



# 大规模 GNSS 基准站网坐标解算方法研究

## 摘要

针对数千个大规模 GNSS 基准站网基准坐标解算时面临的数据处理和整网平差难题,本文提出一种大规模 GNSS 基准站网坐标解算方法,从全球框架站点选取、基准站网子网划分、基站单日数据处理和全球整网平差计算 4 个方面进行了阐述,最后对解算结果进行内符合和外符合精度评估.结果表明,该方法支持 3 000 站以上的基准坐标解算,解算结果外符合精度南北和东西方向 RMSE 优于 3 mm,高程 RMSE 优于 6 mm,解算精度相比 IGS(国际 GNSS 服务组织)各分析中心属于中上水平.

## 关键词

CORS; 坐标框架; 坐标基准; 大规模 GNSS 基准站网

中图分类号 P228.4

文献标志码 A

收稿日期 2022-08-02

资助项目 浙江省引进培育领军型创新创业团队项目(2020R01012);上海市 2020 年度科技创新行动计划高新技术领域项目(20511103300,20511103400);上海市 2021 年度科技创新项目(2021-cyxt2-kj01)

## 作者简介

赵毅,男,教授级高级工程师,主要从事卫星导航定位研究.yi.zhao@wz-inc.com

1 千寻位置网络有限公司,上海,200438

2 千寻位置网络(浙江)有限公司,湖州,313299

3 山东农业工程学院 国土资源与测绘工程学院,济南,250100

## 0 引言

连续运行基准站网及其系统(Continuously Operating Reference System, CORS)是全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)实现高精度导航与位置服务的支撑平台,也是建立坐标框架、监测地壳运动等科学和工程应用的重要基础设施,几乎可以应用于与位置和时间相关的所有领域<sup>[1-2]</sup>.为了满足不同用户需求,国内外纷纷建立了不同尺度的 GNSS 基准站网,包括国际 GNSS 服务组织(International GNSS Service, IGS)建立的全球基准站和跟踪站网、美国连续运行参考站网系统(CORS)、德国卫星定位与导航服务系统(SAPOS)、日本 GPS 连续应变监测系统(COSMOS)、中国地壳运动观测网络、北斗地基增强系统网络和省市级的 CORS 网以及大坝等重要设施周边的工程基站网等<sup>[2-4]</sup>.随着 CORS 站网的建设与发展,基于 CORS 网的相关科学研究主要分为两个方向:一个是基于 CORS 的高精度定位服务方法与应用研究<sup>[5-10]</sup>,包括基于 CORS 站网的网络 RTK(Real Time Kinematic)和 PPP(Precise Point Positioning)定位方法、差分网定位性能,以及形变监测的应用等;另一个方向是基于 CORS 组网的坐标基准和坐标框架相关的研究<sup>[11-14]</sup>.文献[11]将相邻省的区域 CORS 基准网(几十个站点)组网后经整体平差,建立统一的坐标基准;文献[12]提出融合全国的 CORS 成为国家级 CORS,并据此升级、更新、维持 2000 国家大地坐标系(CGCS2000);文献[13]分析了适用于大规模 GNSS 基准站网数据子网划分策略;文献[14]研究了基于多星多技术的毫米级坐标框架非线性建模方法.上述研究要么是区域 CORS 站网(几十个站),要么是 IGS 全球站网数据进行分析研究,对于国内上千个站网的坐标基准和坐标框架相关的研究还比较少.目前北斗地基增强系统“北斗全国一张网”已经有超过 2 600 多个增强站,毫米级的基准坐标是提供实时高精度地基和星基服务的前提,也可以为北斗的坐标框架维持更新提供参考,因此需要研究基于 GNSS 大网的基准坐标解算方法.

本文首先介绍了 GNSS 坐标系统与主要的坐标框架,随后介绍了大规模 GNSS 基准站网的坐标解算方法,最后给出了基于实测数据的解算结果以及与 IGS 各分析中心的解算结果对比.

