $k = -1$ 时是标准的闪烁噪声, $k = -2$ 时是标准的随机游走噪声。除白色噪声外, 其余的部分统称为有色噪声。

利用 4.1 节中的数学模型对测站坐标时间序列进行最小二乘估计。本节中利用在原始的测站坐标时间序列中去掉 4.3 节中的线性项、周期项 (部分站去掉震后位移) 之后的残差时间序列进行噪声特性分析。图 4.8 和图 4.9 中分别统计了在 4.3 节中的参与时间序列分析的 130 个站基于精密单点定位技术和 IGS 解的谱指数直方图。可以观察到: 1) 绝大多数站的谱指数在 -1~0 之间, 也即多数站既有闪烁噪声也有白噪声; 2) 基于精密单点定位技术的谱指数相较 IGS 解更加集中。因此, 在构建误差模型时, 较为合适的随机模型为

$$D = \sigma_w^2 Q_w + \sigma_f^2 Q_f \quad (4-11)$$

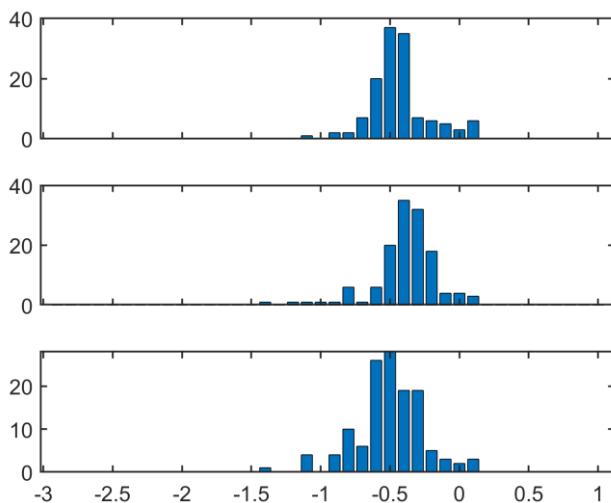


图 4.8 基于精密单点定位技术的谱指数直方图

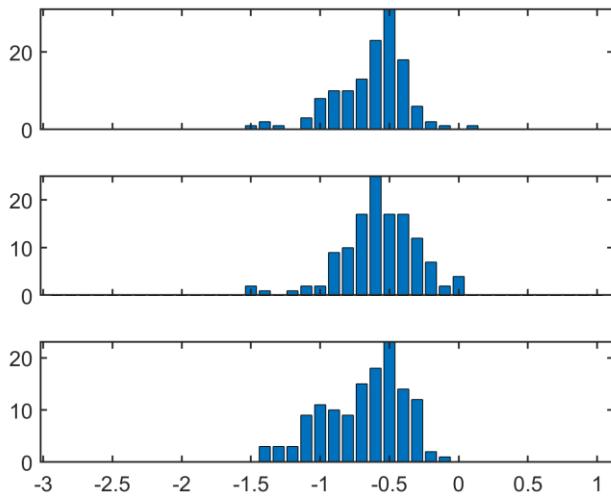


图 4.9 基于 IGS 解的谱指数直方图

4.5 时间序列空间域噪声分析

区域空间滤波是由 Wdowinski 等 (1997) 提出的概念, 目的是消减测站坐标中与空间相关的误差源。共模误差是一类重要的与空间相关的误差源, 共模误差的潜在的来源有: 1) 卫星轨道误差; 2) 水体和大气质量负荷; 3) 参考框架定义的不确定度等。

对于区域网 GNSS 测站坐标日解时间序列, 每一个坐标分量的残差坐标序列 (去趋势、均值和周期项) 都可以构造一个 $m \times n$ 的矩阵 X , 其中 n 表示测站数, m 表示历元数, 需满足关系 $m \geq n$ 。矩阵 X 的列表示某一测站坐标分量的所有历元坐标残差值, X 的行表示某一历元观测的参与空间相关性分析的所有测站集。区域叠加滤波方法的计算公式如下:

$$\varepsilon(t_i) = \frac{\sum_{j=1}^n (X(t_i, j) / \sigma_{i,j}^2)}{\sum_{j=1}^n (1 / \sigma_{i,j}^2)} \quad (4-12)$$

$$\bar{x}(t_i, j) = X(t_i, j) - \varepsilon(t_i) \quad (4-13)$$

$\varepsilon(t_i)$ 表示历元 t_i 的共模误差; $\sigma_{i,j}^2$ 是测站 j 在历元 t_i 时残差值 $X(t_i, j)$ 的方差; $\bar{x}(t_i, j)$ 是剔除共模误差后的滤波残差时间序列。在每一个历元 t_i , 所有测站滤掉相同的共模误差 $\varepsilon(t_i)$, 因此区域叠加滤波方法只适用于范围很小的 GNSS 网。

Dong 等 (2006) 基于经验正交分解的主成分分析方法提取区域中的共模误差。Dong 等 (2006) 提供的方法中矩阵 X 可以做如下变换:

$$X(t_i, j) = \sum_{k=1}^n a_k(t_i) v_k(j), (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4-14)$$

$$a_k(t_i) = \sum_{j=1}^n X(t_i, j) v_k(j), (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4-15)$$

式中 a_k 为第 k 个主成分; v_k 是协方差矩阵 B 的第 k 个特征向量。

$$B(i, j) = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m X(t_k, i) X(t_k, j) \quad (4-16)$$

为方便区分坐标残差时间序列中的主成分, 协方差阵 B 的特征值为降序排列 ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$), 第一主成分对应最大的特征值 λ_1 。如 Dong 等 (2006) 所述, 第一主成分涵盖了整个区域最多的信息, 往往反映整个区域网的共同变化趋势, 因此由第一主成分确定共模误差。

Dong 等 (2006) 提出的 PCA 方法需要满足在观测时间内不能有缺失历元 (以天为单位), 但在实际情况下, 因为各种因素影响会造成 GNSS 时间序列存在大量的缺失数据。因此 Shen 等 (2014) 进一步改进, 提出了一种缺失数据情况下的改进 PCA 方法。本节中采用 Shen 等 (2014) 提出的改进方法提取共模误差。

本节中选取分布欧洲区域的 30 个测站的 IGS 解, 利用 4.1 节中的数学模型获取的坐标残差进行主成分分析, 数据跨度为 2019 年 1 月 1 日至 2021 年 8 月 30 日月共两年零八个月。N、E、U 三个坐标分量上残差时间序列特征值直方图如图 4.10 所示。由图可见, N、E、U 三个坐标分量的第一主成分分别占总方差的 36%、38%、48%, 远大于其他主成分的比例, 可以认为这一主成分代表了共模误差中的绝大部分。

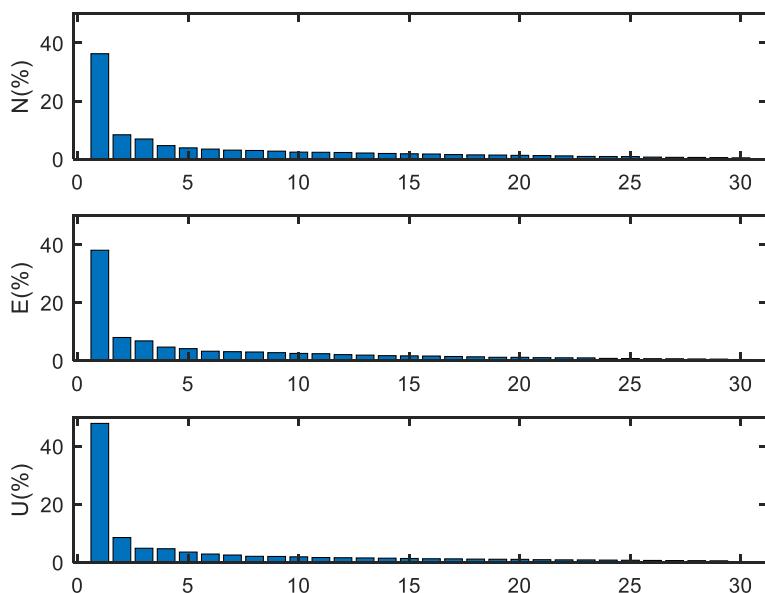


图 4.10 排序后的特征值直方图

图 4.11 和图 4.12 分别展示了第一主成分和第二主成分的坐标时间序列及其空间响应。由图 4.11 可见，第一主成分的空间响应符号相同，且多数站的空间响应较为类似，只有少数站与最大响应值的差异比较大。而图 4.12 所示的第二主成分的空间响应有正有负，且各站之间的空间响应具有较大差异。两幅图中显示的第一主成分相较第二主成分具有较大的离散度。

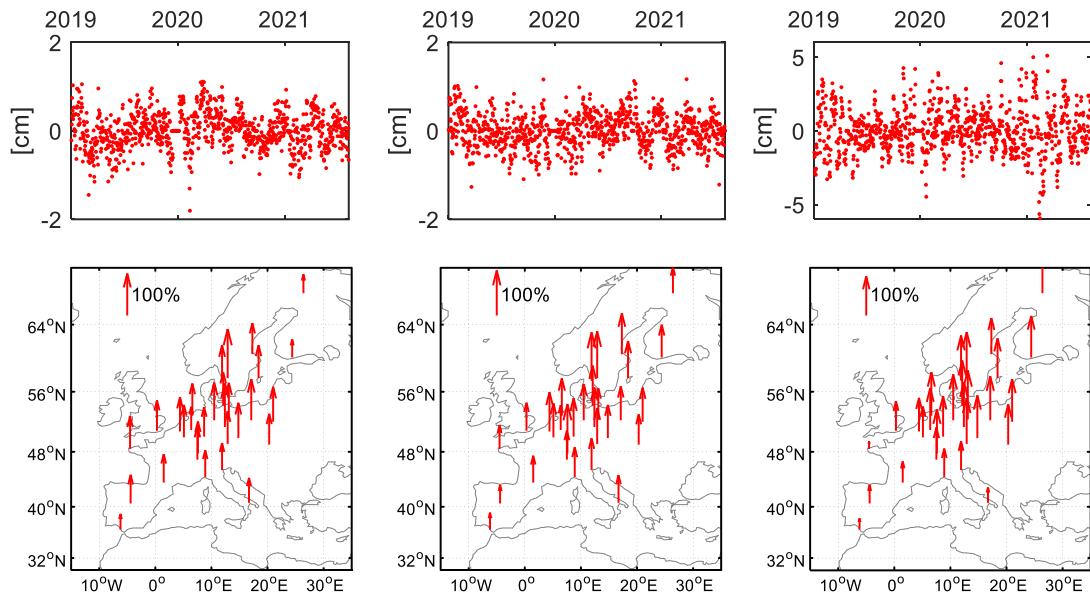


图 4.11 第一主成分及其空间响应（从左至右依次为 N、E、U）

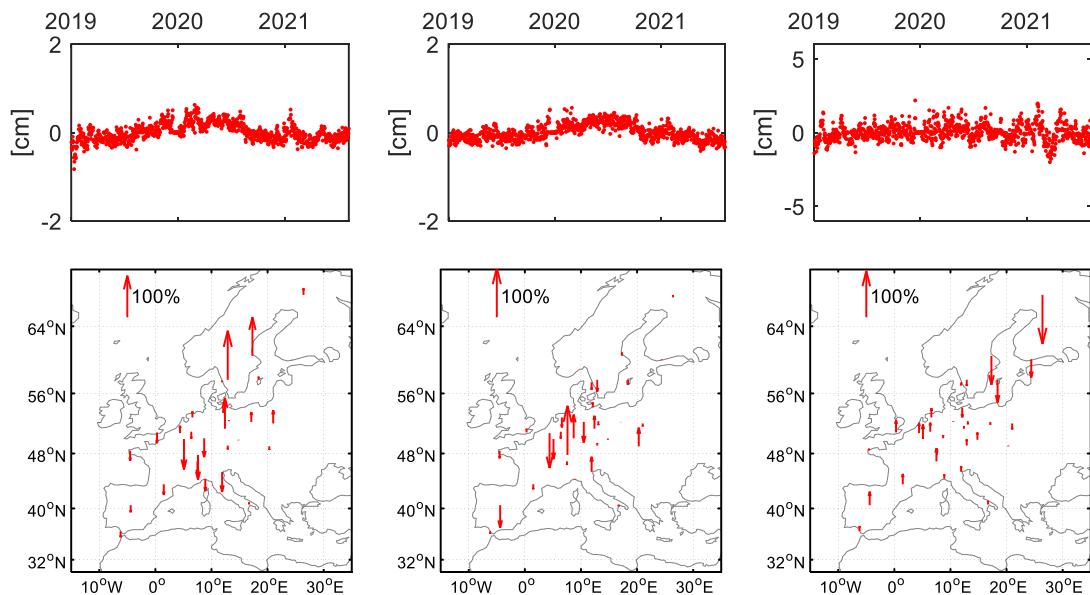


图 4.12 第二主成分及其空间响应（从左至右依次为 N、E、U）

对各测站的坐标分量的残差时间序列去掉第一主成分对应的共模误差后，统计的各测站坐标残差时间序列的 RMS 值如图 4.13 所示。可以看到，通过区域空

间滤波后, 各测站的残差坐标时间序列的不确定度有所降低。参与区域空间滤波分析的 30 个站的统计结果表明, 30 个测站的原始残差时间序列 RMS 的均值分别为 1.1m、1.1mm、4.0mm, 坐标残差的 RMS 值在 N、E、U 三个方向上的均值分别降低了 0.2mm、0.2mm、1.0mm。由此得出结论, 由主成分分析方法估计的共模误差在垂直方向上的效果最为显著。

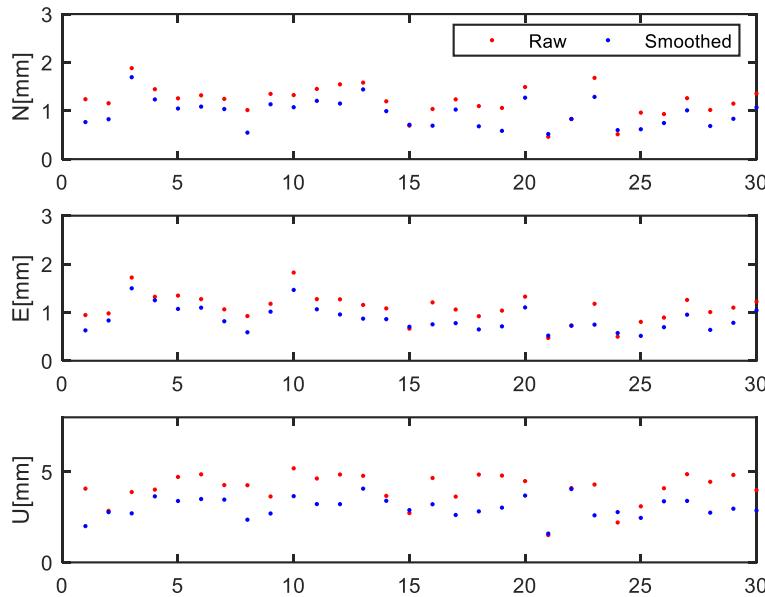


图 4.13 滤波前后坐标残差 RMS 统计

4.6 本章小结

本章中的第一节介绍了精密单点定位技术的概念和函数模型以及本文中精密单点定位结果使用的数据处理软件, 并以 IGS 解为参考对基于单点定位技术确定的全球参考框架的精度进行了分析

第二节中以测站坐标时间为研究对象根据测站坐标中可能包含的线性和非线性信号以及存在的噪声构建了测站坐标时间序列的拟合模型。

第三节中利用第一节中的模型估计了测站的速度场和周期信号的幅度值。结果表明, 在数据长度长达 11 年的参数估计中, 基于精密单点定位技术解算的测站坐标时间序列的速度场与 IGS 解估计的速度场精度相当, 与框架 IGb14 的速度场相比统计精度在 N、E、U 三个坐标轴上均优于 1mm/yr; 基于精密单点定位技术估计的周年信号幅度值多数与 IGS 解估计的周年信号幅度值小于 2mm, 基于精密单点定位技术估计的半年信号幅度值多数与 IGS 解估计的半年信号幅度

值小于 1mm, 去除幅度值差异大于 5mm 的测站之后的周年和半年幅度值统计精度 (RMS) 分别为 1.2mm、0.7mm。此外, 基于精密单点定位技术解算的半年周期的幅度值相比 IGS 解更加显著。

第四节中以原始测站坐标时间序列去除线性项和周期项后的残差坐标时间序列为研究对象, 利用功率谱分析研究了测站坐标残差时间序列的噪声特性。结果表明, 无论是基于精密单点定位技术的测站坐标残差时间序列还是 IGS 解的测站坐标残差时间序列都表现出既有白噪声也有闪烁噪声的特性, 因此认为白噪声加闪烁噪声的噪声模型仍然是目前较为合适的随机模型。此外, 基于精密单点定位技术解的残差坐标时间序列的谱指数相较 IGS 解的残差坐标时间序列更加集中, 其中的缘由值得去更深层次地研究。

第五节中利用主成分分析法对欧洲区域分布的 30 个测站坐标残差时间序列进行区域空间滤波。结果表明, 各测站对第一主成分的空间响应符号一致, 且多数测站的空间响应值较为相近。原始测站坐标残差时间序列通过第一主成分指示的区域空间滤波之后剩余的坐标残差时间序列的不确定度有所降低。参与区域空间滤波分析的 30 个站的统计结果表明, 30 个测站的原始残差时间序列 RMS 的均值分别为 1.1mm、1.1mm、4.0mm, 坐标残差的 RMS 值在 N、E、U 三个方向上的均值分别降低了 0.2mm、0.2mm、1.0mm。因此, 基于主成分分析方法的区域空间滤波在垂直方向上的作用最为显著。

第 5 章 北斗参考框架的建立与维持

5.1 北斗参考框架现状

为满足我国经济与国防建设的需要,自上世纪 50 年代初,我国先后建立并采用 1954 年北京坐标系和 1980 西安坐标系作为参考基准应用在测绘工作中。遗憾的是,1954 年北京坐标系和 1980 西安坐标系都是局部坐标系,其基准站坐标精度偏低,难以满足高精度应用的需求。在 2002 年,总参测绘局联合国家测绘局和中国地震局,对国内 GPS 网进行统一处理,获得约 2600 个地面站的坐标,实现了 2000 中国大地坐标系 (CGCS2000) (魏子卿, 2008; 杨元喜, 2009; 陈俊勇, 2008)。CGCS2000 的定义与国际地球参考系一致。2007 年 8 月起,正式启用 CGCS2000 国家大地坐标系。CGCS2000 坐标系的建立,标志着我国大地基准取得重大进展,主要表现在:采用国际地球参考系的定义;完成由局部坐标系到地心坐标系的过渡;实现精度达到国际先进水平。

北斗系统采用的参考框架是 CGCS2000,它在 2000.0 历元与 ITRF97 对齐。ITRF97 参考框架未提供参考站点的速度,而实际上框架点会受到各种地质构造运动的影响,如板块运动等,同时,也会受到海洋潮汐、大气潮汐以及地球固体潮等诸多因素的影响,其点位会随时间发生变化。在前几个版本的国际地球参考框架(例如, ITRF2005、ITRF2008 和 ITRF2014)中,利用框架点在参考历元的坐标和速度来表征框架点坐标的线性变化。在 ITRF2014 的框架解中,多数框架点速度在 X, Y, Z 三个坐标分量上高达 2-3cm。不难得出结论,如果不考虑测站的运动速度,ITRF97 的测站坐标误差推算至今也已高达 40-60cm,这在高精度大地测量应用和地球物理研究以及灾害监测中是不希望存在的。对此,魏子卿等人 (2011) 和谢方等人 (2014) 基于 CGCS2000 建立了中国大陆速度场模型,以期为高精度大地测量、地球动力学、地学研究等提供基础信息。此外,成英燕等人 (2017)、蒋志浩 (2019) 也研究了 CGCS2000 参考框架的维持和更新方法。

不得不提的是,无论是 CGCS2000 的建立还是它的更新和维持都是基于 GPS 数据完成的,这就使得在建立参考框架基准时在一定程度上失去了自主性。而参考系统对 GNSS 卫星导航系统至关重要,随着北斗三号卫星导航系统的全面建成,研究和建立与之对应的地球参考框架刻不容缓。邹蓉等人 (2011) 利用北斗

跟踪站数据进行了一系列的仿真验证，探讨了北斗地球参考系统的定义，实现和维持方案。[蒋光伟等人（2021）](#)利用北斗基准站分析了高精度区域参考框架维持的可行性和可靠性。

本章以 IGS 常规解为参考基准，比较分析了基于 BDS-3 数据建立的参考框架的全局以及区域参考框架的精度和可靠性。

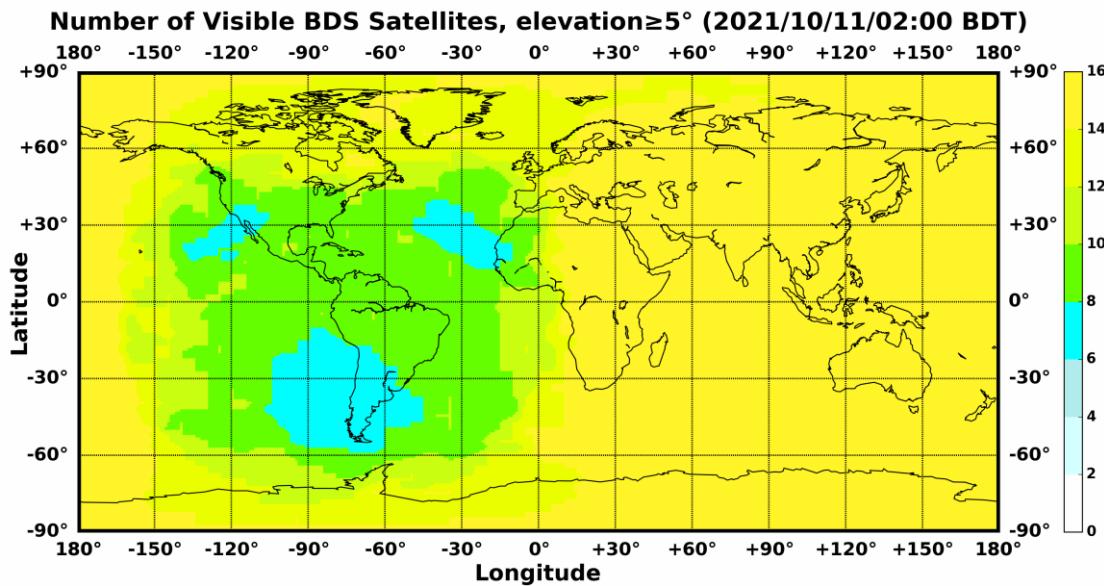
5.2 北斗卫星导航系统

20 世纪后期，中国开始探索适合国情的卫星导航系统发展道路，逐步形成了“三步走”发展战略（[CSNO, 2021](#)）：1994 年启动北斗一号系统建设，2000 年年底建成并投入使用，采用有源定位体制，为中国用户提供定位、授时、广域差分和短报文通信服务；2004 年启动北斗二号系统建设，2012 年年底建成并投入使用，在兼容北斗一号系统技术体制基础上，增加无源定位体制，向亚太地区用户提供定位、测速、授时和短报文通信服务；北斗三号系统于 2009 年启动建设，2020 年建成并投入使用，北斗三号系统在北斗二号系统的基础上，扩展了地面覆盖能力，实现了全球定位服务能力。

5.2.1 北斗卫星星座

目前建成的北斗三号系统由 3 颗地球静止轨道卫星（GEO），3 颗倾斜同步轨道卫星（IGSO）和 24 颗中轨卫星（MEO）组成。GEO 卫星轨道高度 35786 千米，分别定点于东经 80 度、110.5 度和 140 度；IGSO 卫星轨道高度 35786 千米，轨道倾角 55 度；MEO 卫星轨道高度 21528 千米，轨道倾角 55 度。

图 5.1 是 2021 年 10 月 11 日 2: 00 时在全球范围内可见的北斗卫星数。卫星导航系统定位需要解算 3 个位置参数和 1 个时钟偏差参数，所以最少需要同时观测到 4 颗卫星才可解算定位。由图 5.1 可见，目前北斗系统已经覆盖全球并有能力在全球范围内提供导航、定位和授时服务。

图 5.1 北斗可见卫星数¹⁴

5.2.2 北斗坐标系

北斗系统采用北斗坐标系 (BDCS)。BDCS 的定义符合国际地球自转参考系服务 (IERS) 规范, 采用 2000 中国大地坐标系 (CGCS2000) 的参考椭球参数, 对准于最新的国际地球参考框架 (ITRF), 每年更新一次。具体定义如下:

(1) 原点、轴向及尺度定义

原点位于地球质心; Z 轴指向 IERS 定义的参考极 (IRP) 方向; X 轴为 IERS 定义的参考子午面 (IRM) 与通过原点且同 Z 轴正交的赤道面的交线; Y 轴与 Z、X 轴构成右手直角坐标系; 长度单位是国际单位制 (SI) 米。

(2) 参考椭球定义

BDCS 参考椭球的几何中心与地球质心重合, 参考椭球的旋转轴与 Z 轴重合。BDCS 参考椭球定义的基本常数见表 5.1。

表 5.1 BDCS 参考椭球的基本常数

序号	参数	定义
1	长半轴	$a=6378137.0\text{ m}$
2	地心引力常数 (包含大气层)	$\mu = 3.986004418 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$
3	变率	$f=1/298.257222101$
4	地球自转角速度	$\dot{\Omega}_c = 7.2921150 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$

¹⁴ http://www.beidou.gov.cn/xt/jcpq/202110/t20211011_23304.html

5.3 北斗全球参考框架分析

5.3.1 数据和产品介绍

卫星轨道和钟差是提供地面位置服务的关键前提。目前只有 WUM 和 GFZ 两家 IGS 分析中提供包含北斗三号卫星的精密轨道和钟差产品。其中 GFZ 于 2020 年起才开始提供北斗三号卫星的精密星历，WUM 则于 2019 年起开始提供包含北斗三号卫星的精密星历。考虑到在建立参考框架时数据跨度的重要性，在本章的分析中选取 WUM 提供的精密星历作为定位时的先验/已知信息。

目前已有分布全球的约 130 个 MEGX 站接收北斗三号卫星的信号。本节中在选取测站时顾及测站分布，数据连续性、稳定性和定位精度的基础上选取了分布全球的 58 个接收北斗信号的 IGS 站作为研究对象。选取的测站分布如图 5.2 所示。

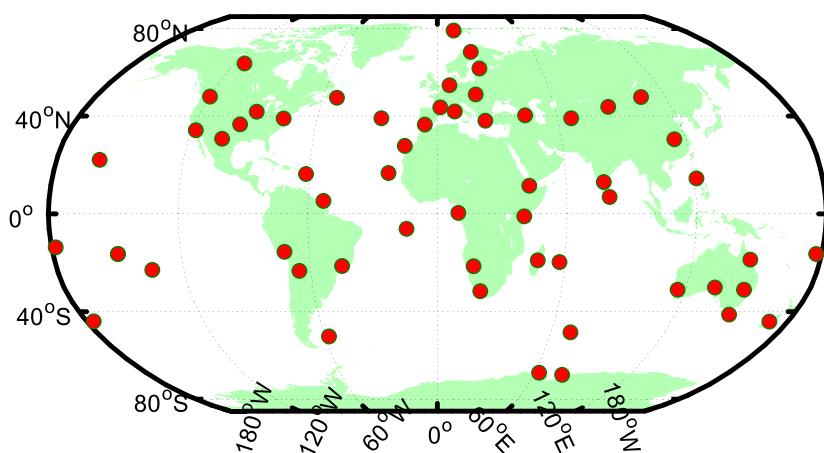


图 5.2 测站分布图

5.3.2 基于精密单点定位技术的北斗参考框架

基于精密单点定位技术的函数模型、数据处理软件、参数改正和估计模型在 4.2 节中已经介绍过，因此不再赘述。

5.3.2.1 基于精密单点定位技术的参考框架精度分析

如 5.3.1 中所述，BDS-3 卫星系统的精密星历最早由 IGS 的分析中心 WUM 于 2019 年初起开始提供，因此本章中的数据选段为 2019 年 1 月-2021 年 8 月的 BDS-3 卫星的数据。但由于在 2020 年 7 月前 BDS-3 系统还没有完全建成，部分地区可用卫星数目有限，全球覆盖能力也有限，导致多数站因为可见卫星数目问题定位精度较差，这一部分的测站在可见卫星数目增加后定位精度得到大幅提

升, 甚至于达到与 IGS 官方解相当的定位精度, 测站 HOB2 (如图 5.3) 就是这样的例子。

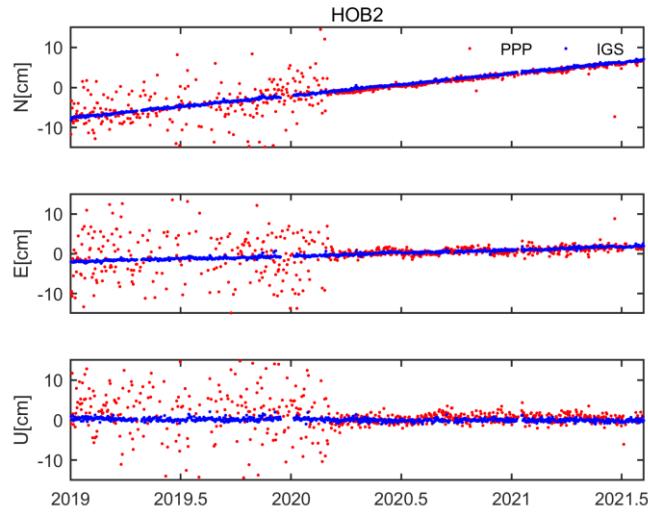


图 5.3 测站 HOB2 的坐标时间序列图

也有部分站在整个数据跨度内定位精度处于同等水平, 也即在卫星覆盖能力上变化较小(甚至没有变化), 图 5.4 和图 5.5 就是此类测站的例子。不同的是, 在整个时间跨度内测站 CPVG 的卫星覆盖能力不及测站 GODE, 使得产生定位精度上的差异。与 IGS 相比, 测站 CPVG 在 N、E、U 三个方向上的标准差分别为 0.50cm、1.12cm、1.21cm, 测站 GODE 在 N、E、U 三个方向上的标准差分别为 0.35cm、0.42cm、0.78cm。由此可见, 因可见卫星数分布导致的测站定位精度在 BDS-3 系统建立完成之后依然存在。

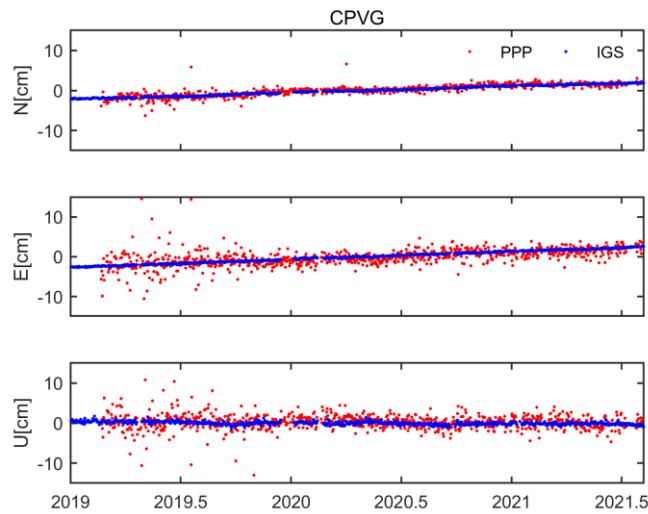


图 5.4 测站 CPVG 的坐标时间序列图

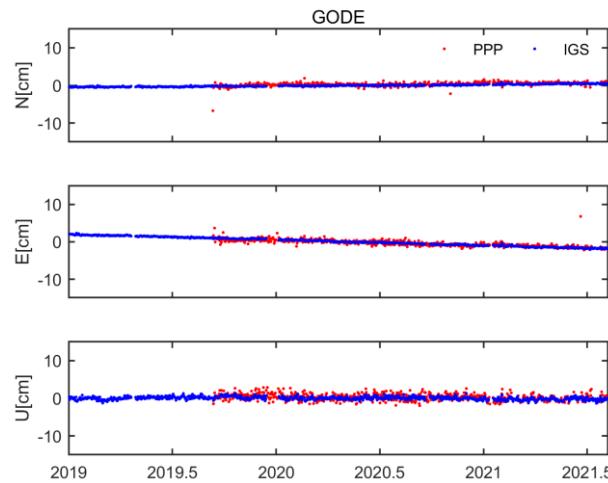
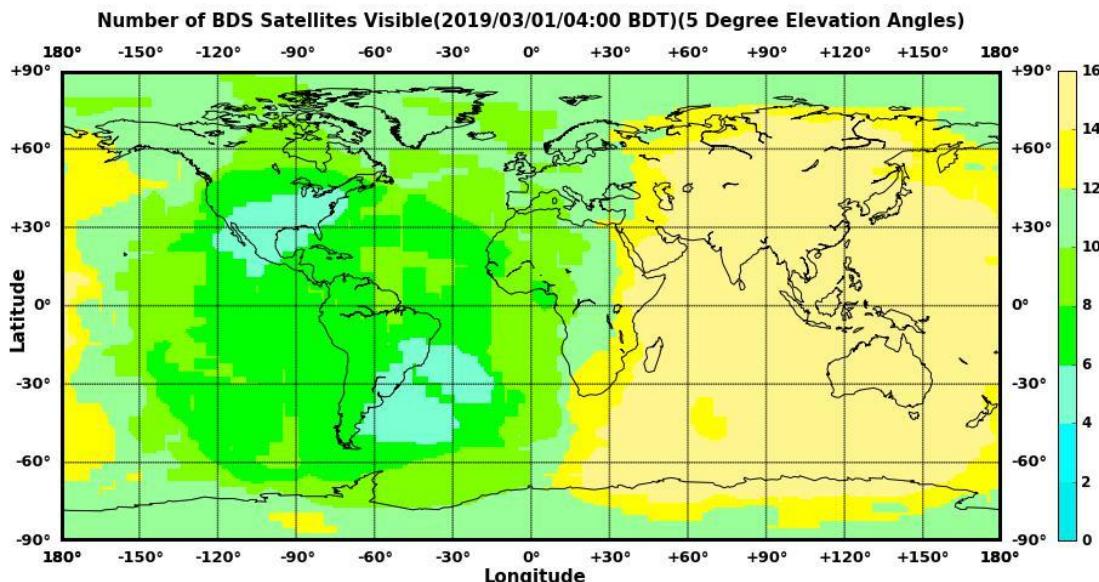


图 5.5 测站 GODE 的坐标时间序列图

为验证上述结论, 图 5.6 展示了北斗时 2019 年 3 月 1 日 4 时可见北斗卫星数, 图 5.1 与图 5.6 相比, 图 5.1 中 BDS-3 卫星的覆盖能力由亚太地区向全球范围内得到大幅扩展。这为卫星定位能力提供了基础保障, 使得地面站的定位精度得到改善。同时, 不难发现在经度-150~0, 纬度-70~50 范围内可见卫星数相较其他区域较少 (<10), 这也使得在此区域内测站定位精度会受到一定的影响。

图 5.6 2019 年 3 月 1 日 4 时北斗可见卫星数¹⁵

5.3.2.1.1 PPP 可靠性

利用 WUM 提供的精密轨道和钟差产品对所选取的 58 个测站在 2019 年 1

¹⁵ http://www.beidou.gov.cn/xt/jcpg/201903/t20190301_17405.html

月~2021 年 8 月时段内实施单天静态 PPP 解算, 在剔除粗差后对每天最后一个历元的定位结果与 IGS 解进行比较, 分析坐标精度的可靠性。

各测站静态 PPP 定位的统计结果如图 5.7、图 5.8、图 5.9 所示, 分别为各测站在 N、E、U 三个坐标分量上坐标时间序列的均值、标准差和均方根的统计。如表 5.2 中的统计表明, 在所选的 58 个测站中在 N、E、U 三个坐标分量上均值小于 0.3cm、0.3cm、0.6cm 的测站数目分别为 36、45、35; 标准差小于 0.6cm、0.6cm、1.2cm 的测站数目分别为 51、24、49; 均方根小于 0.8cm、0.8cm、1.5cm 的测站数目分别为 51、37、49。

表 5.2 基于精密单点定位技术的测站坐标精度统计

	N	E	U
均值	<0.3cm	<0.3cm	<0.6cm
	36	45	35
标准差	<0.6cm	<0.6cm	<1.2cm
	51	24	49
均方根	<0.8cm	<0.8cm	<1.5cm
	51	37	49

表 5.3 统计了 58 个测站在 N、E、U 三个坐标分量上标准差和均方根的均值,结果显示:各测站坐标精度的标准差在 N、E、U 三个方向上的均值分别为 0.47cm、0.72cm、0.97cm; 均方根在 N、E、U 三个方向上的均值分别为 0.61cm、0.80cm、1.21cm。由此可知, 基于 BDS-3 信号计算的静态 PPP 定位精度在水平方向上可达 0.8cm, 在垂直方向上可达 1.2cm。其中 N 方向上的精度最好, 要优于 E 方向 0.2cm, 是 U 方向上精度的 2 倍。

综合表 5.2 中的统计, 以及前文中测站坐标时间序列的分析可见, 部分测站统计的坐标精度较差的主要原因在于测站所在位置可见卫星数目有限。不同的是,一部分测站在系统建成的过程中, 测站所在位置的几何构型得到改善, 坐标精度也因此而提高; 另一部分测站所在的位置即使在 BDS-3 系统建成之后, 可见卫星数目相较其他区域仍然较少, 定位精度也未能得到进一步提升。