## 1 GNSS 与 ITRF

全球导航卫星系统的基本任务是为全球用户提供可用性、完好

性、连续性和精度符合规定要求的导航定位服务,时间系统和坐标框架是 GNSS 赖以提供服务的基准,也是不同导航系统兼容和互操作必须要考虑的重要因素<sup>[15-18]</sup>.GPS、GLONASS、Galileo、北斗(BDS)4大GNSS的坐标系统虽然定义各不相同,但都符合国际地球自转服务(IERS)规范,可以溯源到国际地球参考框架(International Terrestrial Reference Frame, ITRF),其中北斗坐标系(BeiDou Coordinate System, BDCS)与ITRF的差异在4cm左右,并根据站速度至少每年对框架基准站点坐标进行更新<sup>[17]</sup>.ITRF是由IERS建立的全球地面观测台站,通过GNSS、甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)、卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)、激光测月(Lunar Laser Ranging, LLR)、卫星多普勒定轨定位(Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite, DORIS)等空间大地测量技术,对所有观测数据进行综合分析、处理,得到地面观测站的坐标和速度场,以及相应的地球定位定向参数(Earth Orientation Parameters, EOP)<sup>[19]</sup>.ITRF已成为国际公认的应用最广泛、精度最高的地心坐标参考框架,经过多年发展与改进,现常用版本是ITRF2014,该版本框架考虑了由大气造成的非潮汐负载效应,并且新的观测站增加到975个站址、1499个测站,同时将GNSS观测网络与VLBI、SLR和DORIS大地测量技术相结合,对计算模型进行了优化,解算精度更高<sup>[19]</sup>.ITRF的最新实现ITRF2020已于2022年上半年公布,但目前IGS公布的精密星历、钟差等产品仍基于IGb14(ITRF2014的IGS实现),为了将解算成果与IGS产品保持一致,本文后续的大规模GNSS基准站网(简称GNSS大网)基准坐标解算仍然基于ITRF2014框架。

## 2 GNSS大网基准坐标解算方法

从获取GNSS观测数据到基准坐标解算,需要经历全球框架站点选取、基准站网子网划分、基站单日数据处理和全球整网平差计算4个阶段。

### 2.1 全球框架站点选取

全球框架站点在基准站坐标解算过程中起到骨架和基石作用.利用公开的全球框架站点时序资料,按照国际通用标准,并基于如下原则选取ITRF站点:连续观测至少3年;远离板块边缘及变形区域;速度精度优于3mm/年;至少3个不同分析中心解的速度残差小于3mm/年。