表 5.3 基于精密单点定位技术的测站坐标标准差与均方根的均值统计

	N [cm]	E [cm]	U [cm]
标准差	0.47	0.72	0.97
均方根	0.61	0.80	1.21

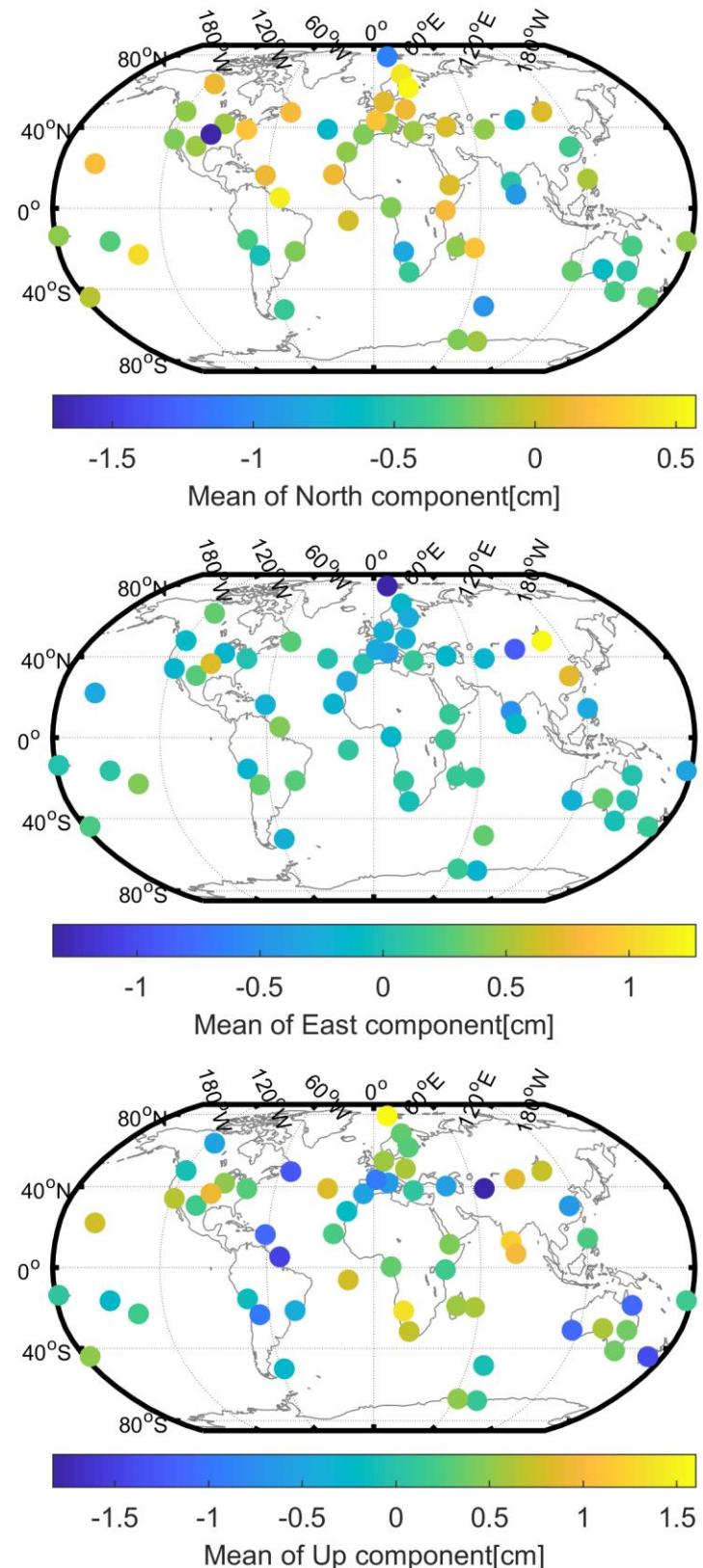


图 5.7 基于精密单点定位技术的测站坐标误差在 N、E、U 三个坐标分量的均值

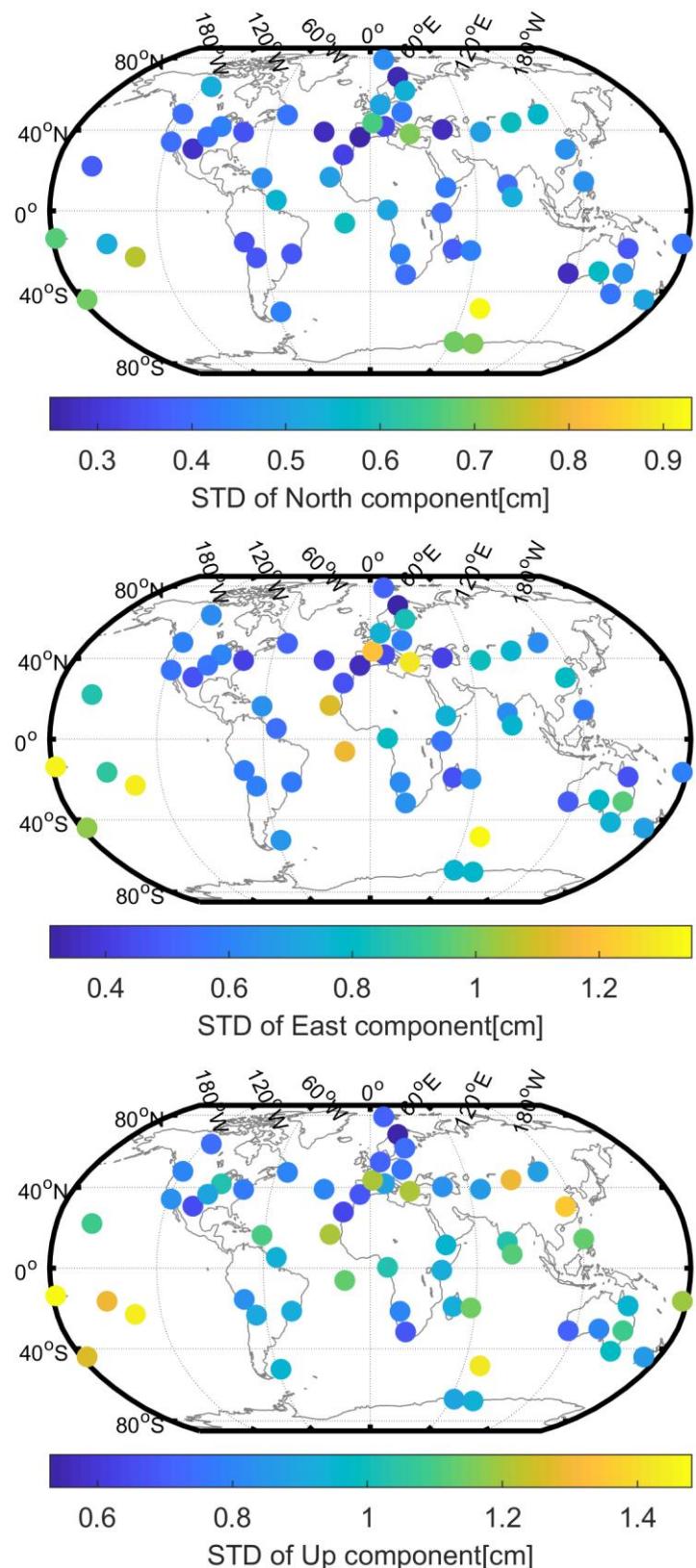


图 5.8 基于精密单点定位技术的测站坐标误差在 N、E、U 三个坐标分量的标准差

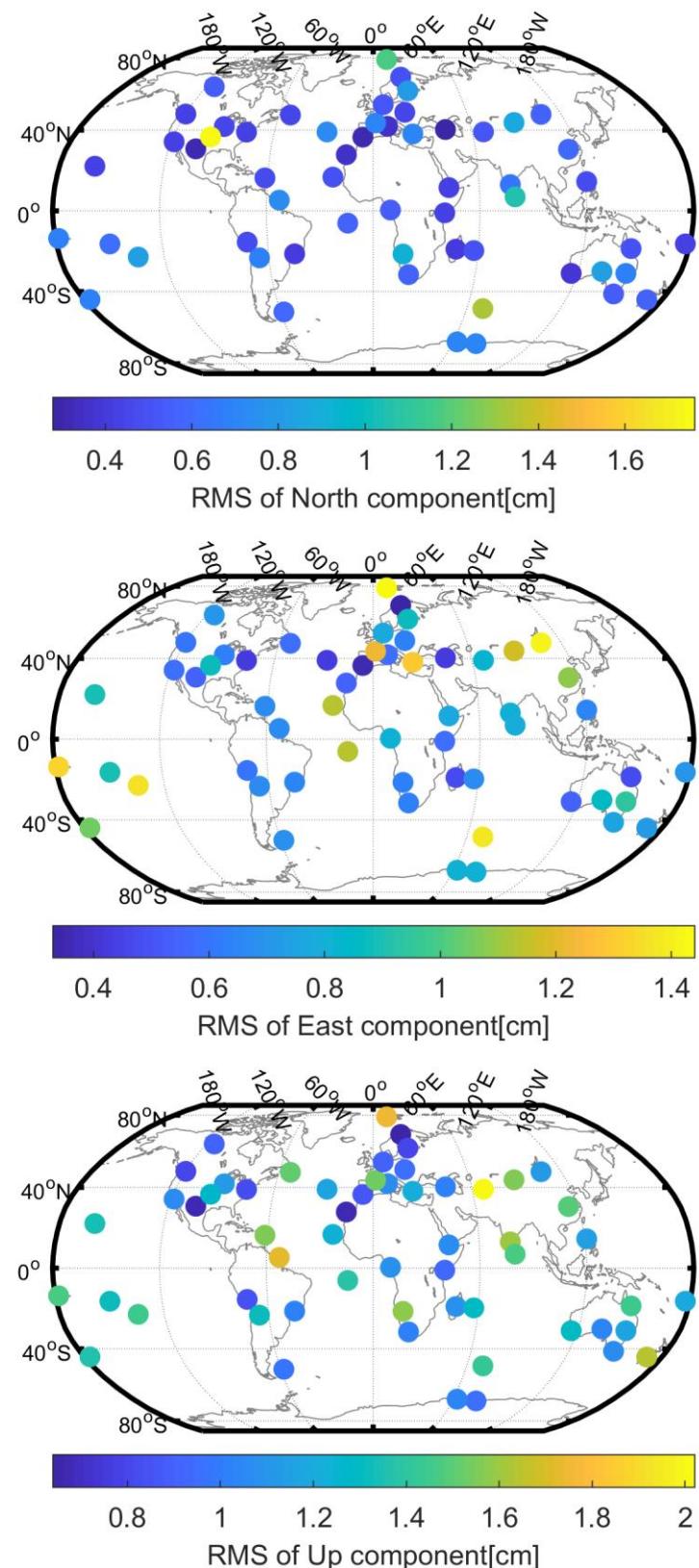


图 5.9 基于精密单点定位技术的测站坐标误差在 N、E、U 三个坐标分量的均方根

5.3.2.1.2 一致性分析

IGS 解是几个分析中心解通过最优的综合策略实现的 GNSS 技术所能达到的最高精度的参考框架。由 3.1.4 节中国际地球参考框架 ITRF2014 与 IGS 解的比较得知, IGS 解与其先验地球参考框架 ITRF2014 具有很好的一致性。因此, 本章中选取与 BDS-3 定位解算数据同时段的 IGS 解作为参考, 进行北斗参考框架精度的分析。

利用与第 3 章中相同的阈值进行 Helmert 转换得到的平移、旋转和尺度参数的时间序列如图 5.10 所示。由图 5.10 可知, 在早期 BDS-3 系统卫星数目有限的条件下, 基于精密单点定位技术的 BDS-3 参考框架的可靠性较低, 因此对图 5.10 中的时间序列选取 2019 年 11 月 25 日起至 2021 年 8 月时段在历元 2020.0 时刻进行线性拟合和统计得到如表 5.4 所示的结果。结果显示, 基于精密单点定位技术确定的北斗参考框架与 IGS 相比, 原点在历元 2020.0 时刻 X、Y、Z 三个方向上的偏差分别为-0.5mm、-1.8mm、-0.5mm, 原点变化率在 X、Y、Z 三个方向上分别为-0.08mm/yr、0.55mm/yr、2.0mm/yr, 线性拟合后残差在 X、Y、Z 三个方向上的标准差分别为 2.2mm、2.1mm、2.0mm; 方向在历元 2020.0 时刻 X、Y、Z 三个方向上的偏差分别为-15.1 μ as、1.7 μ as、-40.8 μ as, 方向变化率在 X、Y、Z 三个方向上分别为 21.8 μ as/yr、-23.8 μ as/yr、37.9 μ as/yr, 线性拟合后残差在 X、Y、Z 三个方向上的标准差分别为 51.8 μ as、51.4 μ as、69.4 μ as; 尺度在历元 2020.0 时刻的偏差为-0.11ppb, 尺度变化率为 0.012ppb/yr, 线性拟合后残差的标准差为 0.37ppb。结果表明, 基于精密单点定位技术的全球北斗参考框架可达到毫米级的精度。

表 5.4 基于精密单点定位技术与 IGS 解之间的 Helmert 转换参数时间序列在历元 2020.0 时刻的线性拟合和统计

	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz	Scale
offset	-0.5	-1.8	-0.5	-15.1	1.7	-40.8	-0.11
drift	-0.08	0.55	2.0	21.8	-23.8	37.9	0.012
STD	2.2	2.1	2.0	51.8	51.4	69.4	0.37

注: 偏移量的平移、旋转、尺度参数的单位分别为 mm、 μ as、ppb; 趋势的平移、旋转和尺度参数的单位分别为 mm/yr、 μ as/yr 和 ppb/yr; 各类参数方差的单位与偏移量的一致。

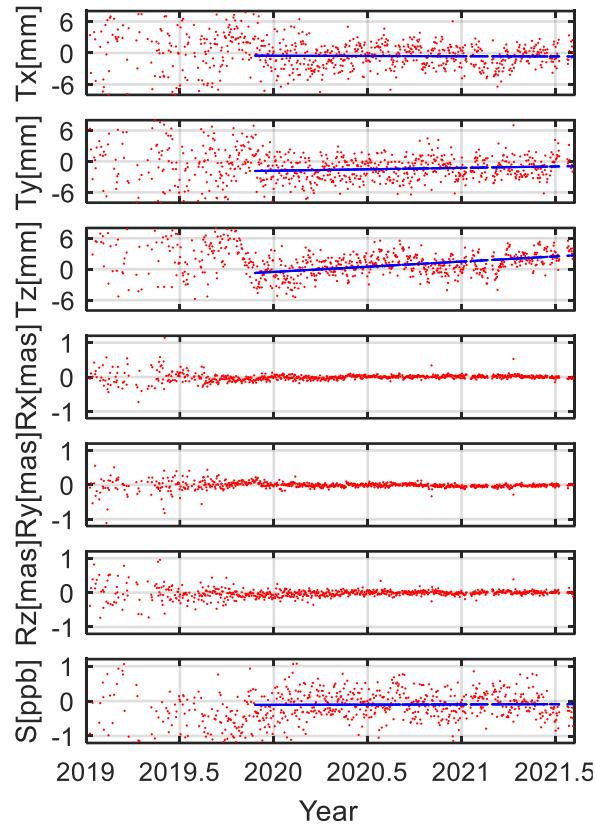


图 5.10 基于精密单点定位技术与 IGS 解之间的 Helmert 转换参数时间序列

5.3.2.1.3 速度场

利用上述 58 个北斗站 2 年零 8 个月的静态 PPP 定位结果, 以 2020 年年积日 1 为参考时间基准, 即 $t_0=2020.0$, 对每个测站在 N、E、U 三个方向的速度场利用 4.1 节中的函数模型进行估计。以相同时段的 IGS 解作为参考, 拟合得到的水平速度场如图 5.11 所示, 垂直速度场如图 5.12 所示。红色、蓝色箭头分别代表基于精密单点定位技术和 IGS 解的速度场。由图 5.11 可以看出, 基于静态 PPP 获得的水平速度场与 IGS 解获得的水平速度场无论是在数值上还是在方向上都大致相同。由图 5.12 可以看出, 两类解的垂直速度场在数值上也大致相同。

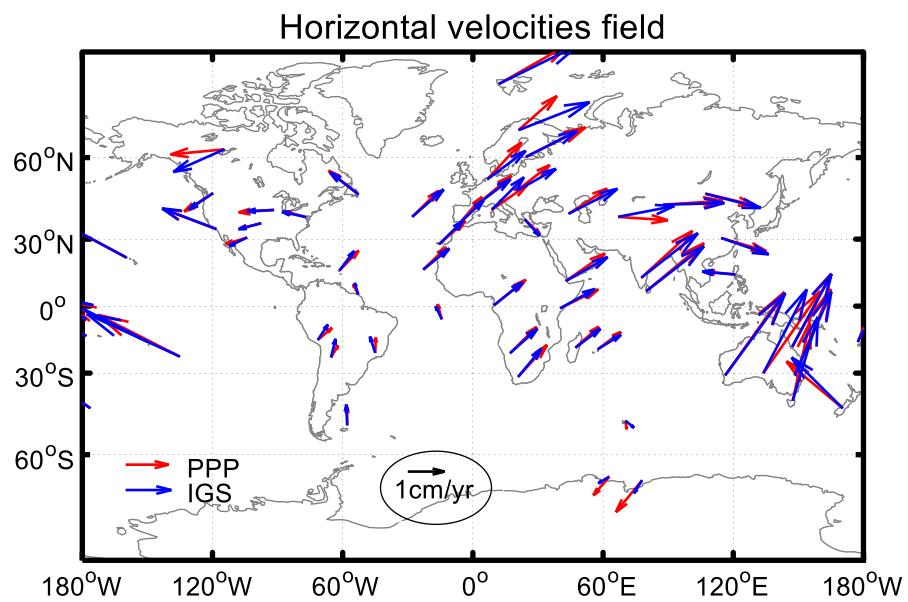


图 5.11 基于精密单点定位技术（红色）和基于 IGS 解的水平速度场（蓝色）

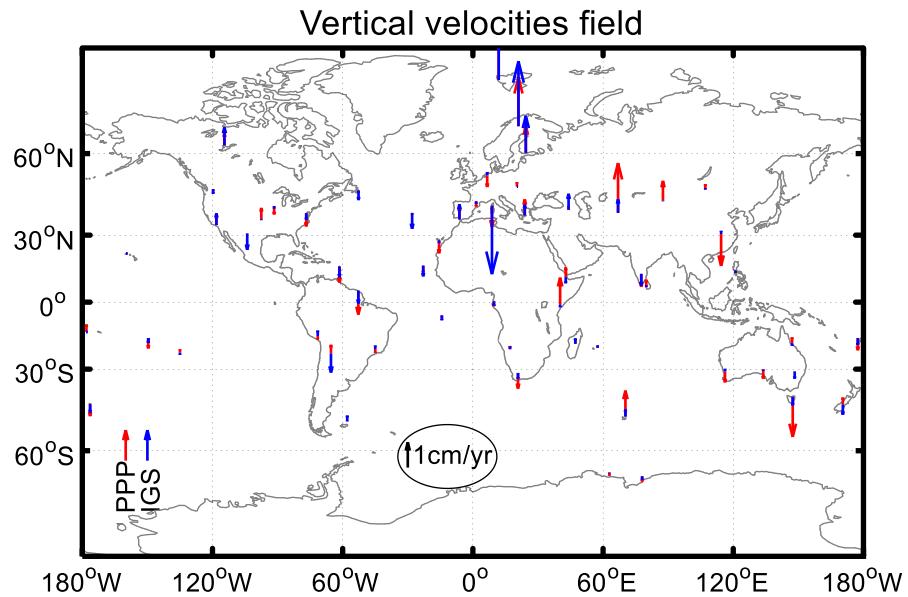


图 5.12 基于精密单点定位技术（红色）和基于 IGS 解的垂直速度场（蓝色）

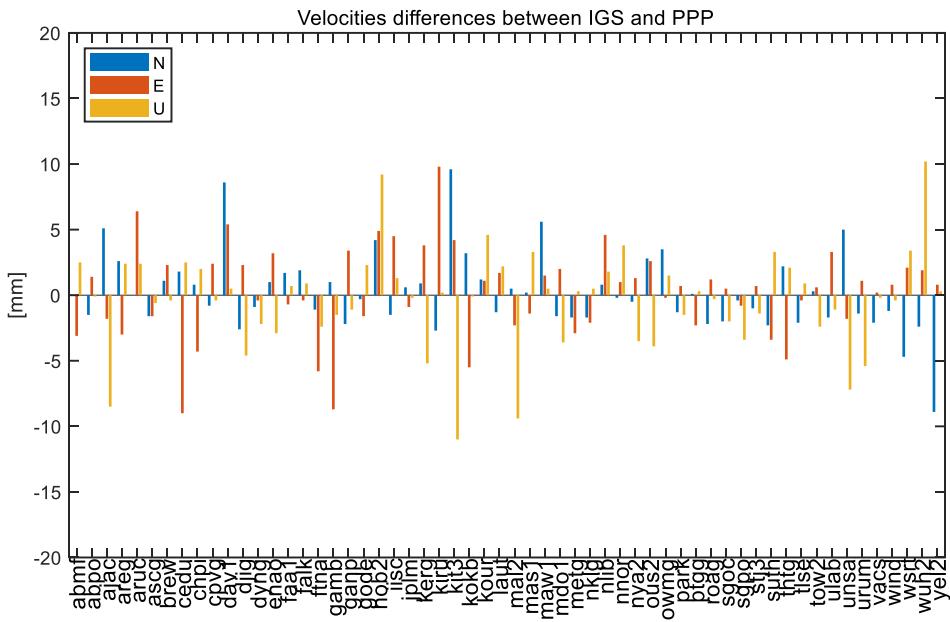


图 5.13 基于精密单点定位与基于 IGS 解的速度场在 N、E、U 三个方向上的差异

图 5.13 展示了基于精密单点定位与基于 IGS 解的速度场在 N、E、U 三个方向上的差异, 表 5.5 统计了在不同精度水平下的测站数目。可以看出, 基于精密单点定位技术获得的速度场在 N 方向上最优, U 方向次之, E 方向最差。E 方向上的速度场的误差主要由于在进行精密单点定位处理时模糊度未固定(采用实数解)造成的。

考虑到部分测站数据长度、数据连续性欠佳, 以及在 BDS-3 系统建设初期测站所在位置几何构型较差的情况, 表 5.6 统计了基于精密单点定位与基于 IGS 解的速度场在 N、E、U 三个方向上的差异小于 10mm/yr 时的均值、标准差和均方根(速度差值大于 10mm/yr 的测站剔除之后剩余 56 个测站参与统计)。结果表明, 基于精密单点定位与基于 IGS 解在 N、E、U 三个方向上的速度差异分别为 2.7、3.4、3.2mm/yr。

表 5.5 基于精密单点定位技术的速度场比较统计

N	E	U
<5mm/yr	<5mm/yr	<5mm/yr
53	51	50
<3mm/yr	<3mm/yr	<3mm/yr
48	38	40
<2mm/yr	<2mm/yr	<2mm/yr
36	29	29

表 5.6 基于精密单点定位技术的速度场精度统计(<10mm/yr)

	N[mm/yr]	E[mm/yr]	U[mm/yr]
均值	0.0	0.1	-0.4
标准差	2.7	3.4	3.2
均方根	2.7	3.4	3.2

5.3.3 基于网平差技术的北斗参考框架

在大规模 GNSS 网数据处理过程中, 需要引入一定数量的、坐标点位已知的高精度高等级的基准点作为 GNSS 网数据处理的基准控制。引入的位置基准不应引起观测值的变形和改正, 引入位置基准的方法经常有三种, 一种是网中有高级 GNSS 点时, 将高级 GNSS 点的坐标作为网平差时的位置基准; 第二种方法是网中无高级 GNSS 点时, 取网中任一点的伪距定位坐标作为固定网点坐标的起算数据; 第三种方法是引入合适的近似坐标系统下的秩亏自由网基准。一般采用前两种方法。

5.3.3.1 网平差处理的函数模型

设基线向量观测值为 ΔX_{ij} , 其改正数为 V_{ij} , 基线向量平差值为 $\Delta \bar{X}_{ij}$, 基线向量观测值的方差与协方差及其权阵分别为 $D_{\Delta x}$; 待定点近似坐标及其改正数分别为: X_i^0 , dX_i^0 , 待定点坐标平差值为 X_i 。 $i = 1, 2, 3, 4, \dots, n; j = 1, 2, 3, 4, \dots, n; i \neq j; n$ 为网中点数。

由 $\Delta X_{ij} = X_j - X_i$ 、 $\Delta \bar{X}_{ij} = \Delta X_{ij} + V_{\Delta X_{ij}}$ 以及 $X_i = X_i^0 + dX_i^0$ 三式, 得到基线向量观测值的误差方程

$$\begin{bmatrix} V_{\Delta x_{ij}} \\ V_{\Delta y_{ij}} \\ V_{\Delta z_{ij}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_i \\ dy_i \\ dz_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_j \\ dy_j \\ dz_j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x_{ij} + x_i^0 - x_j^0 \\ \Delta y_{ij} + y_i^0 - y_j^0 \\ \Delta z_{ij} + z_i^0 - z_j^0 \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

写为矩阵形式为

$$V_{ij} = -EdX_i + EdX_j - L_{ij} \quad (5-2)$$

式中, E 为单位阵。

$$L_{ij} = \begin{bmatrix} \Delta x_{ij} + x_i^0 - x_j^0 \\ \Delta y_{ij} + y_i^0 - y_j^0 \\ \Delta z_{ij} + z_i^0 - z_j^0 \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

由于各个基线向量观测值之间相互独立, 因而可分别对每个基线向量观测值的误差方程式组成法方程式, 将单个法方程的系数阵和常数项加到总法方程的对

应系数项和常数项上去。

对于上述的误差方程可建立相应的法方程式

$$-P_{ij}dX_i + P_{ij}dX_j - P_{ij}L_{ij} = 0 \quad (5-4)$$

将法方程简写为

$$NdX - U = 0 \quad (5-5)$$

解算法方程后得到未知数的改正值为

$$dX = N^{-1}U \quad (5-6)$$

各待定点坐标的平差值为

$$X_i = X_i^0 + dX_i \quad (5-7)$$

单位权方差估值为

$$\sigma_0^2 = V^T P V / [3m - 3(n - 1)] \quad (5-8)$$

式中, m 为基线向量个数, n 为网中点个数。

平差未知数的方差估值为

$$D_i = \sigma_0^2 N^{-1} \quad (5-9)$$

5.3.3.2 软件介绍

本文中选用的网平差软件 (GAMIT/GLOBK 软件) 是由美国麻省理工学院 (MIT) 和斯克里普斯海洋研究所 (SIO) 联合开发的开源高精度 GNSS 数据处理软件, 用户可根据自身需求对源程序进行修改。GAMIT 处理的基本观测量是双差观测值, 采用最小二乘算法进行参数估计, 其优点是可以完全消除卫星钟差与接收机钟差产生的影响, 同时也能大幅度减弱大气折射误差、轨道误差等的影响; GLOBK 是一个卡尔曼滤波器, 其输入信息是由 GAMIT 解算得到的测站坐标、地球自转参数、轨道参数等的估值及其协方差矩阵, 利用 Kalman 滤波进行空间和时间上的合并, 最终建立与某先验参考框架一致的参考框架, 获得测站坐标、卫星轨道、地球自转等参数在该框架下的信息。GAMIT/GLOBK 中使用的分析模型如表 5.7 所示。

表 5.7 GAMIT 分析模型

项目	GAMIT
分析策略	分布式子网分析
参数约束	松约束
模糊度解算	基线模糊度自举法
轨道	约束到 WUM 轨道
固体地球潮汐	IERS2010 convention (Petit and Luzum, 2010)
海洋潮汐模型	FES2004 模型
极潮模型	IERS2010 convention (Petit and Luzum, 2010)
相对论效应改正	IERS2010 convention (Petit and Luzum, 2010)
截止高度角	10
高阶电离层改正	应用 IONEX 模型
相位中心模型	IGb14.atx
太阳辐射压模型	EOCM (Springer 等, 1999)
卫星姿态模型	JPL 模型 (Bar-Sever, 1996)
采样间隔	30s
对流层湿延迟估计	每小时更新一次分段线性函数 VMF1 映射函数 (Boehm 等, 2006)
对流层梯度估计	每 12 小时更新一次在南北方向上的 2 个梯度参数

5.3.3.3 基于网平差技术的参考框架精度分析

为作比较, 本节中选用与 5.3.2.1 节中相同时段的 BDS-3 测站数据和 WUM 精密星历使用 GAMIT 软件进行网平差处理。考虑到 BDS-3 测站数据精度的有限性, 在网平差处理时采用松约束条件进行测站坐标、地球自转参数等参数的解算。同样选择 HOB2、CPVG、GODE 三个测站来做说明。相比 5.3.2.1 节中 HOB2 在早期 BDS-3 建立初期受可见卫星数目的影响, 本节中通过网平差技术获得的测站坐标精度在早期阶段得到较好的改善。通过网平差技术解算得到的测站 CPVG 与 IGS 解相比在 N、E、U 三个方向上的标准差分别为 0.57cm、0.75cm、1.03cm, 测站 GODE 与 IGS 解相比在 N、E、U 三个方向上的标准差分别为 0.55cm、0.50cm、0.84cm。相比较静态 PPP 解, 网解得到的测站 CPVG 的精度在 E、U 方向上分别得到约 4mm、2mm 的提升; 而测站 GODE 在 N 方向上的精度降低了约 2mm, 在 E 和 U 方向上也降低了小于 1mm 的精度。

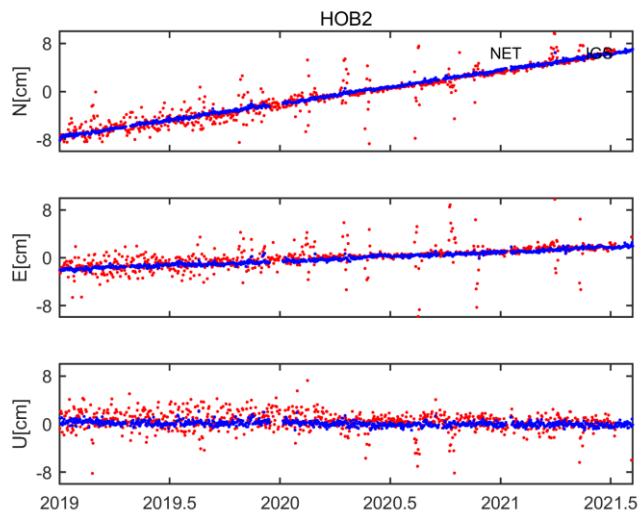


图 5.14 测站 HOB2 的坐标时间序列图

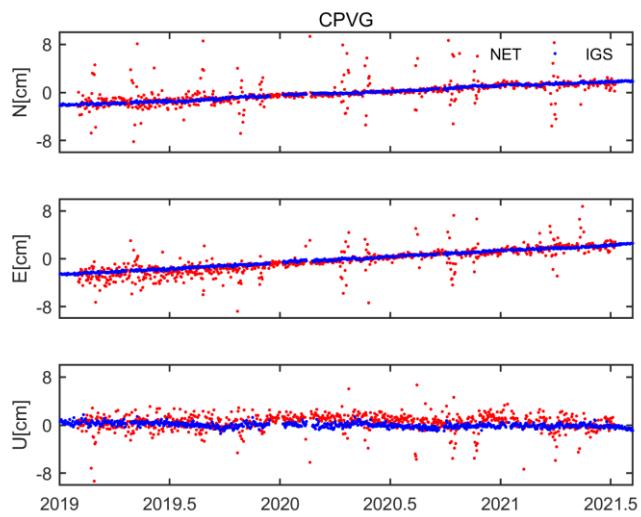


图 5.15 测站 CPVG 的坐标时间序列图

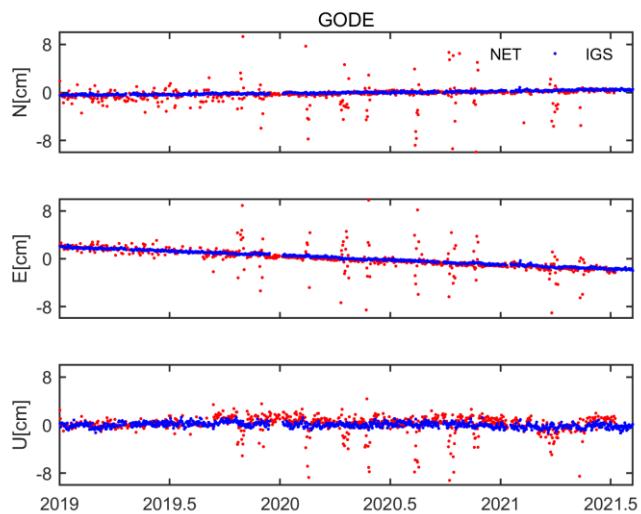


图 5.16 测站 GODE 的坐标时间序列图

5.3.3.3.1 网解精度的可靠性

利用 WUM 提供的 BDS-3 精密轨道和钟差产品对所选取的 58 个测站在 2019 年 1 月~2021 年 8 月时段内进行网平差解算, 对网解的定位结果与 IGS 解进行比较, 分析坐标精度的可靠性。

各测站网解定位的统计结果如图 5.17、图 5.18、图 5.19 所示, 分别为各测站在 N、E、U 三个坐标分量上坐标时间序列的均值、标准差和均方根的统计。如表 5.8 中的统计表明, 在所选的 58 个测站中在 N、E、U 三个坐标分量上均值小于 0.3cm、0.3cm、0.6cm 的测站数目分别为 46、48、42, 相比 PPP 定位分别增加了 10、3、7 个测站数; 标准差小于 0.6cm、0.6cm、1.2cm 的测站数目分别为 30、17、58, 相比 PPP 定位在 N 和 E 方向上分别减少了 21、7 个测站数, 在 U 方向上增加了 9 个测站数; 均方根小于 0.8cm、0.8cm、1.5cm 的测站数目分别为 49、46、58, 相比 PPP 定位在 N 方向上减少了 2 个测站, 在 E 和 U 方向上均增加了 9 个测站。

表 5.9 统计了 58 个测站在 N、E、U 三个坐标分量上标准差和均方根的均值,结果显示:各测站坐标精度的标准差在 N、E、U 三个方向上的均值分别为 0.61cm、0.67cm、0.96cm, 相比 PPP 定位结果在 N 方向上增加了约 1mm; 均方根在 N、E、U 三个方向上的均值分别为 0.71cm、0.73cm、1.14cm, 相比 PPP 定位结果在 N 方向上增加了约 1mm, 在 U 方向上减少了约 1mm。

综合表 5.8 和表 5.9 可知, 尽管表 5.9 中的统计表明基于精客单点定位解算的坐标精度与基于网平差技术解算的坐标精度相当, 表 5.8 中的测站坐标精度统计表明基于网平差技术解得的坐标精度的稳定度较差, 但有更多测站数目的综合精度得到了提升。值得一提的是, 基于网平差技术解算的 U 方向上的坐标无论是坐标稳定度还是综合精度都要优于基于精客单点定位技术解算的坐标。

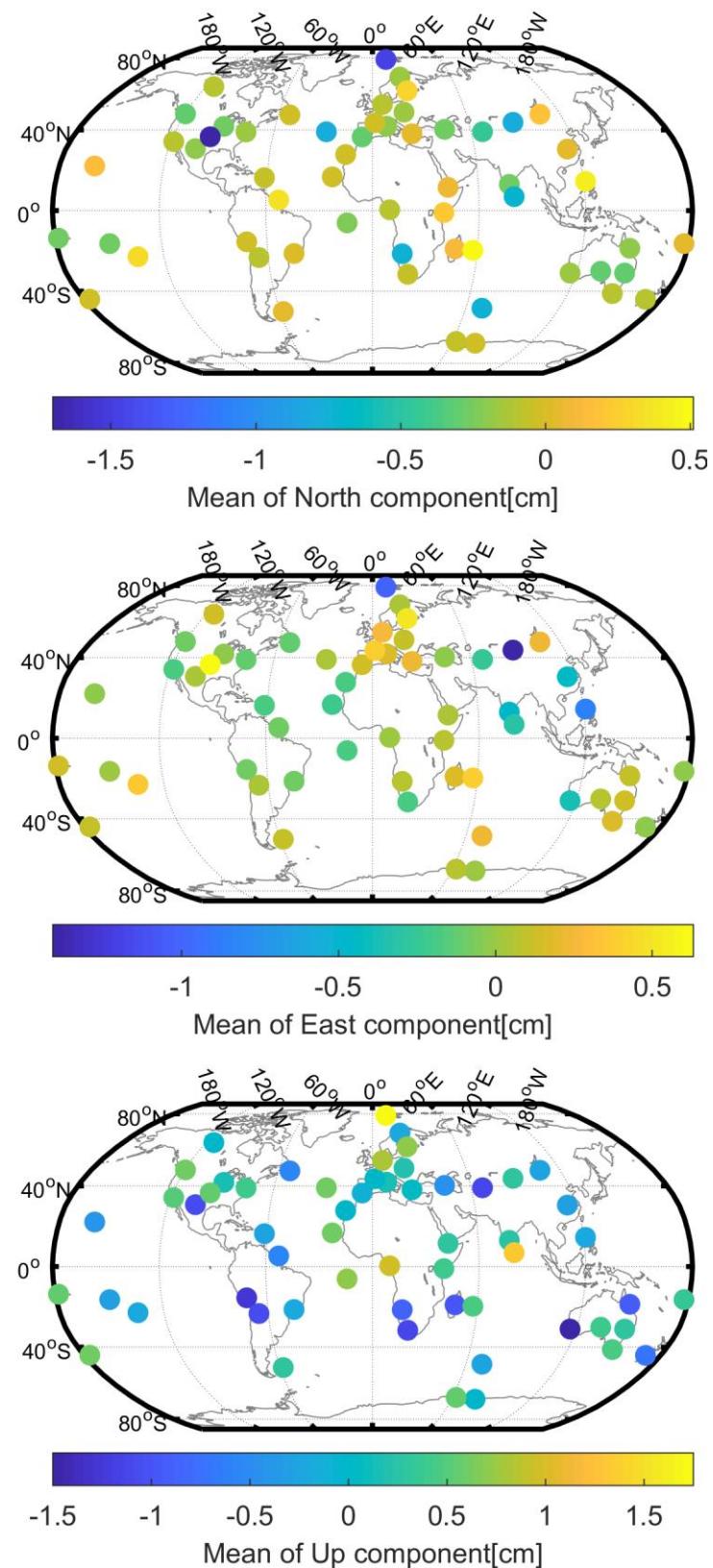


图 5.17 基于网平差技术的测站坐标误差在 N、E、U 三个坐标分量的均值

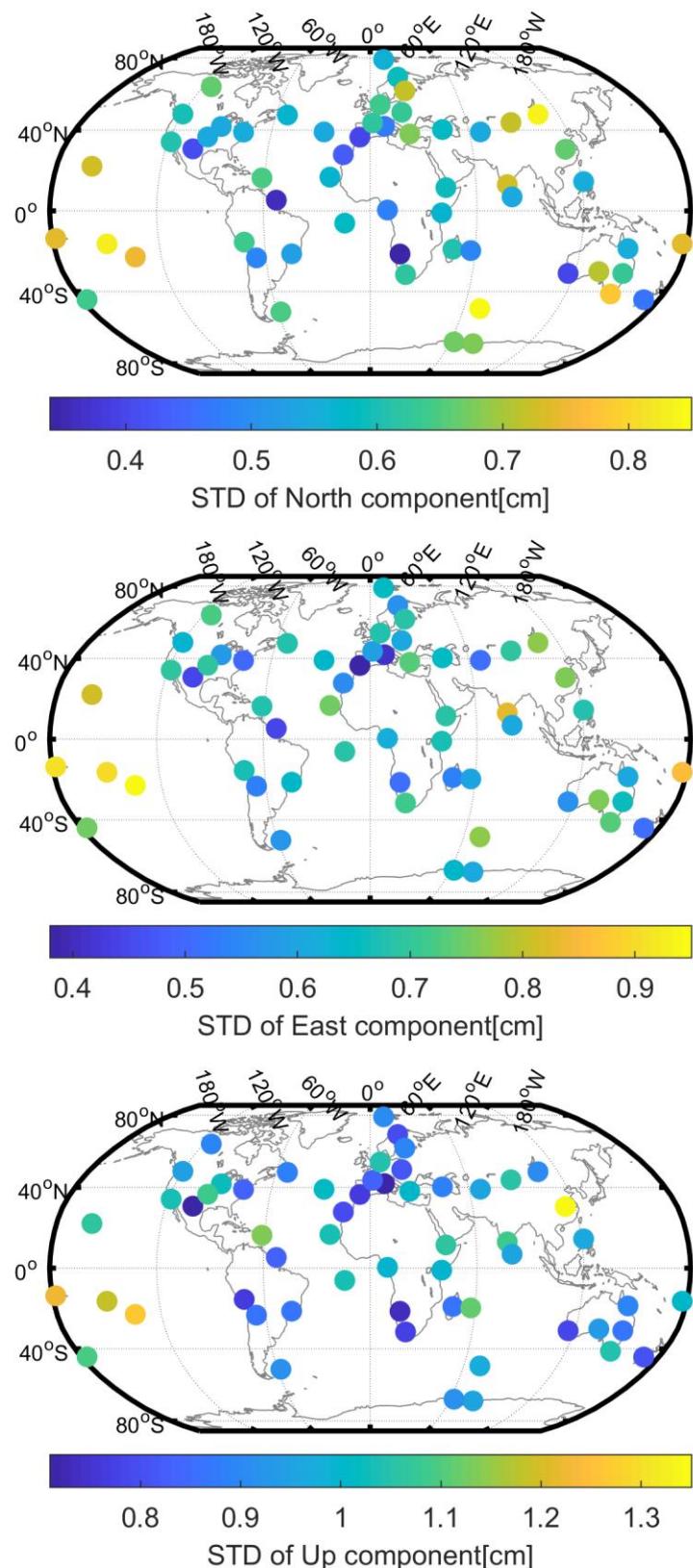


图 5.18 基于网平差技术的测站坐标误差在 N、E、U 三个坐标分量的标准差

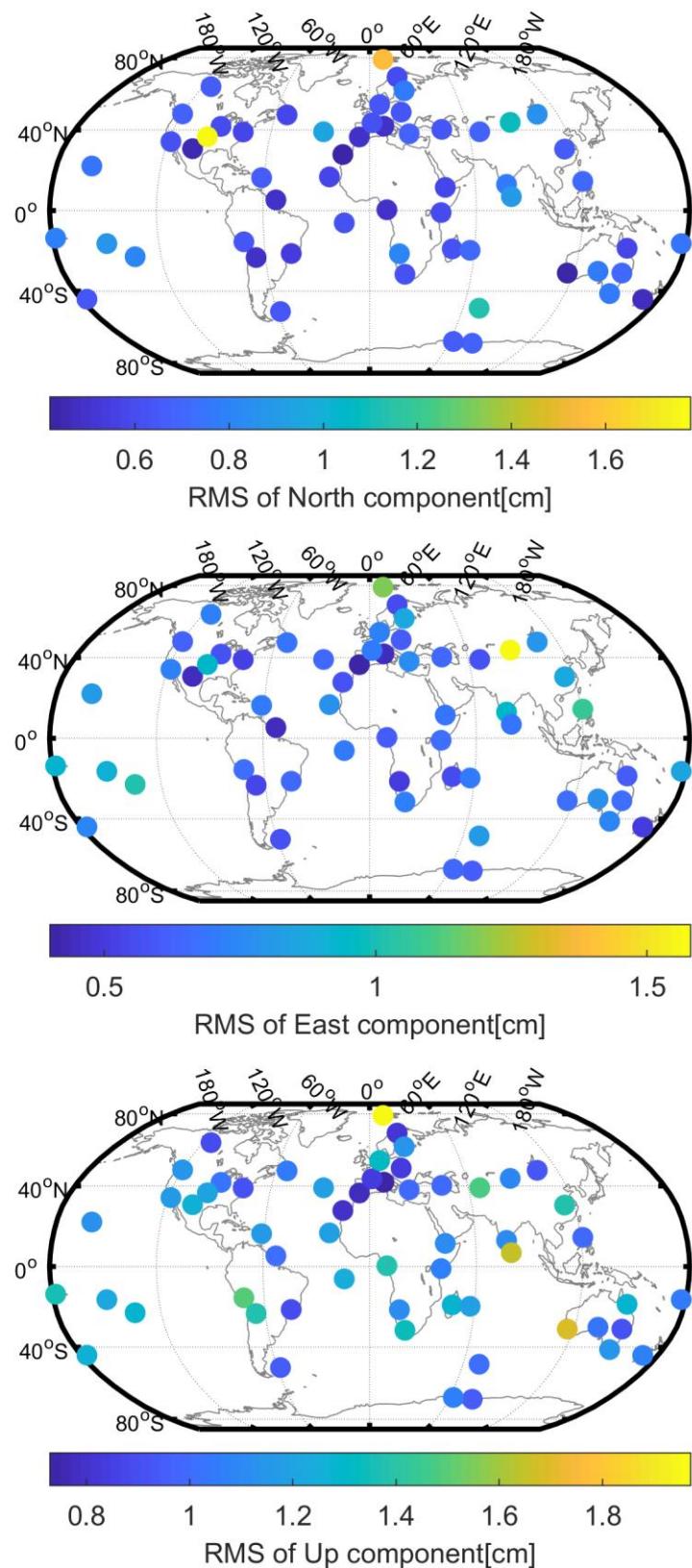


图 5.19 基于网平差技术的测站坐标误差在 N、E、U 三个坐标分量的均方根

表 5.8 基于网平差技术的测站坐标精度统计

	N	E	U
均值	<0.3cm	<0.3cm	<0.6cm
	46	48	42
标准差	<0.6cm	<0.6cm	<1.2cm
	30	17	58
均方根	<0.8cm	<0.8cm	<1.5cm
	49	46	58

表 5.9 基于网平差技术的测站坐标标准差与均方根的均值统计

	N [cm]	E [cm]	U [cm]
标准差	0.61	0.67	0.96
均方根	0.71	0.73	1.14

5.3.3.3.2 一致性分析

与 5.3.2.1.2 节中一样, 以同时段的 IGS 解为参考, 进行基于网平差技术的北斗参考框架的可靠性分析。图 5.20 为基于网平差技术的北斗参考框架与 IGS 解之间的 Helmert 转换参数的时间序列。相比图 5.10, 在 BDS-3 系统建设早期卫星数目有限的条件下, 通过网平差技术实现的北斗参考框架获得的原点、方向和尺度参数都得到了很大程度的提升。因此, 在本节中基于网平差技术 2019 年 11 月 25 日前的结果也纳入与 IGS 解的比较中, 各类参数的线性拟合和统计结果如表 5.10 所示。

结果显示, 基于网平差技术确定的北斗参考框架与 IGS 解相比, 原点在历元 2020.0 时刻 X、Y、Z 三个方向上的偏差分别为 0.5mm、-0.4mm、-0.3mm, 原点变化率在 X、Y、Z 三个方向上分别为 -1.23mm/yr、0.55mm/yr、-0.46mm/yr, 线性拟合后残差在 X、Y、Z 三个方向上的标准差分别为 2.6mm、2.5mm、3.5mm; 方向在历元 2020.0 时刻 X、Y、Z 三个方向上的偏差分别为 -19.2 μ as、-12.9 μ as、1.4 μ as, 方向变化率在 X、Y、Z 三个方向上分别为 -6.1 μ as/yr、16.5 μ as/yr、-4.1 μ as/yr, 线性拟合后残差在 X、Y、Z 三个方向上的标准差分别为 129.9 μ as、124.91 μ as、168.2 μ as; 尺度在历元 2020.0 时刻的偏差为 -0.16ppb, 尺度变化率为 0.044ppb/yr, 线性拟合后残差的标准差为 0.73ppb。与基于精密单点定位技术的全球北斗参考框架相比, 基于网平差技术的原点和方向都与 IGS 解具有更好的一致性。

表 5.10 基于网平差技术与 IGS 解之间的 Helmert 转换参数时间序列在历元 2020.0 时刻的线性拟合和统计

	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz	Scale
offset	0.5	-0.4	0.3	-19.2	-12.9	1.4	-0.164
drift	-1.23	0.55	-0.46	-6.1	16.5	-4.1	0.044
STD	2.63	2.51	3.49	129.87	124.91	168.21	0.729

注：偏移量的平移、旋转、尺度参数的单位分别为 mm、 μ as、ppb；趋势的平移、旋转和尺度参数的单位分别为 mm/yr、 μ as/yr 和 ppb/yr；各类参数方差的单位与偏移量的一致。

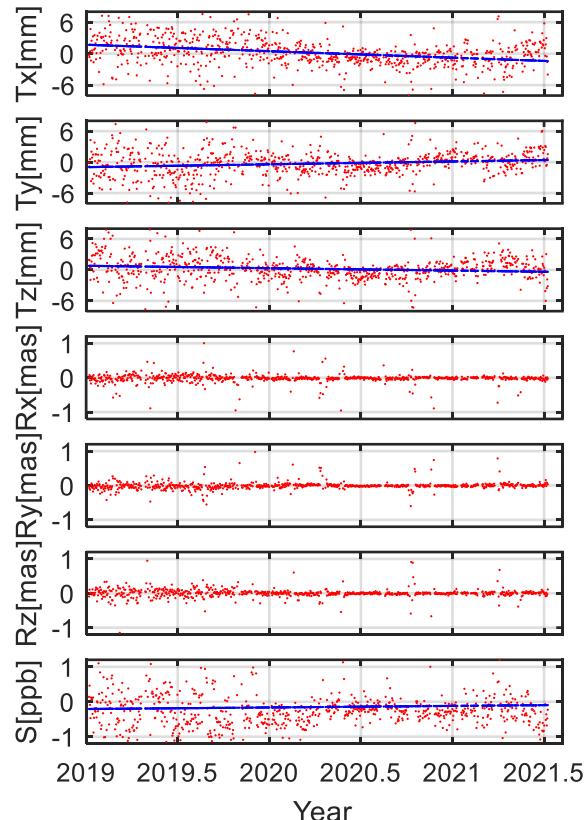


图 5.20 基于网平差技术与 IGS 解之间的 Helmert 转换参数时间序列

5.3.3.3.3 速度场

与 5.3.2.1.3 中一样，对基于网平差技术解算的 58 个测站位置，以 2020 年年积日 1 为参考时间基准，即 $t_0=2020.0$ ，对每个测站在 N、E、U 三个方向的坐标时间序列利用 4.1 节中的函数模型进行参数估计。拟合得到的水平速度场如图 5.21 所示，垂直速度场如图 5.22 所示（绿色箭头）。IGS 解作为参考，以相同时段相同方式获得的水平和垂直速度场也在图 5.21 和图 5.22 展示（蓝色箭头）。由图 5.21 可以看出，基于网平差技术获得的水平速度场非常接近。由图 5.22 可以看出，两类解的垂直速度场在数值上具有较为明显的差异。