本文共选取了231个ITRF站点,如图1所示。

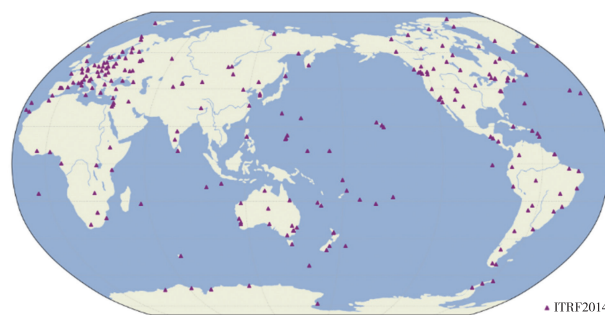


图1 选择的全球ITRF站点分布

Fig. 1 Distribution of selected global ITRF sites

### 2.2 基准站子网划分

GNSS大网通常需要同步处理上千个站的GNSS观测数据,对计算和存储能力都提出了更高的要求,而且大多数IGS分析中心的高精度数据处理软件同时解算的测站数均小于100个,如美国麻省理工学院(MIT)和SCRIPPS海洋研究所共同开发的GAMIT软件目前支持同时解算的测站小于100个,瑞士伯尔尼大学研制的Bernese软件虽然对同时解算的测站数量没有软件限制,也受制于(云)服务器性能,通常同时解算测站数不超过几百个.因此对于GNSS大网需要进行分区处理,分区处理通常有间距分区法和区域分区法<sup>[20]</sup>.间距分区法是根据各个测站之间的距离,将分布密集的测站抽稀,使距离较近的测站均匀地分布在不同的分区,即每个分区的测站分布较均匀,基线长度比较均匀;区域分区法就是按照地理区域进行子网划分.文献[14,20]表明间距分区法得到的基线相对精度明显优于区域分区法,因此本文采用间距分区法对全国2600多个基站进行抽稀划分,共分为6个子网,每个子网的测站基本均匀分布在全国,如图2所示(不同分区用不同颜色点显示)。

### 2.3 基站单日数据处理

基站单日数据处理采用双差数据处理模型,即通过站间和星间两次作差消除接收机和卫星钟差、初始相位和硬件延迟等,大幅削弱对流层延迟和电离层延迟,获得高精度的定位定轨结果.本文通过Bernese软件实现基站的单日数据处理.将北斗全球增强站、IGS站、ITRF2014框架站共计3000多个站点按照区域划分为6个子网分开解算,IGS核心站包含在每个子网中;将子网观测数据、IGS精密轨道、钟差、EOP等产品输入至Bernese软件,输出各子网

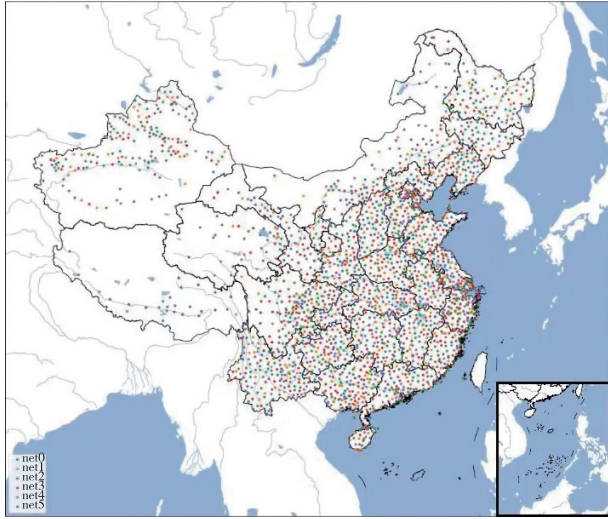


图2 基准站子网划分

Fig. 2 Division of base station subnet

的 SINEX 文件,作为后续整网平差的输入文件.

## 2.4 整网平差计算

整网平差计算采用自研软件以法方程叠加的方式实现网平差.整个解算过程共包括如下 5 个步骤:

Step1:对于第  $i$  个子网的 SINEX 文件,首先恢复法方程.

SINEX 文件中本身所包含的参数,主要包括测站坐标参数、地球自转参数、地球动力学参数、轨道参数等.在 SINEX 文件标准中,法方程的存储有两种形式:NEQ 形式和 COV 形式.对于 NEQ 形式的 SINEX 文件,可直接从中读取无约束的松弛解法方程元素  $N_i, X_i^0, b_i$ ,从而得到松弛解的法方程<sup>[21]</sup>:

$$x_i = N_i^{-1} b_i \quad (1)$$

式(1)中  $N_i$  为法方程矩阵,  $X_i^0$  为待估参数的先验值,  $x$  是估计值相对于其先验值的改正量,  $b_i$  为法方程向量.对于 COV 形式的 SINEX 文件,其中保存的是无约束解的方差-协方差矩阵  $D_i$ 、约束参数的先验方差-协方差矩阵  $D_{ci}$ 、待估参数先验值  $X_i^0$  与估计值  $\hat{X}_i$ ,此时松弛解法方程可使用如下方式计算:

$$N = D_i^{-1} - D_{ci}^{-1}, \quad (2)$$

$$b_i = N_i x = N_i (\hat{X}_i - X_i^0), \quad (3)$$

式(3)中,  $\hat{X}_i$  和  $X_i^0$  分别是未知数的估值和先验值.