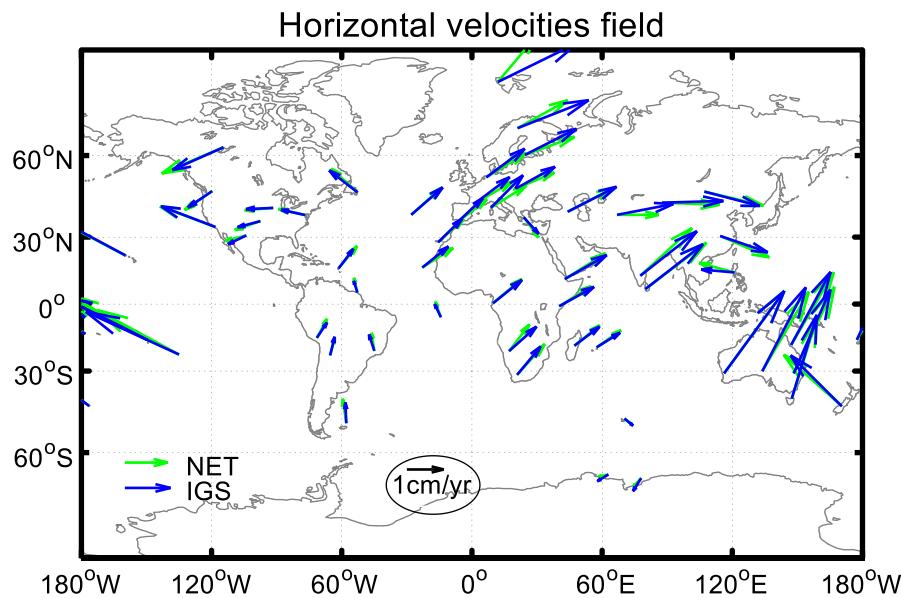


图 5.21 基于网平差技术（绿色）和基于 IGS 解的水平速度场（蓝色）

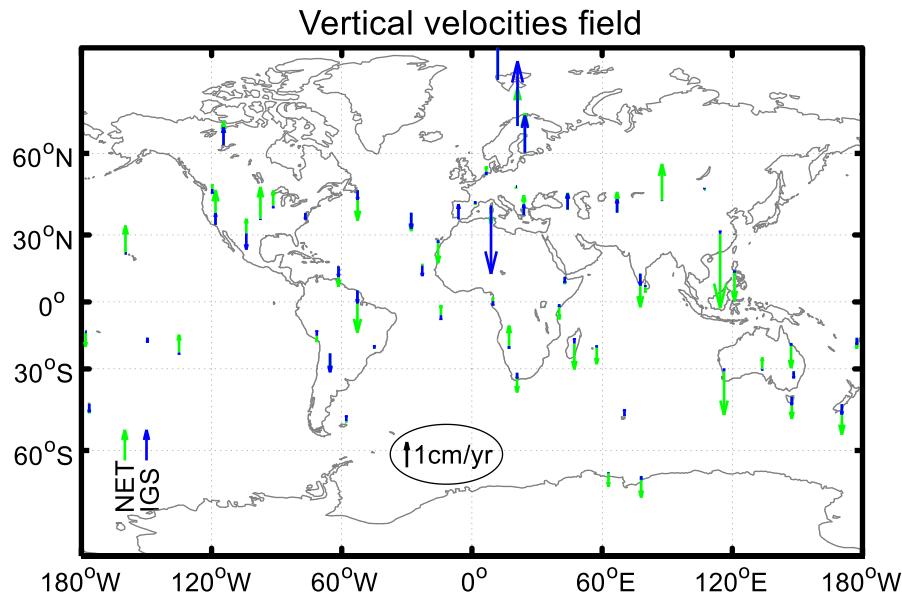


图 5.22 基于网平差技术（绿色）和基于 IGS 解的垂直速度场（蓝色）

图 5.23 展示了基于网平差技术与基于 IGS 解的速度场在 N、E、U 三个方向上的差异，表 5.11 统计了在不同精度水平下的测站数目，表 5.12 统计了基于精网平差技术与基于 IGS 解的速度场在 N、E、U 三个方向上的差异小于 10mm/yr 时的均值、标准差和均方根（速度差值大于 10mm/yr 的测站剔除之后剩余 52 个测站参与统计）。结果表明，基于网平差技术与基于 IGS 解在 N、E、U 三个方向上的速度差异的 RMS 分别为 2.4、2.7、3.1mm/yr。对比基于精密单点定位获得的速度场可知，基于网平差技术获得的 E 方向上的速度场与基于 IGS 解获得的 E 方向上速度场差异小于 2mm/yr 的测站个数由 29 个增长到 37 个，且在 E 方向

上统计的 RMS 由 3.4mm/yr 减小到 2.7mm/yr。由此可以得出结论，基于网平差技术获得的速度场在 E 方向上相比基于精密单点定位技术获得的 E 方向上的速度场精度要高，而在 N 和 U 方向上的速度场精度差异不大。

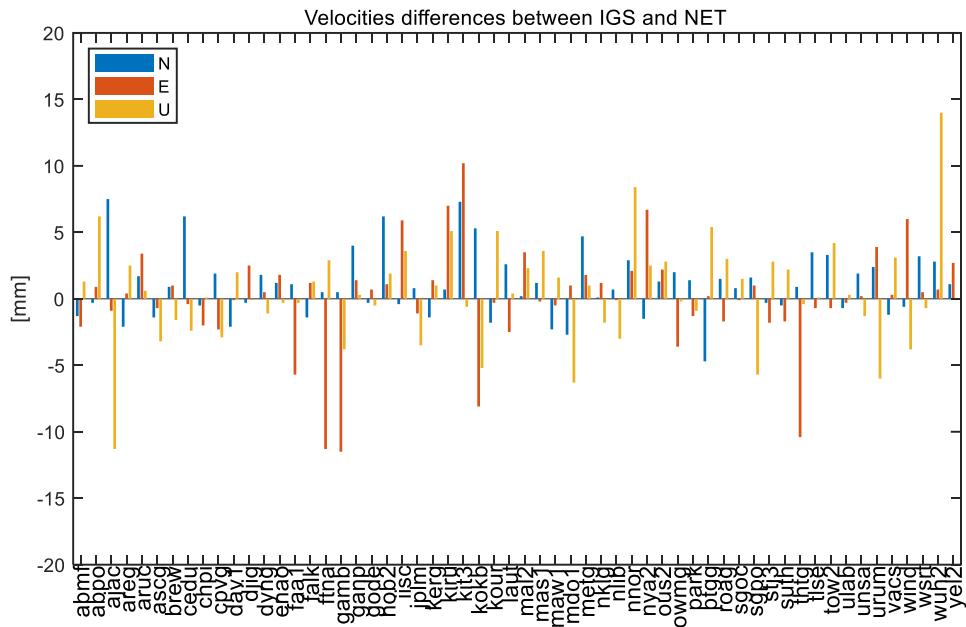


图 5.23 基于网平差技术与基于 IGS 解的速度场在 N、E、U 三个方向上的差异

表 5.11 基于网平差技术的速度场比较统计

N	E	U
<5mm/yr	<5mm/yr	<5mm/yr
53	48	47
<3mm/yr	<3mm/yr	<3mm/yr
47	44	38
<2mm/yr	<2mm/yr	<2mm/yr
38	37	28

表 5.12 基于网平差技术的速度场精度统计(<10mm/yr)

	N[mm/yr]	E[mm/yr]	U[mm/yr]
均值	0.7	0.5	0.5
标准差	2.3	2.7	3.1
均方根	2.4	2.7	3.1

5.4 北斗区域参考框架初探

由于接收北斗信号的 IGS 站在中国区域内数目有限, 本节中选取了在欧洲区域分布比较密集的 30 个 IGS 站作为区域参考框架的研究对象。测站分布如图 5.24 所示。所用数据范围和精密轨道和钟差产品与 5.3 节中一致。

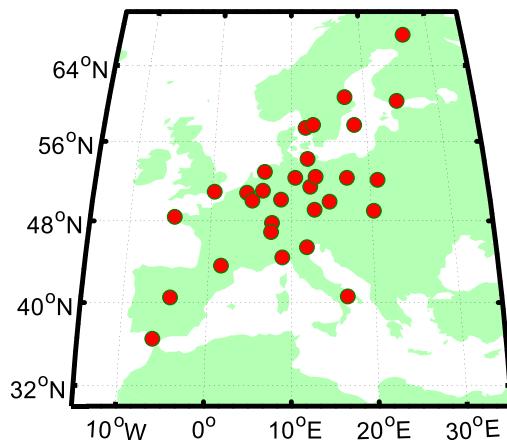


图 5.24 区域网测站分布图

5.4.1 可靠性分析

利用 WUM 提供的精密轨道和钟差产品对所选取的 30 个测站在 2019 年 1 月~2021 年 8 月时段内分别实施单天静态 PPP 解算和网平差解算, 网平差解算时采用对测站坐标等各类参数施加绝对约束。对两类解与 IGS 解进行比较, 分析坐标精度的可靠性。各测站两种解精度的统计结果如图 5.25、图 5.26、图 5.27 所示, 分别为各测站坐标时间序列的均值、标准差和均方根的统计。每个图左列(网解)和右列 (PPP 解) 3 个子图依次为在 N、E、U 三个坐标分量上的统计。

表 5.13 和表 5.14 中测站坐标精度的统计表明: 对于基于网平差技术解算的测站坐标而言, 所选取区域网中 30 个测站在水平方向上的平均精度精约为 0.30cm, 高程方向上的平均精度约为 0.65cm; 对于基于精密单点定位技术的测站坐标而言, 所选取区域网中 30 个测站在 N 方向上的平均精度精度约为 0.45cm, 在 E 方向上的平均精度精度约为 0.67cm, 高程方向上的平均精度约为 1.12cm。与 5.3 节中的结果类似, 基于网平差技术解算的测站坐标精度在水平方向上的精度较为一致, 而基于精密单点定位技术解算的测站坐标精度在 N 方向上要优于 E 方向约 2mm。

综合分析可见, 在所选的区域网中基于网平差技术的测站坐标精度优于基于精密单点定位技术。其主要原因在于基于网平差技术解的各测站之间解可以相互

约束，而基于精密单点定位技术解的测站之间没有相关性。

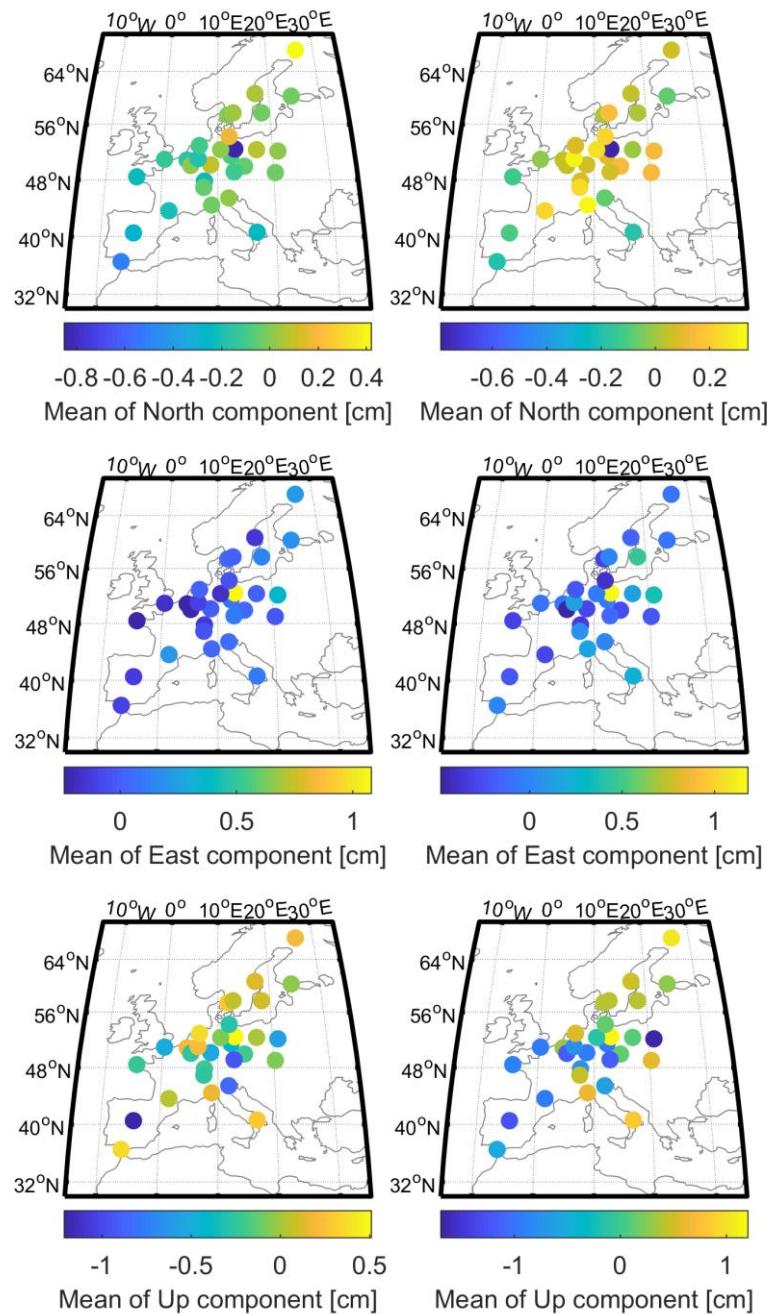


图 5.25 区域网测站坐标精度在 N、E、U 三个方向上的均值（左：网解；右：PPP）

表 5.13 测站坐标精度统计

	N		E		U	
	网解	PPP	网解	PPP	网解	PPP
均值	<0.3cm		<0.3cm		<0.6cm	
	27	27	28	23	27	14
标准差	<0.6cm		<0.6cm		<1.0cm	
	30	24	30	20	30	24
均方根	<0.8cm		<0.8cm		<1.2cm	
	29	29	29	23	29	18

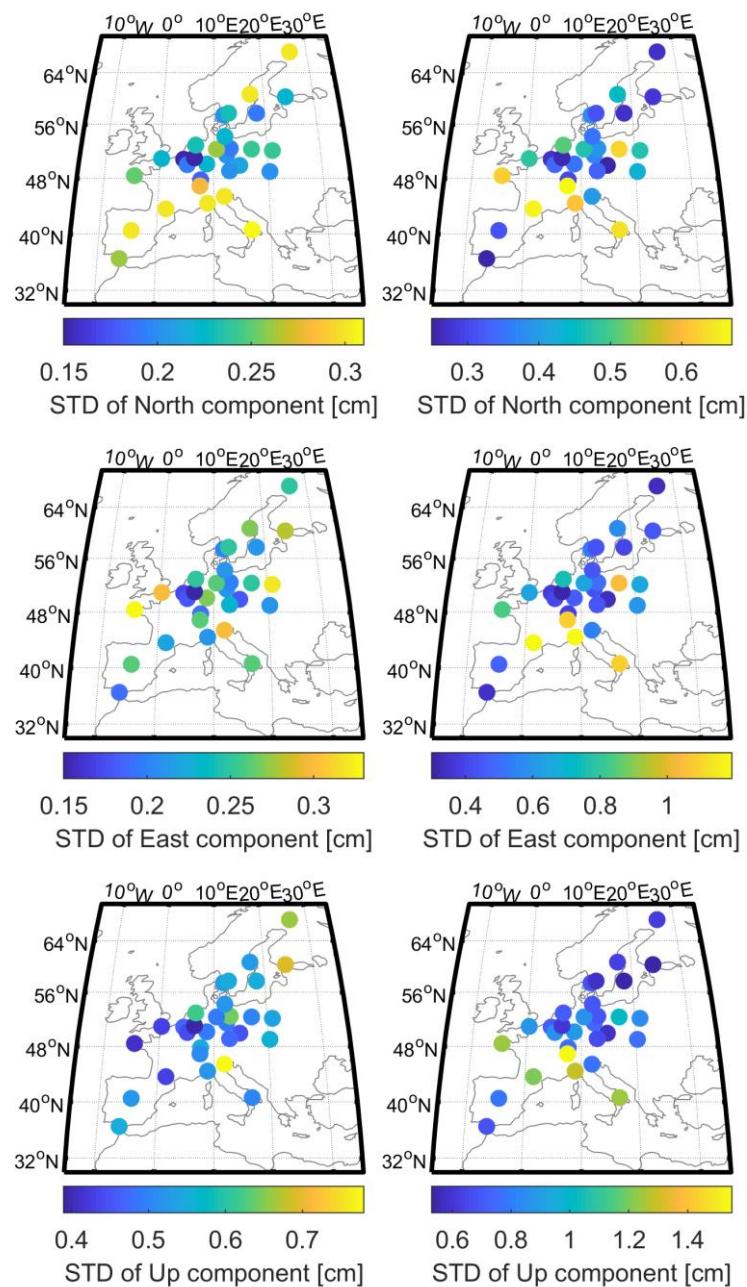


图 5.26 区域网测站坐标精度在 N、E、U 三个方向上的标准差（左：网解；右：PPP）

表 5.14 测站坐标标准差与均方根的均值统计

	N [cm]		E [cm]		U [cm]	
	网解	PPP	网解	PPP	网解	PPP
标准差	0.23	0.41	0.24	0.60	0.52	0.82
均方根	0.30	0.45	0.30	0.67	0.65	1.12

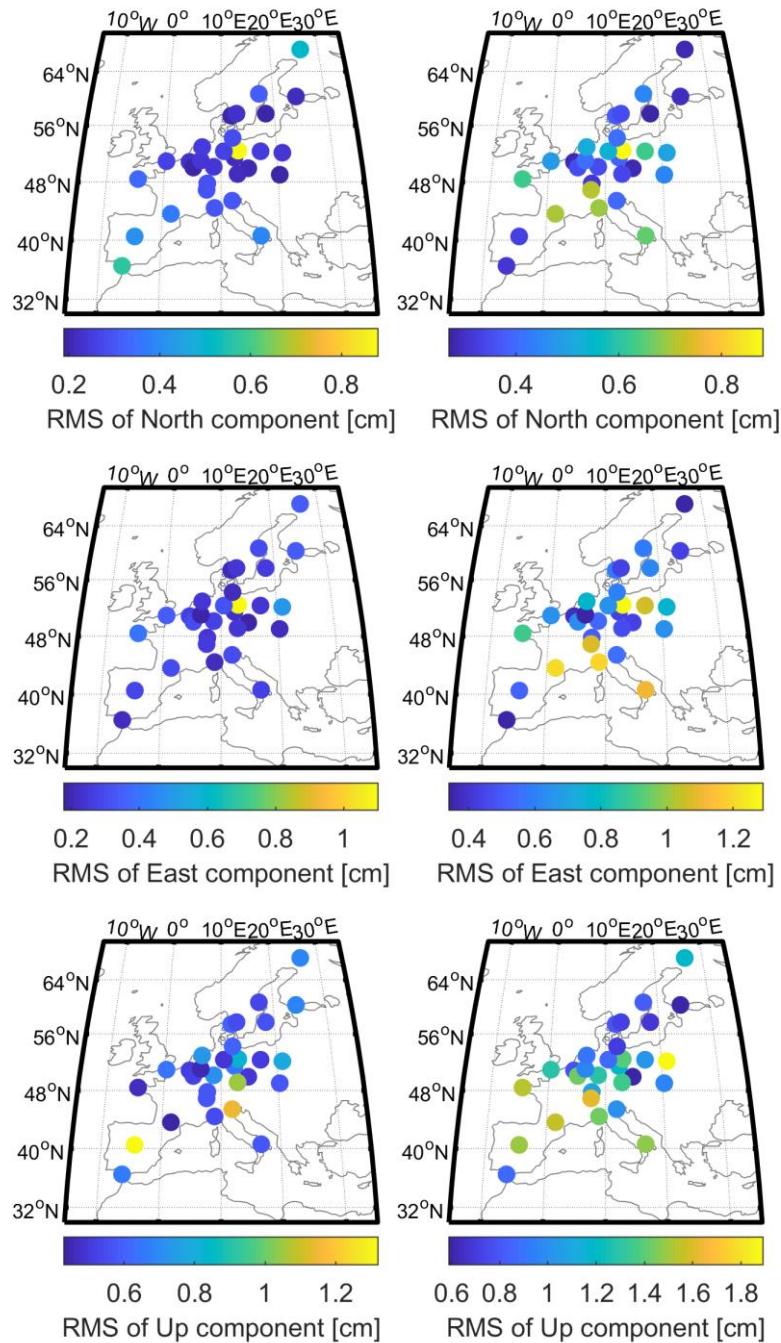


图 5.27 区域网测站坐标精度在 N、E、U 三个方向上的均方根（左：网解；右：PPP）

5.4.2 一致性分析

为研究区域北斗参考框架的可靠性, 本节中利用 Helmert 转换方法分析分布于欧洲区域的 30 个北斗站基于网平差技术和精密单点定位技术与 IGS 解的一致性。七个转换参数的时间序列如图 5.28 所示。与 5.3 节中的结果一致, 在 BDS-3 系统建设早期 (即 2019 年 11 月前), 基于精密单点定位技术获得的框架原点、方向和尺度都是不可信的。因此, 与 5.3 节中一样, 2019 年 11 月 25 日前基于精密单点定位技术获得的结果不参与讨论。两种解的三类参数的线性拟合和统计结果分别如表 5.15 和表 5.16 所示。

原点参数的结果显示, 在参考历元时刻 2020.0 基于网平差技术的框架原点与 IGS 解在 X、Y、Z 三个方向上的偏差分别为 17.4mm、5.7mm、-8.6mm, 原点差异的变化率在 X、Y、Z 三个方向上分别为 1.47mm/yr、-2.07mm/yr、10.47mm/yr, 在 X、Y、Z 三个方向上的拟合残差标准差分别为 13.5mm、17.8mm、13.0mm。而基于精密单点定位技术的框架原点与 IGS 解在历元时刻 2020.0 处的偏差为 44.4mm、-20.4mm、-25.1mm, 相较基于网平差技术的框架原点在参历元时刻具有较大的偏差值, 与 IGS 解原点差异的变化率在 X 方向上存在 17.4mm/yr 的差异, 在 Y 方向上的原点差异的变化率具有相反的符号, 在 Z 方向上的变化率相等, 拟合残差的标准差在 X、Y、Z 三个方向上分别增加了 5.4mm、13.9mm、4.6mm, 约为基于精密单点定位技术的三分之一。综合分析得到, 基于网平差技术的区域参考框架原点与 IGS 解具有更好的一致性。

方向参数的分析结果显示, 基于精密单点定位技术的方向参数相比基于网平差技术的方向参数在参考历元时刻 2020.0 的偏差值由 0.44mas、1.57mas、-0.63mas 降低为 0.13mas、0.62mas、0.13mas, 方向参数的变化率在 X 方向上由 0.02mas/yr 增加为 0.13mas/yr, 在 Y 和 Z 方向上分别由 -0.58mas/yr、0.17mas/yr 降低为 -0.15mas/yr、-0.01mas/yr, 拟合残差的标准差在三个方向上分别减小了 0.35mas、0.22mas、0.30mas, 约为基于精密单点定位技术的二分之一。综合分析得知, 基于网平差技术的方向参数在参考历元时刻偏差值、偏差值变化趋势以及标准差相比基于精密单点定位技术的方向参数具有统一的提高。

尺度参数的比较结果显示, 基于网平差技术的尺度与 IGS 解之间具有较大的变化率 -1.48ppb/yr, 基于精密单点定位技术的尺度与 IGS 解的尺度变化率为

0.65ppb/yr。显然,由网平差技术确定的区域参考框架的尺度是非常不准确的,以至于在 2021.5 历元时刻基于网平差技术的尺度偏差达到 2.68 ± 1.39 ppb (约为 18.8 ± 9.7 mm),基于精密单点技术确定的区域参考框架的尺度在 2021.5 历元时刻基于网平差技术的尺度偏差为 0.24 ± 1.49 ppb (1.7 ± 10.43 mm)。

综合以上结果可以得出结论,基于 BDS-3 系统建立的区域参考框架的精度可达厘米级精度,网平差技术确定的原点和方向与 IGS 解具有较好的一致性。

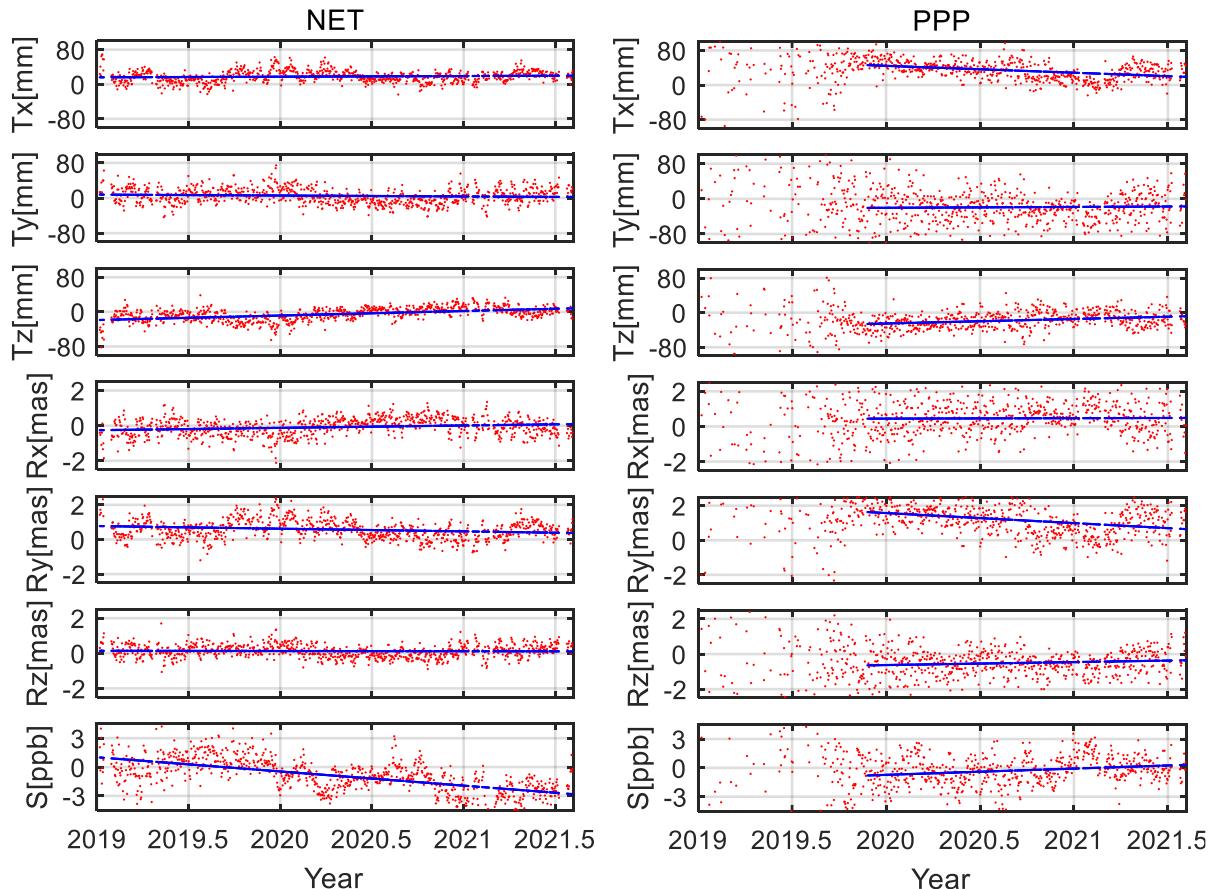


图 5.28 基于网平差技术 (左) 和基于精密单点定位技术 (右) 的北斗参考框架与 IGS 解之间的 Helmert 转换参数时间序列

表 5.15 基于网平差技术与 IGS 解之间的 Helmert 转换参数时间序列在历元 2020.0 时刻的线性拟合和统计

	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz	Scale
offset	17.4	5.7	-8.7	-0.13	0.62	0.13	-0.46
drift	1.47	-2.07	10.47	0.13	-0.15	-0.01	-1.48
STD	13.5	17.8	13.0	0.48	0.56	0.37	1.39

注: 偏移量的平移、旋转、尺度参数的单位分别为 mm、mas、ppb; 趋势的平移、旋转和尺度参数的单位分别为 mm/yr、mas/yr 和 ppb/yr; 各类参数方差的单位与偏移量的一致。

表 5.16 基于精密单点定位技术与 IGS 解之间的 Helmert 转换参数时间序列在历元 2020.0
时刻的线性拟合和统计

	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz	Scale
offset	44.39	-20.42	-25.12	0.44	1.57	-0.63	-0.73
drift	-15.93	1.96	10.46	0.02	-0.58	0.17	0.65
STD	18.93	31.77	17.58	0.83	0.78	0.67	1.49

注：偏移量的平移、旋转、尺度参数的单位分别为 mm、mas、ppb；趋势的平移、旋转和尺度参数的单位分别为 mm/yr、mas/yr 和 ppb/yr；各类参数方差的单位与偏移量的一致。

5.4.3 速度场

利用上述区域网中的 30 个北斗站 2 年零 8 个月基于网平差技术和基于静态 PPP 的定位结果，以为 $t_0=2020.0$ 参考时间基准，对每个测站在 N、E、U 三个方向的坐标时间序列利用 4.1 节中的模型进行最小二乘参数估计。以相同时段的 IGS 解作为参考，拟合得到的水平速度场如图 5.29，垂直速度场如图 5.30 所示。图中红、绿、蓝色箭头分别代表基于精密单点定位、网平差技术和 IGS 解的速度场。由图 5.29 可以看出，三种解的水平速度场大致相同，其中基于网平差技术的速度场的趋势与 IGS 解更为接近。由图 5.30 可以看出，三种解的垂直速度场在数值上也大致相同，有少数几个站的垂直速度较为异常。

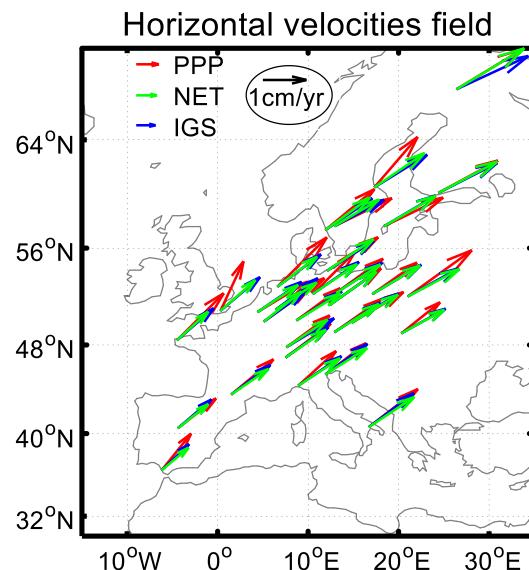


图 5.29 区域网水平速度场

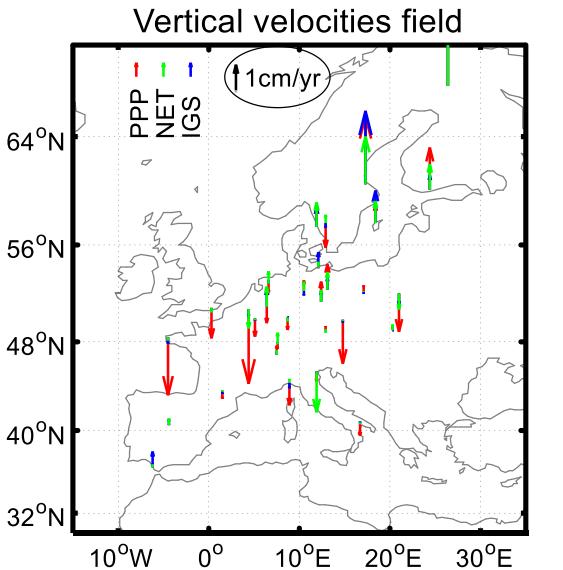


图 5.30 区域网垂直速度场

图 5.31 展示了基于网平差技术与基于 IGS 解的速度场在 N、E、U 三个方向上的差异，图 5.32 展示了基于精密单点定位与基于 IGS 解的速度场在 N、E、U 三个方向上的差异，明显可以看出基于网平差技术的速度场与 IGS 解获得的速度场具有更好的一致性。

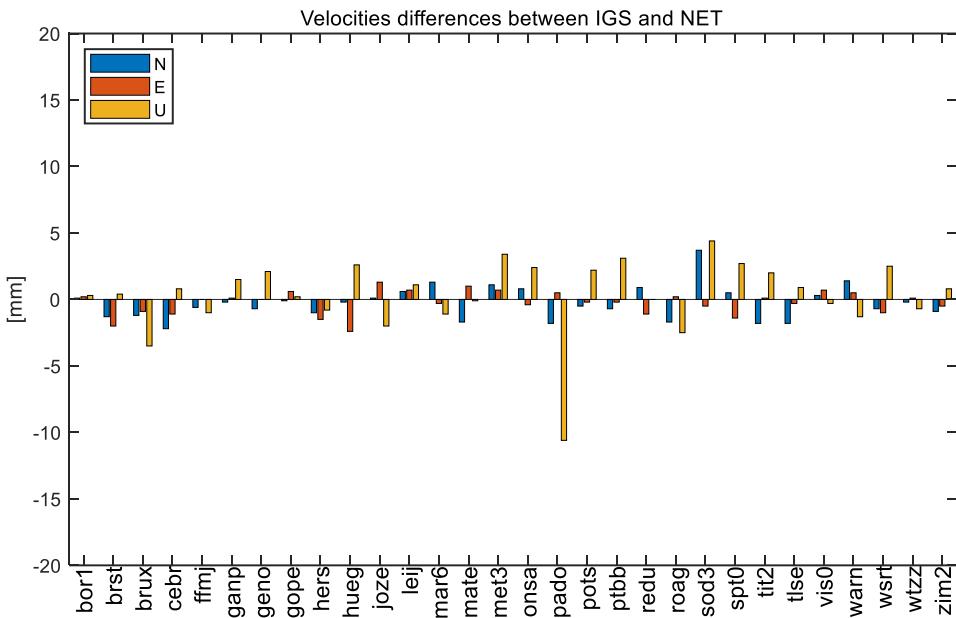


图 5.31 基于网平差技术与基于 IGS 解的速度场在 N、E、U 三个方向上的差异

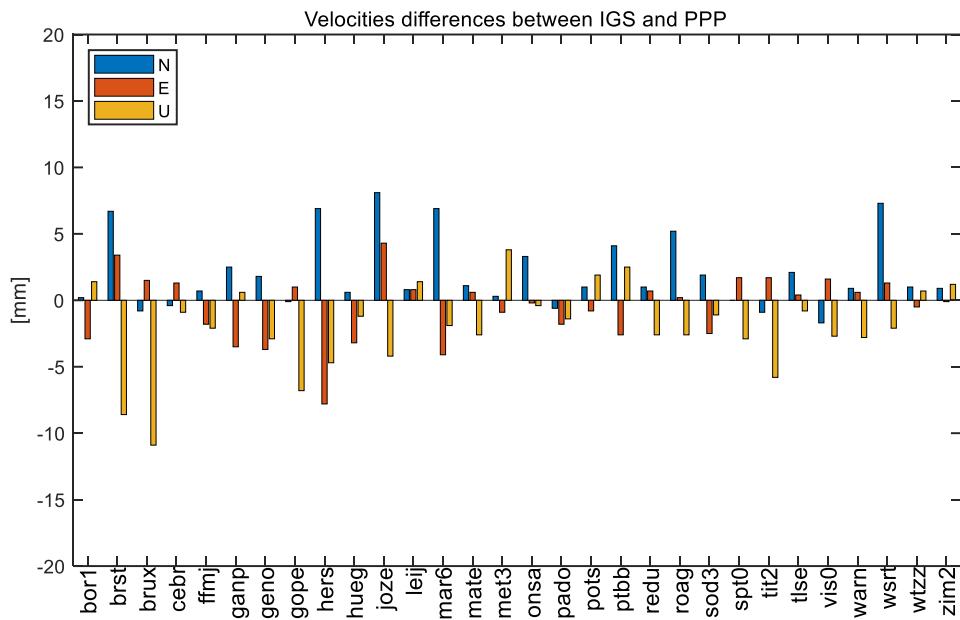


图 5.32 基于精密单点定位与基于 IGS 解的速度场在 N、E、U 三个方向上的差异

表 5.17 和表 5.18 分别统计了基于网平差技术和基于精密单点定位技术在不同精度水平下的测站数目。可以看出，基于网平差技术的速度场在水平方向上有多数站优于 2mm/yr，在垂直方向上有多数站优于 3mm/yr，而基于精密单点定位技术获得的速度场仅有约 2/3 的测站数在水平方向上优于 2mm/yr，在高程方向上优于 3mm/yr。

表 5.19 和表 5.20 分别统计了基于网平差技术与基于 IGS 解的速度场和基于精密单点定位技术与基于 IGS 解的速度场在 N、E、U 三个方向上的差异小于 5mm/yr 时的均值、标准差和均方根（速度差值大于 5mm/yr 的测站被剔除）。结果表明，在参与速度场解算的 30 个站中，基于网平差的技术中只有 1 个站被剔除，基于精密单点定位技术中有 9 个站被剔除。剔除后统计的基于网平差技术的速度场精度的均方根在 N 和 E 方向上分别小于基于精密单点定位技术的速度场精度的均方根 0.4mm/yr、1.0mm/yr。由此可见，基于网平差技术在建立区域北斗参考框架时在水平方向上的贡献和优势。另外，基于精密单点定位技术的速度场解算受 BDS-3 系统建设初期测站所在位置几何构型影响较为严重，这一问题在数据长度进一步增加后会得到改善。

表 5.17 基于网平差技术的区域网速度场比较统计(NET)

N	E	U
<5mm/yr	<5mm/yr	<5mm/yr
30	30	29
<3mm/yr	<3mm/yr	<3mm/yr
29	30	25
<2mm/yr	<2mm/yr	<2mm/yr
28	29	18

表 5.18 基于精密单点定位技术的区域网速度场比较统计(PPP)

N	E	U
<5mm/yr	<5mm/yr	<5mm/yr
24	29	26
<3mm/yr	<3mm/yr	<3mm/yr
22	23	23
<2mm/yr	<2mm/yr	<2mm/yr
20	20	13

表 5.19 基于网平差技术的区域网速度场精度统计(NET) (29 个站)

	N[mm/yr]	E[mm/yr]	U[mm/yr]
均值	-0.2	-0.3	0.617
标准差	1.2	0.9	1.9
均方根	1.2	0.9	2.0

表 5.20 基于精密单点定位技术的区域网速度场精度统计(PPP) (21 个站)

	N[mm/yr]	E[mm/yr]	U[mm/yr]
均值	1.0	-0.8	-0.5
标准差	1.3	1.7	2.0
均方根	1.6	1.9	2.0

5.5 本章小结

本章中首先介绍了北斗参考框架的现状, 分析了目前北斗卫星导航系统所用坐标系的局限性和建立我国自主参考框架的必要性。接着, 介绍了北斗三号卫星导航系统的卫星星座和所用坐标系的基本情况。在 4.3 节中以 IGS 解为参照对象, 选取分布全球的 58 个接收 BDS-3 卫星信号的测站作为研究对象, 对比分析

了基于精密单点定位技术和基于网平差技术建立的全球北斗参考框架的可靠性和速度场精度。结果表明：

- 1) 基于精密单点定位技术的测站受所在区域可见卫星数目有限的问题，测站坐标精度受到一定的影响，这一问题在系统建成之后得以解决。但仍有部分测站所在区域卫星覆盖能力有限，因而定位精度没有得到提升；
- 2) 基于网平差技术的卫星定位能力要优于基于精密单点定位技术的定位能力，这一点在早期 BDS-3 卫星还未建成的时候表现尤为突出；
- 3) 基于 BDS-3 系统的全球北斗参考框架可达到毫米级的精度。与基于精密单点定位技术的全球北斗参考框架相比，基于网平差技术的原点和方向都与 IGS 解具有更好的一致性。
- 4) 基于精密单点定位技术的速度场和基于网平差技术的速度场与 IGS 解的速度场较为一致。基于网平差技术的速度场精度在 E 方向上得到了提高，这一结果得益于网平差技术中整周模糊度的固定。

在 4.4 节中，选取分布于欧洲区域的 30 站个作为区域参考框架的研究对象，对比分析了基于精密单点定位技术和基于网平差技术建立的北斗区域参考框架的可靠性和速度场精度。结果表明：

- 1) 基于网平差技术的测站坐标精度和速度场精度与 IGS 解的坐标和速度场精度相比基于精密单点定位技术具有更好的一致性；
- 2) 基于网平差技术的测站坐标精度在 E 方向上相比精密单点定位技术提高了 2mm；
- 3) 基于 BDS-3 系统建立的区域参考框架的精度可达厘米级精度，网平差技术确定的原点和方向与 IGS 解具有较好的一致性。相比单点定位技术，网平差技术确定的原点不确定度提高了三分之一，方向不确定度提高了二分之一。
- 4) 在目前数据长度和 BDS-3 建设早期覆盖能力有限的条件下，基于网平差技术的区域网速度场精度在 N 和 E 方向上相比基于精密单点定位技术提高了 0.4mm/yr, 1.0mm/yr，显示出网平差技术在建立区域参考框架时的优越性。

无论是全球网还是区域网，参考框架的速度场精度在数据长度进一步增加后会得到改善。

第 6 章 总结和展望

6.1 本文主要工作总结

地球参考框架的建立为地球科学的研究和测绘科学领域的研究提供了重要的基准保障。亚毫米级地球参考框架精度更是当前地球科学的研究中重要的实现目标。本文着眼于估计地球参考框架的精度和可靠性，并对长时间序列的坐标残差进行了噪声特性分析和区域空间滤波。在分析 GNSS 技术局限性的基础之上，在北斗卫星导航系统的自主运控的背景下，以 BDS-3 号系统所发射的信号为研究对象，分别建立了基于 BDS-3 数据的全球和区域参考框架，并分析了其可靠性和速度场精度，以期为建立我国自主的地球参考框架提供参考。

本文的主要研究工作和研究成果如下：

1、以 IGS 解为参考对象，比较和分析了最新国际地球参考框架 ITRF2014、DTRF2014、JTRF2014 的精度和它们在没有数据支撑的条件下的可靠性。以 1995-2020 年连续 IGS 位置时间序列为参考，采用 Helmert 变换方法研究了上述三个参考框架的特征。结果表明：1) IGS 解的基准维持依赖于应用于核心站子集的最小约束条件。由于用于将 IGS 解与特定框架对齐的核心站数目的减少，框架对齐后的 IGS 解与 ITRF2014 在 Y 分量和 Z 分量的原点差异分别达到 1.8mm 和 2.0mm；2) 由于 ITRF 中部分参数未模型化和所建模型存在一定的误差，ITRF2014 的方向与定义方向(即 ITRF2008 的方向)的分别以 11.9、5.5 和 $8.4\mu\text{as/yr}$ 的速度偏离，ITRF2014 的尺度以 -0.038ppb/yr 的速度偏离定义的尺度；3) 对比 DTRF2014 和 IGS 解，X/Y 坐标轴方向的原点率参数和 X/Z 坐标轴方向的方向率参数在确定期和预测期表现出明显的差异，其中 X/Y 原点率参数从 0.07、 -0.11mm/yr 转变为 -0.17 、 -0.18mm/yr ，X/Z 方向率由 -3.6 、 $2.9\mu\text{as/yr}$ 转变为 15.9 、 $13.2\mu\text{as/yr}$ ；4) 对于 JTRF2014，其 X、Y、Z 坐标分量上原点差异的周年信号分别可达 1.5、3.0 和 2.4mm，其随时间的变化趋势与长期趋势不一致。此外，除了 X 和 Y 坐标分量上存在较大的线性差异和季节性信号外，方向参数发生了明显的趋势切换。尺度偏移量随时间的变化特征可能与 SLR 地面测站网周与周之间存在的差异，以及用以综合 SLR 与 VLBI 的“本地连接”和权重有关。

2、以 ITRF2014 为参考基准，分析了贡献于 IGS 服务中心第二次重处理解

的 6 个分析中心的原点、方向和尺度的特性。结果表明：1) 各分析中心的原点间差异较大，其中 EMR, JPL, MIT 三个分析中心的原点中包含了显著的季节性信号以及 GPS 交点年信号；2) 各分析中心的方向一致性较好（小于 3uas/yr），这一点得益于各分析中心的测站分布良好；3) 各分析中心的尺度一致性小于 0.006ppb/yr；4) 综合后的 IG2 与 IGb08 具有良好的一致性，体现出综合策略的可靠性。