Step2:参数先验初值统一.

在解算过程中,未知数的先验值可能是不同的,这不影响待估参数的计算.但在进行整网平差时,就需要将未知数的先验值统一.记第  $i$  个解的未知数先验值为  $X_i^0$ ,解综合时使用的未知数先验值为  $X_c^0$ ,而

$X_c^0 = X_i^0 + dx$ ,根据文献[21],此时法方程变为

$$N_i (\hat{X} - X_c^0) = b_i - N_i dx. \quad (4)$$

也就是说,先验初值的改变不影响法方程矩阵,只需对法方程向量进行改正即可,其改正量为  $-N_i dx$ .

Step3:法方程叠加.

现假设所有的  $n$  个解的未知数都是  $\hat{X}$ .基于坐标模式的网平差模型,第  $i$  个解的误差方程为

$$V_i = B_i \hat{X} - l_i, \quad (5)$$

其中,  $l_i = \hat{X}_i - X_c^0$ ,  $\hat{X}$  是未知数相对于其统一的先验值  $X_c^0$  的改正量,堆叠所有解的误差方程为

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \hat{X} - \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式(6)即为基于观测的综合解方法的观测方程,可以基于最小二乘准则求解.记每个解的权阵为  $P_i$ ,则综合解的法方程为

$$N \hat{X} = b, \quad (7)$$

其中,

$$N = B^T P B = [B_1^T, B_2^T, \dots, B_n^T] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} P_1 & & & \\ & P_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & P_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$b = B^T P L = [B_1^T, B_2^T, \dots, B_n^T] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} P_1 & & & \\ & P_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & P_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix}. \quad (9)$$

需要注意的是,每个解的单位权方差可能不一致,每个解使用的数据处理软件、误差改正模型也可能是不同的.因此,某些情况下需要对输入解的权重进行适量调整.记每个解的权重调整因子为  $a_i$ ,则合并解的法方程变为

$$\left( \sum_{i=1}^n a_i N_i \right) \hat{X} = \sum_{i=1}^n a_i b_i, \quad (10)$$

即  $N = \sum_{i=1}^n a_i N_i, b = \sum_{i=1}^n a_i b_i$ ,该过程称之为法方程叠加,这里的  $b_i$  是经过统一先验初值改正之后的.由以上推导可知,假如采用相同的参数初值和模型建立各自的法方程,则基于法方程的融合等价于基于观测信息的融合.

Step4:引入参数约束条件和基准条件,解算法方程,得到最终估值。

为了将解综合的成果约束到某一特定框架下,需要引入框架点的坐标。记框架点在同历元下的坐标为  $X_r$ ,记约束平差的估值为  $X_c$ ,根据 Helmert 转换关系:

$$X_r = X_c + A\theta, \quad (11)$$

式(11)中,  $\theta = (T_x, T_y, T_z, D, R_x, R_y, R_z)^T$  为框架转换的七参数,  $A$  为 Helmert 转换对应的设计矩阵。由式(11)可知,

$$\theta = (A^T A)^{-1} A^T (X_r - X_c). \quad (12)$$

为了使  $X_r$  和  $X_c$  为同一框架,需要将  $\theta$  约束为零。记  $E = (A^T A)^{-1} A^T$ ,可知约束方程为

$$E(X_r - X_c) = 0. \quad (13)$$

式(13)对应的法方程为

$$(E^T P_\theta E) (X_r - X_c) = 0, \quad (14)$$

这里  $P_\theta$  为七参数的权阵,一般认为各参数相互独立。这里仅对七参数进行约束,因此可认为是一种最小约束解,施加最小约束后的法方程为

$$(N + E^T P_\theta E) x = b + (E^T P_\theta E) (X_r - X_c). \quad (15)$$

求解式(15)即可得到最小约束解。整网平差流程如图3所示。

基于以上流程,若将输入的各子网 SINEX 文件替换为 SINEX 单天解文件,则可以生成多天解。

### 3 解算结果

采用上述解算策略,选取 GPS 周 2101~2120 周(2020年4月12日—8月29日)共计20周的北斗全球增强站、IGS 站、ITRF2014 参考框架站等共计