3、以测站坐标时间序列为研究对象，根据测站坐标中可能包含的线性和非线性信号以及存在的噪声构建了测站坐标时间序列的拟合模型，利用构建的时间序列拟合模型估计了测站的速度场和周期信号的幅度值。结果表明：1) 在数据长度长达 11 年的参数估计中，基于精密单点定位技术解算的测站坐标时间序列的速度场与 IGS 解估计的速度场精度相当，与框架 IGb14 的速度场相比统计精度在 N、E、U 三个坐标轴上均优于 1mm/yr；2) 基于精密单点定位技术估计的周年信号幅度值多数与 IGS 解估计的周年信号幅度值小于 2mm，基于精密单点定位技术估计的半年信号幅度值多数与 IGS 解估计的半年信号幅度值小于 1mm，去除幅度值差异大于 5mm 的测站之后的周年和半年幅度值统计精度（RMS）分别为 1.2mm、0.7mm。此外，基于精密单点定位技术解算的半年周期的幅度值相比 IGS 解更加显著。

4、以原始测站坐标时间序列去除线性项和周期项后的残差坐标时间序列为研究对象，利用功率谱分析研究了测站坐标残差时间序列的噪声特性。结果表明：无论是基于精密单点定位技术的测站坐标残差时间序列还是 IGS 解的测站坐标残差时间序列都表现出既有白噪声也有闪烁噪声的特性，因此认为白噪声加闪烁噪声的噪声模型仍然是目前较为合适的随机模型。此外，基于精密单点定位技术解的残差坐标时间序列的谱指数相较 IGS 解的残差坐标时间序列更加集中；

5、利用主成分分析法对欧洲区域分布的 30 个测站坐标残差时间序列进行区域空间滤波。结果表明，各测站对第一主成分的空间响应符号一致，且多数测站的空间响应值较为相近。原始测站坐标残差时间序列通过第一主成分指示的区域空间滤波之后剩余的坐标残差时间序列的不确定度有所降低。参与区域空间滤波分析的 30 个站的统计结果表明，30 个测站的原始残差时间序列 RMS 的均值分别为 1.1m、1.1mm、4.0mm，坐标残差的 RMS 值在 N、E、U 三个方向上的均值分别降低了 0.2mm、0.2mm、1.0mm。因此，基于主成分分析方法的区域空间滤

波在垂直方向上的作用最为显著。

6、基于北斗三号卫星导航系统的数据，利用精客单点定位技术和网平差技术分别建立了全球地球参考框架。首先在了解北斗参考框架的现状的基础之上，分析了目前北斗卫星导航系统所用坐标系的局限性和建立我国自主参考框架的必要性。接着，介绍了北斗三号卫星导航系统的卫星星座和所用坐标系的基本情况。然后以 IGS 解为参照对象，选取分布全球的 58 个接收 BDS-3 卫星信号的测站作为研究对象，对比分析了基于精客单点定位技术和基于网平差技术建立的全球北斗参考框架的可靠性和速度场精度。结果表明：1) 基于精客单点定位技术的测站受所在区域可见卫星数目有限的问题，测站坐标精度受到一定的影响，这一问题在系统建成之后得以解决。但仍有部分测站所在区域卫星覆盖能力有限，因而定位精度没有得到提升；2) 基于网平差技术的卫星定位能力要优于基于精客单点定位技术的定位能力，这一点在早期 BDS-3 卫星还未建成的时候表现尤为突出；3) 基于 BDS-3 系统的全球北斗参考框架可达到毫米级的精度。与基于精客单点定位技术的全球北斗参考框架相比，基于网平差技术的原点和方向都与 IGS 解具有更好的一致性。4) 基于精客单点定位技术的速度场和基于网平差技术的速度场与 IGS 解的速度场较为一致。基于网平差技术的速度场精度在 E 方向上得到了提高，这一结果得益于网平差技术中整周模糊度的固定。

7、基于北斗三号卫星导航系统的数据，利用精客单点定位技术和网平差技术分别建立了区域地球参考框架。选取分布于欧洲区域的 30 站个作为区域参考框架的研究对象，对比分析了基于精客单点定位技术和基于网平差技术建立的北斗区域参考框架的可靠性和速度场精度。结果表明：1) 基于网平差技术的测站坐标精度和速度场精度与 IGS 解的坐标和速度场精度相比基于精客单点定位技术具有更好的一致性，基于网平差技术的区域网速度场精度在 N 和 E 方向上相比基于精客单点定位技术提高了 0.4mm/yr , 1.0mm/yr ；2) 基于网平差技术的测站坐标精度在 E 方向上相比精客单点定位技术提高 2mm ；3) 基于 BDS-3 系统建立的区域参考框架的精度可达厘米级精度，网平差技术确定的原点和方向与 IGS 解具有较好的一致性。相比单点定位技术，网平差技术确定的原点不确定度提高了三分之一，方向不确定度提高了二分之一。

6.2 进一步工作展望

本文的研究工作取得了初步的成果,仍有许多研究工作值得进一步深入展开:

1、时间序列分析的应用。本文中对测站坐标时间序列建模后所获取的速度场、周期信号以及坐标残差时间序列的噪声特性和共模误差进行了分析。拟在后续的工作中把“白噪声+闪烁噪声”的随机模型应用到 GNSS 数据处理模型中,并对其他三种空间大地测量技术的噪声特性加以分析和应用。

2、扩充坐标时间序列和其他参数的时间序列(如地球自转参数等)的分析方法,以获得更高精度的速度场和测站坐标。

3、完善区域地球参考框架。本文中的区域参考框架是基于 BDS-3 卫星导航定位技术实现的,考虑到卫星导航定位技术在建立地球参考框架时对先验参考框架的依赖性强的特点,在实现真正完全自主的地球参考框架的前提下,需要将其他空间大地测量技术尤其是 SLR(原点和尺度)和 VLBI(尺度)纳入到地球参考框架的建立中。

4、基于文中所描述的地球参考框架综合理论,实现综合软件的编写。

参考文献

- 北斗卫星导航系统公开服务性能规范(3.0 版). 中国卫星导航系统管理办公室. CSNO(2021)
- 陈俊勇. 中国现代大地基准——中国大地坐标系 2000(CGCS2000) 及其框架[J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 269-271
- 成英燕, 党亚民, 秘金钟, 等. CGCS2000 参考框架维持方法分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(004):543-549.
- 党亚民, 陈俊勇. 国际大地测量参考框架技术进展[J]. 测绘科学, 2008(01):33-36+246.
- 党亚民, 陈俊勇. 全球大地测量地心坐标参考框架最新进展[J]. 测绘科学, 2004(01):61-63+7.
- 董大南, 陈俊平, 王解先. 2018. GNSS 高精度定位原理[M]. 北京: 科学出版社.
- 蒋光伟, 程传录, 陈雄川等. 基于 BDS-3 的定位性能与区域参考框架维持分析. 地球物理学进展. 2021, 36 (3): 0887-0893, doi: 10.6038/pg2021EE0455.
- 蒋志浩. CGCS2000 参考框架维持、更新理论与方法研究 [J]. 测绘学报, 2019, 48 (12): 1636. DOI: 10. 11947 /j. AGCS. 2019. 20190341.
- 魏子卿, 刘光明, 吴富梅. 2000 中国大地坐标系: 中国大陆速度场[J]. 测绘学报, 2011, 40(4): 403-410
- 魏子卿. 2000 中国大地坐标系[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(6): 1-5
- 谢方, 程传录, 王斌等. 基于 2000 国家大地坐标系的中国大陆速度场获取[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(3): 136-142
- 杨元喜. 2000 中国大地坐标系[J]. 科学通报, 2009, 54(16):2271-2276
- 邹蓉, 刘晖, 魏娜, 等. COMPASS 地球参考框架的建立和维持[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 036(004):431-436.
- Abbondanza, C., T. M. Chin, R. S. Gross, M. B. Heflin, J. Parker, B. S Soja, T. van Dam, and X. Wu (2017), JTRF2014, the JPL Kalman filter, and smoother realization of the International Terrestrial Reference System, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 8474–8510, doi:10.1002/2017JB014360.
- Abbondanza, C.; Chin, T.M.; Gross, R.S.; Heflin, M.B.; Parker, J.W.; Soja, B.S.; van Dam, T.; Wu, X. JTRF2014: Analysis, Results and Comparisons to ITRF2014 and DTRF2014. In-IERS Technical Note No. 40; Altamimi, Z., Dick, W.R., Eds.; Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie: Frankfurt am Main, Germany, 2020; pp. 17–69, ISBN 978-3-86482-137-0.
- Altamimi, Z.; Collilieux, X.; Boucher, C. Accuracy Assessment of the ITRF Datum Definition. In VI Hotine-Marussi Symposium on Theoretical and Computational Geodesy; Xu, P., Liu, J., Dermanis, A., Eds.; International Association of Geodesy Symposia; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2008. doi:10.1007/978-3-540-74584-6_16.

- Altamimi Z, P. Rebischung, L. Métivier, and X. Collilieux (2016), ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 121, 6109 – 6131, doi:10.1002/2016JB013098.
- Altamimi Z, X. Collilieux, and L. Métivier (2011), ITRF2008: An improved solution of the International Terrestrial Reference Frame, *J. Geod.*, 85(8), 457 – 473, doi:10.1007/s00190-011-0444-4.
- Altamimi Z, Collilieux, X.; Legrand, J.; Garayt, B.; Boucher, C. (2007). ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *Journal of Geophysical Research*, 112(B9), B09401–. doi:10.1029/2007jb004949
- Altamimi Z, Metivier, L.; Collilieux, X. ITRF2008 plate motion model. *J. Geophys. Res.* 2012, 117, doi:10.1029/2011JB008930.
- Altamimi Z, Rebischung, P. ; Collilieux, X.; Métivier, L.; Chanard, K. Review of Reference Frame Representations for a Deformable Earth. In IX Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy; Altamimi, Z., Dick, W.R., Eds.; International Association of Geodesy Symposia: Springer, Cham, 2019; pp. 51–56, doi: 10.1007/1345_2019_66
- Altamimi Zuheir; Rebischung, Paul; Métivier, Laurent; Collilieux, Xavier (2017). The International Terrestrial Reference Frame: lessons from ITRF2014. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, (), -.doi:10.1007/s12210-017-0660-9
- Angermann D, Bloßfeld, M.; Seitz, M.; Rudenko, S. Comparison of latest ITRS realizations: ITRF2014, DTRF2014 and JTRF2014. In IERS Technical Note No. 40; Altamimi, Z., Dick, W.R., Eds.; Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie: Frankfurt am Main, Germany , 2020; pp. 79–93, ISBN 978-3-86482-137-0.
- Appleby G, Rodriguez R, Altamimi Z (2016) Assessment of the accuracy of global geodetic satellite laser ranging observations estimated impact on ITRF scale: estimation of systematic errors in LAGEOS observations 1993 – 2014. *J Geodesy*. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0929-2>
- Argus, D.F. Postglacial rebound from VLBI geodesy: On establishing vertical reference. *Geophys. Res. Lett.* 1996, 23, 973 – 976, doi:10.1029/96GL00735.
- Argus, D.F.; Heflin, M.B. Plate motion and crustal deformation estimated with geodetic data from the Global Positioning System. *Geophys. Res. Lett.* 1995, 22, 1973 – 1976, doi:10.1029/95GL02006.
- Argus, D.F.; Peltier, W.R.; Drummond, R.; Moore, A.W. The Antarctica component of post-glacial rebound model ICE-6G_C(VM5a) based on GPS positioning, exposure age dating of ice thicknesses, and relative sea level histories. *Geophys. J. Int.* 2014, 198, 537 – 563, doi:10.1093/gji/ggu140.
- Argus, D.F.; Peltier, W.R.; Watkins, M.M. Glacial isostatic adjustment observed using very long baseline interferometry and satellite laser ranging geodesy . *J. Geophys. Res.* 1999, 104,

- 29077 – 29093, doi:10.1029/1999JB000237.
- Bar-Sever Y., (1996). A new model for GPS yaw attitude, *Journal of Geodesy*, 70, 714-723. Doi:10.1007/BF00867149.
- Blewitt, G.; Altamimi, Z.; Davis, J.; Gross, R.; Kuo, C.Y.; Lemoine, F.G.; Zerbini, S. Ge-odetic Observations and Global Reference Frame Contributions to Understanding Sea-Level Rise and Variability. In *Understanding Sea-Level Rise and Variability*; Church, J.A., Wood-worth, P.L., Aarup, T., Wilson, W.S., Eds.; Wiley-Blackwell: Oxford, UK, 2010; doi:10.1002/9781444323276.ch9.
- Blewitt, G.; Lavalée, D. Effect of annual signals on geodetic velocity. *J. Geophys. Res.* 2005, 107, 2145, doi:10.1029/2001JB000570.
- Bloßfeld M, Seitz M, Angermann D et al. DTRF2014: DGFI-TUM realization of the Inter-national Terrestrial Reference System (ITRS). In *IERS Technical Note No. 40*; Zuheir Altamimi and Wolfgang R. Dick (eds.). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2020. p5-16.
- Bloßfeld, M.; Angermann, D.; Seitz, M. DGFI-TUM Analysis and Scale Investigations of the Latest Terrestrial Reference Frame Realizations. In *International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World*; Freymueller, J., Sánchez, L., Eds.; International Association of Geodesy Symposia: Springer, Cham, 2018, Volume 149, doi:10.1007/1345_2018_47.
- Bock, Y., L. Prawirodirdjo, and T. I. Melbourne (2004), Detection of arbitrarily large dynamic ground motions with a dense high-rate GPS network, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L06604, doi:10.1029/2003GL019150.
- Boehm J, Moeller G, Schindelegger M, et al. Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w)[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(3):433-441.
- Boehm, J., Werl, B., and Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium - Range Weather Forecasts op-erational analysis data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B2).
- Borsa, A.A.; Agnew, D.C.; Cayan, D.R. Ongoing drought-induced uplift in the western United States. *Science* 2014, 345, 1587 – 1590, doi:10.1126/science.1260279.
- Brockmann, E. (1997): Combination of Solutions for Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System (GPS). *Geodätisch Geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Schweizerische Geodätische Kommission*, Vol. 55.
- Carine B, Juliette L, Andras F et al. GNSS metadata and data validation in the EUREF Per-manent Network[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4):1-14.
- Collilieux, X. and Woppelmann, G. Global sea-level rise and its relation to the Terrestrial Reference Frame. *J. Geodesy* 2011, 85, 9 – 22, doi:10.1007/s00190-010-0412-4.
- Collilieux, X.; Altamimi, Z.; Coulot, D.; Van, D.T.; Ray, J. Impact of loading effects on determina-tion of the International Terrestrial Reference Frame. *Adv. Space Res.* 2010, 45, 144 – 154,

- doi:10.1016/j.asr.2009.08.024.
- Dach R, Lutz S, Walser P, et al. Bernese GNSS Software Version 5.2[M]. 2015.
- Dach, R.; Grahsl, A.; Sušnik, A.; Villiger, A.; Arnold, D.; Jäggi, A. Evaluation of ITRF2014 Solutions. In Proceedings of the General Assembly, Vienna, Austria, 24 – 28 April 2017; Available online:http://www.bernese.unibe.ch/publist/2017/post/xTRF2014_final.pdf(accessed on 28 May 2021).
- Dach, R.; Sušnik, A.; Maier, A.; Villiger, A.; Arnold, D.; Jäggi, A. Evaluation of ITRF2014 Solutions. In Proceedings of the AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 12 – 16 December 2016; Available online:http://www.bernese.unibe.ch/publist/2016/post/poster_XTRF2014_final.pdf(accessed on 28 May 2021).
- DeMets C, Gordon R, Argus D, Stein S (1994) Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimate of current plate motions. *Geophys Res Lett* 21(20):2191 – 2194. doi:10.1029/94GL02118
- Dong D, Fang P, Bock Y, et al. Spatiotemporal filtering using principal component analysis and Karhunen-Loeve expansion approaches for regional GPS network analysis[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2006, 111(B3):-.
- Dong, D., P. Fang, Y. Bock, M. K. Cheng, and S. Miyazaki (2002), Anatomy of apparent sea-sonal variations from GPS-derived site position time series, *J. Geophys. Res.*, 107(B4), 2075, doi:10.1029/2001JB000573.
- Dong, D.; Yunck, T.; Heflin, M. Origin of the International Terrestrial Reference Frame. *J. Geophys. Res.* 2003, 108, 2200, doi:10.1029/2002JB002035.
- Dow J, Neilan R, Rizos C (2009) The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *J Geod* 83(3 – 4):191 – 198. doi:10.1007/s00190-008-0300-3
- Dragert, H., K. Wang, and T. James (2001), A silent slip event on the deeper Cascadia subduction interface, *Science*, 292, 1525 – 1528.
- Ebner, H. (1997): *Ausgleichungsrechnung – Skriptum zur Vorlesung Ausgleichungsrechnung 1+2*. Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München.
- Fritsche, M.; Sošnica, K.; Rodríguez-Solano, C.J.; Steigenberger, P.; Wang, K.; Dietrich, R.; Rothacher, M. Homogeneous reprocessing of GPS, GLONASS and SLR observations. *J. Geod.* 2014, 880, 625 – 642, doi:10.1007/s00190-014-0710-3.
- Fu, Y.; Argus, D.F.; Landerer, F.W. GPS as an independent measurement to estimate terrestrial water storage variations in Washington and Oregon. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 2015, 120, 552 – 566, doi:10.1002/2014JB011415.
- Ge, M.; Gendt, G.; Dick, G.; Zhang, F.P.; Reigber, C. Impact of GPS satellite antenna offsets on scale changes in global network solution. *Geophys. Res. Lett.* 2005, 32, doi:10.1029/2004GL022224.
- Gipson J (2018) Impact of gravitational deformation in VLBI analysis on the reference frame. In:

- Abstract G42A-04 presented at AGU fall meeting 2018, Washington, DC, 10 – 14 Dec
- Gross, R.; Beutler, G.; Plag, H.P. Integrated scientific and societal user requirements and functional specifications for the GGOS. In Global Geodetic Observing; Plag, H.P., Pearlman, M., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009; doi:10.1007/978-3-642-02687-4_7.
- Helmhert, F.R. (1872): Die Ausgleichungsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate. Teubner, Leipzig.
- Hernandez-Pajares M, Juan J M, Sanz J, et al. The ESA/UPC GNSS-Lab tool (gLAB): An advanced multipurpose package for GNSS data processing[C]// Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing. IEEE, 2010:1-8.
- Herring T, King R, Mcclusky S. GAMIT Reference Manual[M]// Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- Johansson, J. M., et al. (2002), Continuous GPS measurements of postglacial adjustment in Fennoscandia: 1. Geodetic results, *J. Geophys. Res.*, 107(B8), 2157, doi:10.1029/2001JB000400.
- Johnston G, Dawson J (2004) The 2003 Mount Pleasant (Hobart) radio telescope local tie survey. *Geoscience Australia, Record* 2004/21
- Koch, K.-R. (1988): Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- Kouba J. A guide to using International GPS Service (IGS) products[J]. IGS Central Bureau, Pasadena, 2015.(http://kb.igs.org/hc/en-us/article_attachments/203088448/UsingIGSProductsVer21_cor.pdf)
- Li M, Qu L, Zhao Q, et al. Precise Point Positioning with the BeiDou Navigation Satellite System[J]. *Sensors*, 2014, 14(1): 927-943.
- Meindl, M.; Beutler, G.; Thaller, D.; Dach, R.; Jäggi, A. Geocenter coordinates estimated from GNSS data as viewed by perturbation theory .*Adv. Space Res.* 2013, 51, 1047 – 1064, doi:10.1016/J.ASR.2012.10.026.
- Michel V, Roesch G, Long J (2005) Hartebeesthoek Co-Location Survey. In: Richter B, Dick W, Schwegmann W (eds) Proceedings of the IERS workshop on site co-location. IERS Technical Note 33:100 – 109, Verlag des Bundesamtes für Geodäsie und Kartographie, Frankfurt am Main
- Miller, M. M., T. Melbourne, D. J. Johnson, and W. Q. Sumner (2002), Periodic slow earth-quakes from the Cascadia subduction zone, *Science*, 295, 2423.
- Moreaux, G.; Capdeville, H.; Abbondanza, C.; Bloßfeld, M.; Lemoine, J.M.; Ferrage, P. A comparison of the DTRF2014, ITRF2014, and JTRF2014 solutions using DORIS. In IERS Technical Note No. 40; Altamimi, Z., Dick, W.R., Eds.; Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie: Frankfurt am Main, Germany, 2020; pp. 95–133, ISBN 978-3-86482-137-0.
- Ohtani, R., P. Segall, and J. McGuire (2004), The Network Strain Filter—A new tool for monitoring and detecting transient deformation signals in GPS arrays, *Eos Trans. AGU*, 85(47), Fall Meet. Suppl., Abstract G21A-0136.

- Pearlman M, Degnan J, Bosworth J (2002) The International Laser Ranging Service. *Adv Space Res* 30(2):135 – 143. doi:10.1016/S0273-1177(02)00277-6
- Petit, G.; Luzum, B. International Earth Rotation and Reference System Services Conventions (2010). In IERS Technical Note 36; Petit, G., Luzum, B., Eds.; Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie: Frankfurt am Main, Germany, 2010; p. 179, ISBN 3-89888-989-6. <http://tai.bipm.org/iers/conv2010/>.
- Ray, J.R.; Rebischung, P.; Schmid, R. Dependence of IGS products on the ITRF datum. In Reference Frames for Applications in Geosciences; Altamimi, Z., Collilieux, X., Eds.; International Association of Geodesy Symposia; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2016; Volume 138, doi:10.1007/978-3-642-32998-2_11.
- Ray J, Altamimi Z, Collilieux X, van Dam T (2008) Anomalous harmonics in the spectra of GPS position estimates. *GPS Solutions* 12(1):55-64. <https://doi.org/10.1007/s10291-007-0067-7>
- Ray J R, Rebischung P, Schmid R. Dependence of IGS Products on the ITRF Datum[J]. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- Ray J, Collilieux X, Rebischung P, van Dam TM, Altamimi Z (2011) Consistency of crustal loading signals derived from models and GPS: inferences for GPS positioning errors. In: Abstract G51B-06 presented at AGU fall meeting 2011, San Francisco, CA, 5–9 Dec
- Rebischung P, Altamimi Z, Chanard K, Métivier L (2018) Aperiodic surface mass transport observed in GRACE and GNSS time series. In: Presented at IGS workshop 2018, Wuhan, China, 29 Oct.-2 Nov
- Rebischung P, Altamimi, Z.; Ray, J.; Garayt, B. The IGS contribution to ITRF2014. *J. Geodesy* 2016, 90, 611 – 630, doi:10.1007/s00190-016-0897-6.
- Rebischung P, Altamimi, Z.; Springer, T. A collinearity diagnosis of the GNSS geocenter determination. *J. Geodesy* 2014, 88, 65 – 85, doi:10.1007/s00190-013-0669-5.
- Rebischung P, Griffiths, J.; Ray, J.; Schmid, R.; Collilieux, X.; Garayt, B. IGS08: The IGS realization of ITRF2008. *GPS Solut.* 2012, 16, 483 – 494, doi:10.1007/s10291-011-0248-2.
- Rebischung P, Schmid, R. IGS14/igs14.atx: A new Framework for the IGS Products. In Proceedings of the AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 12 – 16 December 2016.
- Sarti P, Abbondanza C, Petrov L, Negusini M (2010) Height bias and scale effect induced by antenna gravity deformations in geodetic VLBI data analysis. *J Geod.* <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0410-6>
- Sarti P, Abbondanza C, Vittuari L (2009) Gravity-dependent signal path variation in a large VLBI telescope modelled with a combination of surveying methods. *J Geod.* 83(11):1115 – 1126. <https://doi.org/10.1007/s00190-009-0331-4>
- Sarti P, Sillard P, Vittuari L (2004) Surveying co-located space-geodetic instruments for ITRF computation. *J Geod.* 78(3):210 – 222. doi:10.1007/s00190-004-0387-0
- Schlüter W. and Behrend D (2007) The International VLBI Service for Geodesy and Astrometry

- (IVS): current capabilities and future prospects. *J Geod* 81(6 – 8):379 – 387. doi:10.1007/s00190-006-0131-z
- Seeber G (2013) *Satellite Geodesy*. de Gruyter. ISBN:9783110175493
- Seitz M (2009) Kombination geodätischer Raumbeobachtungsverfahren zur Realisierung eines terrestrischen Referenzsystems, Deutsche geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 630, München
- Seitz M, Angermann D, M Bloßfeld. 2014 ITRS Realization of DGFI: DTRF2014[C]// EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2015.
- Seitz M, D. Angermann, M. Bloßfeld, H. Drewes, and M. Gerstl (2012), The 2008 DGFI realization of the ITRS: DTRF2008, *J. Geod.*, 86, 1097-1123.
- Sengenes P, Tavernier G, Granier J (2002) Doppler measurement principle in a brief overview of Doris system evolutions. Presentation at the IDS workshop 2002, Biarritz, France
- Shen Y , Li W , Xu G , et al. Spatiotemporal filtering of regional GNSS network's position time series with missing data using principle component analysis[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(1):1-12.
- Shi C, Zhao Q, Lou Y. Recent development of PANDA software in GNSS data processing[J]. *Proc Spie*, 2008, 7285:231-249.
- Sosnica, K. Determination of Precise Satellite Orbits and Geodetic Parameters using Satellite Laser Ranging. Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy , University of Bern, Bern, Switzerland, April 2014. Available online:http://www.bernese.unibe.ch/publist/2014/book/diss_ks_front.pdf(accessed on 6 March 2021).
- Sovers O, Fanselow J, Jacobs C (1998) Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results. *Rev Mod Phys* 70:1393 – 1454. doi:10.1103/RevModPhys.70.1393
- Springer, T. A., G. Beutler, and M. Rothacher (1999). A new Solar Radiation Pressure Model for the GPS Satellites, *GPS Solutions*, 3(2), 50-62.
- Takahashi F, Kondo T, Takahashi Y, Koyama Y (2000) Very Long Baseline Interferometer. Wave Summit Course. Ohmsha, Ltd./IOS Press. ISBN:1-58603-076-0
- Takasu T. Real-time PPP with RTKLIB and IGS real-time satellite orbit and clock[J]. IGS Workshop, 2010.
- Teunissen P, Kleusberg A (1998) *GPS for Geodesy*. Springer, Berlin/Heidelberg/New York
- Wdowinski, S., Y. Bock, J. Zhang, P. Fang, and J. Genrich (1997), Southern California permanent GPS geodetic array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, 102, 18,057–18,070.
- Williams, Simon D P . Error analysis of continuous GPS position time series[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2004, 109(B3):-.
- Willis P, Boucher C, Fagard H, Altamimi Z (2005) Geodetic application of the DORIS system at the French Institut Géographique National. *C R Geosci* 337(7):653 – 662.

- doi:10.1016/j.crte.2005.03.002
- Willis P, Fagard H, Ferrage P, Lemoine F, Noll C, Noomen R, Otten M, Ries J, Rothacher M, Soudarin L, Tavernier G, Valette J (2010) The International DORIS Service (IDS): Toward maturity. In DORIS Special Issue: Scientific Applications in Geodesy and Geodynamics. *Adv Space Res* 45(12):1408–1420. doi:10.1016/j.asr.2009.11.018
- Willis P, Gobinddass M, Garayt B, Fagard H (2012) Recent improvements in DORIS data processing in view of ITRF2008, the ignwd08 solution. In: Kenyon S, Pacino M, Marti U (eds) *Geodesy for Planet Earth*. International Association of Geodesy Symposia, Springer, vol 136, pp 43–49. doi:10.1007/978-3-642-20338-1_6
- Woppelmann, G.; Marcos, M. Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Rev. Geophys.* 2016, 54, 64 – 92, doi:10.1002/2015RG000502.
- Wu J T, Wu S C, Hajj G A, et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase[C]// As-trodynamics. *Astro-dynamics* 1991, 1992:1647-1660.
- Wu, X., C. Abbondanza, Z. Altamimi, T. M. Chin, X. Collilieux, R. S. Gross, M. B. Heflin, Y. Jiang, and J. W. Parker (2015), KALREF-A Kalmanfilter and time series approach to the International Terrestrial Reference Frame realization, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 3775–3802, doi:10.1002/2014JB011622.
- Xu X, Dong D, Fang M, Zhou T, Wei N, Zhou F (2017) Contributions of thermoelastic deformation to seasonal variations in GPS station position. *GPS Solutions* 21(3):1265-1274. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0609-6>
- Zajdel R, K Sonica, Drodewski M , Bury G; Strugarek D. Impact of network constraining on the terrestrial reference frame realization based on SLR observations to LAGEOS. *J. Geod.* 2019, 93, 2293 – 2313, doi:10.1007/s00190-019-01307-0.

图片汇总

图 1.1 VLBI 测量原理示意图	3
图 1.2 卫星激光测距原理图.....	4
图 1.3 GNSS 定位原理图	6
图 1.4 DORIS 系统观测示意图.....	7
图 1.5 论文架构图.....	12
图 2.1 ITRF2014 的水平速度场 (Altamimi, 2016)	27
图 2.2 实现 ITRF 的流程图	28
图 2.3 ITRF2014 中四种空间大地测量技术的测站分布图 (Altamimi, 2016)	30
图 2.4 GNSS 站 ASPA (子图上) 和 JPLM (子图上) 高程上测站位置时间序列 (红色为 IGS 解, 蓝色为 ITRF 解)	36
图 2.5 SLR 相对于 ITRF2014 的地心和尺度运动时间序列	37
图 2.6 VLBI 相对于 ITRF2014 尺度变化的时间序列	37
图 3.1 Helmert 变换所涉及的测站分布图	43
图 3.2 参与比较的测站的数量变化	43
图 3.3 测站 ALBH(左)和 MIZU(右)在 NEU 坐标系下的坐标时间序列。IGS 解的平均值从各 坐标分量去除。	44
图 3.4 ITRF2014 与 IGS 间的 Helmert 变换参数的时间序列。红色的垂直线表示 IGS 时间序 列中的不连续时间点。	45
图 3.5 ITRF2014 与校正的 IGS 解之间估计的平移、旋转和尺度偏移量的时间序列及其幅度 谱 (蓝点); 2015 年 2 月 14 日前后 Helmert 参数的线性趋势曲线(红线)。垂直的灰线表示 GPS 交点年的前 10 个谐波, 两条垂直的红线指示周年和半年信号。	47
图 3.6 ASPA 测站位置时间序列: ITRF2014 为左, DTRF2014 为右, IGS 解作为对比同时在 左和右子图中展示。IGS 解的平均值是从各子图中去除。	48
图 3.7 DTRF2014 与校正的 IGS 解之间估计的平移、旋转和尺度偏移量的时间序列及其幅度 谱 (蓝色); 2015 年前后 Helmert 参数的线性趋势曲线 (红线)。垂直的灰线表示 GPS 交点 年的前 10 个谐波, 两条垂直的红线指示周年和半年信号。	49
图 3.8 测站 ALGO 的测站坐标时间序列。IGS 解的平均值在各坐标分量上去除.....	51
图 3.9 JTRF2014 与 IGS 之间估计的平移、旋转和尺度偏移量的时间序列及幅度谱	53
图 3.10 JTRF2014 与 IGS 之间的平移和旋转参数减去周年和半年信号的时间序列.....	53
图 3.11 各分析中心参与比较的测站数目时间序列	54
图 3.12 各分析中心与 ITRF2014 比较的平移参数时间序列及幅度谱	56

图 3.13 各分析中心与 ITRF2014 比较的旋转参数时间序列及幅度谱	56
图 3.14 各分析中心与 ITRF2014 比较的尺度参数时间序列及幅度谱	57
图 4.1 应用于时间序列分析的测站分布图	64
图 4.2 基于精客单点定位技术的测站坐标与 IG3 解之间估计的平移、旋转和尺度偏移量的时间序列及其幅度谱 (蓝点); Helmert 参数的线性趋势曲线(红线)。垂直的灰线表示 GPS 交点年的前 10 个谐波, 两条垂直的红线指示周年和半年信号。	65
图 4.3 水平速度场	66
图 4.4 垂直速度场	66
图 4.5 PPP 速度场和 IGS 速度场与 IGb14 速度场的比较	67
图 4.6 周年和半年幅度图	68
图 4.7 基于精客单点定位技术和 IGS 解的周年和半年幅度值差异	69
图 4.8 基于精客单点定位技术的谱指数直方图	70
图 4.9 基于 IGS 解的谱指数直方图	71
图 4.10 排序后的特征值直方图	72
图 4.11 第一主成分及其空间响应 (从左至右依次为 N、E、U)	73
图 4.12 第二主成分及其空间响应 (从左至右依次为 N、E、U)	73
图 4.13 滤波前后坐标残差 RMS 统计	74
图 5.1 北斗可见卫星数	79
图 5.2 测站分布图	80
图 5.3 测站 HOB2 的坐标时间序列图	81
图 5.4 测站 CPVG 的坐标时间序列图	81
图 5.5 测站 GODE 的坐标时间序列图	82
图 5.6 2019 年 3 月 1 日 4 时北斗可见卫星数	82
图 5.7 基于精客单点定位技术的测站坐标误差在 N、E、U 三个坐标分量的均值	84
图 5.8 基于精客单点定位技术的测站坐标误差在 N、E、U 三个坐标分量的标准差	85
图 5.9 基于精客单点定位技术的测站坐标误差在 N、E、U 三个坐标分量的均方根	86
图 5.10 基于精客单点定位技术与 IGS 解之间的 Helmert 转换参数时间序列	88
图 5.11 基于精客单点定位技术 (红色) 和基于 IGS 解的水平速度场 (蓝色)	89
图 5.12 基于精客单点定位技术 (红色) 和基于 IGS 解的垂直速度场 (蓝色)	89
图 5.13 基于精客单点定位与基于 IGS 解的速度场在 N、E、U 三个方向上的差异	90
图 5.14 测站 HOB2 的坐标时间序列图	94
图 5.15 测站 CPVG 的坐标时间序列图	94
图 5.16 测站 GODE 的坐标时间序列图	94
图 5.17 基于网平差技术的测站坐标误差在 N、E、U 三个坐标分量的均值	96

图 5.18 基于网平差技术的测站坐标误差在 N、E、U 三个坐标分量的标准差	97
图 5.19 基于网平差技术的测站坐标误差在 N、E、U 三个坐标分量的均方根	98
图 5.20 基于网平差技术与 IGS 解之间的 Helmert 转换参数时间序列	100
图 5.21 基于网平差技术（绿色）和基于 IGS 解的水平速度场（蓝色）	101
图 5.22 基于网平差技术（绿色）和基于 IGS 解的垂直速度场（蓝色）	101
图 5.23 基于网平差技术与基于 IGS 解的速度场在 N、E、U 三个方向上的差异	102
图 5.24 区域网测站分布图	103
图 5.25 区域网测站坐标精度在 N、E、U 三个方向上的均值（左：网解；右：PPP）	104
图 5.26 区域网测站坐标精度在 N、E、U 三个方向上的标准差（左：网解；右：PPP）	105
图 5.27 区域网测站坐标精度在 N、E、U 三个方向上的均方根（左：网解；右：PPP）	106
图 5.28 基于网平差技术（左）和基于精客单点定位技术（右）的北斗参考框架与 IGS 解之间的 Helmert 转换参数时间序列	108
图 5.29 区域网水平速度场	109
图 5.30 区域网垂直速度场	110
图 5.31 基于网平差技术与基于 IGS 解的速度场在 N、E、U 三个方向上的差异	110
图 5.32 基于精客单点定位与基于 IGS 解的速度场在 N、E、U 三个方向上的差异	111

表格汇总

表 1.1 IGS 参考框架的实现情况	10
表 2.1 空间大地测量技术对大地测量参数的敏感性	23
表 2.2 应用到 ITRF 框架网上的最小约束	35
表 3.1 ITRF2014 与校正的 IGS 在 2015 年 2 月 14 日前后估计的转换参数时间序列的趋势和标准差.....	47
表 3.2 DTRF2014 与校正的 IGS 解在 2015 年前后估计的变换参数时间序列的趋势和标准差	50
表 3.3 对 JTRF2014 与 IGS 之间估计的转换参数时间序列进行线性回归得到历元 2010.0 处的偏移量和趋势.....	51
表 3.4 JTRF2014 与 IGS 之间估计的平移和旋转参数时间序列的周年和半年幅值.....	51
表 3.5 各分析中心与 ITRF2014 转换参数在历元 2010.0 处的偏差值	55
表 3.6 各分析中心与 ITRF2014 转换参数在整个数据长度上的拟合斜率.....	55
表 4.1 Net_diff 精密单点定位配置参数	63
表 4.2 基于精密单点定位技术的测站坐标与 IG3 解之间估计的平移、旋转和尺度偏移量的线性和周期拟合参数.....	64
表 4.3 速度场精度统计(PPP)	67
表 4.4 速度场精度统计(IGS).....	67
表 4.5 周年和半年幅度值差异.....	69
表 5.1 BDCS 参考椭球的基本常数	79
表 5.2 基于精密单点定位技术的测站坐标精度统计	83
表 5.3 基于精密单点定位技术的测站坐标标准差与均方根的均值统计	83
表 5.4 基于精密单点定位技术与 IGS 解之间的 Herlmert 转换参数时间序列在历元 2020.0 时刻的线性拟合和统计	87
表 5.5 基于精密单点定位技术的速度场比较统计	90
表 5.6 基于精密单点定位技术的速度场精度统计(<10mm/yr)	91
表 5.7 GAMIT 分析模型.....	93
表 5.8 基于网平差技术的测站坐标精度统计	99
表 5.9 基于网平差技术的测站坐标标准差与均方根的均值统计	99
表 5.10 基于网平差技术与 IGS 解之间的 Herlmert 转换参数时间序列在历元 2020.0 时刻的线性拟合和统计.....	100
表 5.11 基于网平差技术的速度场比较统计	102

表 5.12 基于网平差技术的速度场精度统计(<10mm/yr)	102
表 5.13 测站坐标精度统计.....	105
表 5.14 测站坐标标准差与均方根的均值统计.....	106
表 5.15 基于网平差技术与 IGS 解之间的 Helmert 转换参数时间序列在历元 2020.0 时刻的线性拟合和统计.....	108
表 5.16 基于精客单点定位技术与 IGS 解之间的 Helmert 转换参数时间序列在历元 2020.0 时刻的线性拟合和统计.....	109
表 5.17 基于网平差技术的区域网速度场比较统计(NET).....	112
表 5.18 基于精客单点定位技术的区域网速度场比较统计(PPP).....	112
表 5.19 基于网平差技术的区域网速度场精度统计(NET) (29 个站)	112
表 5.20 基于精客单点定位技术的区域网速度场精度统计(PPP) (21 个站)	112

致 谢

时光如流水，转眼之间到上海天文台学习已有五年之余。从最初的懵懂青涩到现在已多了几分成熟和稳重。在上海天文台的这五年里，我不仅收获了许多知识，也更加明白了许多人世间的处世之道。对于我的获得和成长，有太多的老师和同学值得我去一一感谢！

首先，最值得我由衷感谢且此生不忘的当属我的研究生导师陈俊平研究员！2017 年从北京集中教学培养结束之后正式回到台里与陈老师有了更加紧密的联系。在研究方向上的选择和关键问题研究的过程中，陈老师以敏锐的学术洞察力和深厚的科研经验，给了我很多的指导和帮助，使得我的研究工作可以更加顺利地展开。此外，陈老师严谨的工作态度、深厚的理论功底、创新的研究思路，是我学习的榜样。感谢陈老师在我研究生生涯中给予的悉心教导和鼎力支持！也特别感谢我的二导曲伟菁副研究员对我研究工作的指导和关怀！

感谢董大南教授在研究工作中提出的宝贵意见！董老师学识渊博、思维敏捷、治学严谨，从科学、严谨的角度出发为我的研究工作提纲挈领地把关，使得我的研究目标更加明确。董老师对待科学问题的严谨态度和不苟的精神，都将使我在以后的学习和工作中深深受益。

感谢千里迢迢赶到北京雁栖湖为我们授课的陈俊平研究员、黄乘利研究员、王广利研究员、王小亚研究员、齐朝祥研究员、李进研究员和韩文标研究员，以及其他研究所如国家授时中心的张首刚研究员、国家天文台的刘继峰研究员、微电子研究所的巴晓辉研究员等。还要感谢天文学院负责学生工作的王亚明老师和高原老师。回台之后李力刚研究员、周永宏研究员和廖新浩研究员也为我们授了课，为我们的科研工作打下了一定的基础。

感谢周旭华研究员，在学习、工作与生活中经常给我非常中肯的建议和关怀。

感谢王彬师兄、谭伟杰师姐、张益泽师兄在研究工作中给予的指导和帮助！

感谢陈倩、李凯、邵璠、单荃等师兄师姐在生活和工作中给予的帮助！

特别感谢柳培钊师兄，既是师兄也是好友，无论是在学习中还是生活中，柳培钊师兄给予了我很多鼓励、理解、帮助和关心。

感谢我的同门师兄师弟师妹们，董志华、王阿昊、候阳飞、孟令东、周扬、

于超、伍冠滨、马壮、白天阳、宋子远、丁君生、王茹圆、崔洁、唐文杰、杨乾峰、刘东林、宋鑫友、程泉润，与你们的学习和交流组成了我研究生涯中不可或缺的一部分。

感谢办公室室友陶恩哲和徐可馨，是你们的陪伴使得我在繁杂的科研工作中得以放松和缓解。

感谢师弟张进、杨昊、肖威在西安一起出差的日子里的陪伴和帮助！

感谢室友欧阳旖旎、孙长嫔、熊伟萌，你们的支持和理解是我的幸运！

感谢天文台人教处的马金老师、储怡老师和王慧老师，你们细致的工作和体贴的问候给我们带来了许多温暖和帮助！

也感谢台里其他所有的老师、同学和后勤保障人员，虽然我们交流不多或者算不上认识，但我们也或多或少地彼此熟悉，相互帮助，共同成长！

当然，最感动也最幸福的是我的父母对我无条件的付出、支持和理解！你们是我最坚强的后盾，也是我前行的动力，无论我身处何方，我都坚信有那么一片天地你们永远会为我保留和守护。也要感谢我的哥嫂，在我外出求学的这些岁月里，是你们陪伴在父母身边，与他们相互扶持、相互帮助，一起度过了许多有欢乐也有烦恼的日子。

感谢所有曾经给予我帮助的人，你们的情谊我会永远铭记在心。愿你们不仅在事业上有所建树，也拥有美满幸福的家庭！

2021 年 10 月

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历:

2016 年 6 月毕业于中国矿业大学环境与测绘学院测绘工程专业, 获学士学位。

2016 年 9 月至今, 在中国科学院上海天文台攻读天体测量与天体力学专业理学博士学位。

获奖情况:

2016 年 10 月 中国科学院大学一等学业奖学金

2020 年 10 月 中国科学院大学一等学业奖学金

2020 年 5 月 第十届中国卫星导航年会优秀论文二等奖

已发表的学术论文:

[1] **Liu J** , Chen J , Liu P , et al. Comparison and Assessment of Three ITRS Realizations[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(12):2304.

[2] **Liu J** , Chen J , Wang B . Precision Analysis of Terrestrial Reference Frame Parameters Based on EOP A-Priori Constraint Model[M]. CSNC, 2020.

[3] 刘姣, 陈俊平, 王彬. 估计卫星频间偏差的 GLONASS 伪距定位改进模型及其验证[J]. 大地测量与地球动力学, 41(1):7.

[4] 马壮, 陈俊平, 刘姣, 王阿昊, 伍冠滨. MADOCA GPS/GLONASS 实时精密星历产品的性能评估[J]. 天文学进展, 2020, v.38(04):73-84.

[5] 陈俊平, 胡一帆, 张帅, 刘姣. 基于不同参考框架的 GPS 卫星天线校验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(10):134-140.

申请或已获得的专利:

[1] 陈俊平, 刘姣, 张益泽, 等. 一种基于 GLONASS 广播星历的伪距定位改进方法, CN110764123A[P]. 2020.

参加的研究项目:

JMRH 时空基准项目, 2018.10-2021.11, 参与人。

国家青年科学基金项目, 中国百年历史大地震震后形变对当代构造运动的影响研究 (11803065), 2019.01-2021.12, 参与人。

大地测量与地球动力学国家重点实验室开放课题项目, 基于 IGS/iGMAS 精密钟差产品的北斗综合时算法研究 (SKLGED2019-3-1-E), 2019.01-2020.12, 参与人。

上海市空间导航与定位技术重点实验室开放课题项目, 北斗在轨卫星钟性能监测
(KFKT-201704), 2017.07-2019.06, 参与人。