3 000 多个站的观测数据,对站坐标进行求解。同时给出 IGS 各分析中心的坐标解算与 IGS 周解对比。各机构的内符合精度使用其一周内基站坐标的重复性衡量,其表征的是解算固定基站时不同时间段的坐标稳定性。

为说明本文采用解算策略解算站坐标内符合精度与 IGS 分析中心产品的差异,以南北方向 3 mm、东西方向 3 mm、高程 6 mm 为阈值,统计各 IGS 机构坐标重复性满足该阈值的百分比,如图4所示,从左到右分别给出了 COD、COF、EMR、ESA、GFZ、GRG、JPL、MIG、MIT、NGS、SIO 和 QX(本文算法)的结果。图4中,COD、JPL 和 MIG 是 3 天解产品,其他分析中心因为没有提供 3 天解产品,给出了单天解产品,本文算法(QX)分别给出单天解和 3 天解结果。

从图4中可以看出,COD的3天解重复性最好,本文算法计算的3天解重复性明显优于单天解,因为3天解实际上是由前后3天的单天解综合生成,实际上对基站坐标起了一定的平滑效果。ESA、GFZ单天解的水平重复性要优于JPL和MIG3天解的结果,不同中心选择测站不同和处理策略的差异导致了内符合精度不同。因为高程方向的阈值比水平方向要大,所以高程方向的合格率更高。相比IGS各分析中心的产品,本文单天解的重复性与MIT相当,处于中等水平;3天解的重复性仅略低于COD,处于中上水平。

以IGS周解结果作为真值,对本文解算周解的外符合精度进行评估,得到的外符合结果如表1所示。其中RMSE给出了以毫米为单位的整体统计结果,后两列给出了以IGS周解作为真值,分别以  $\pm 1$  cm 和  $\pm 2$  cm 作为阈值,本文解算的坐标周解与

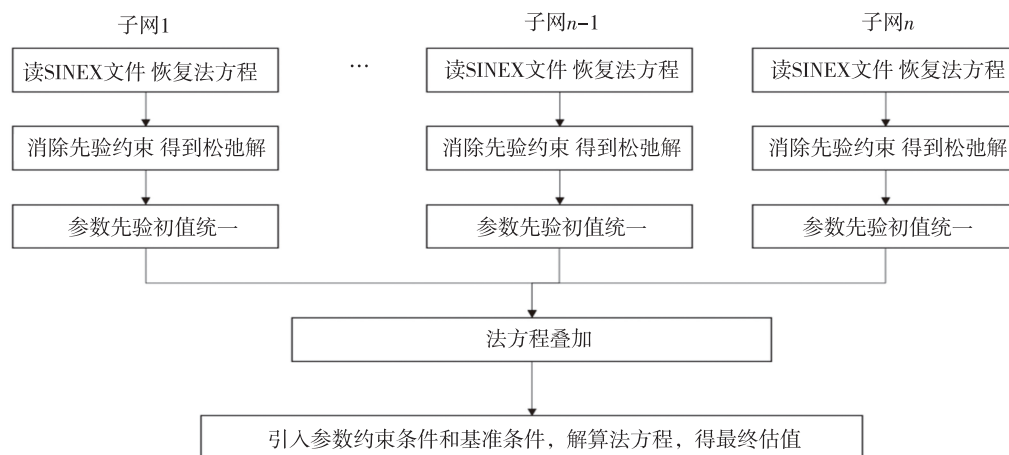


图3 整网平差流程

Fig. 3 Whole network adjustment process

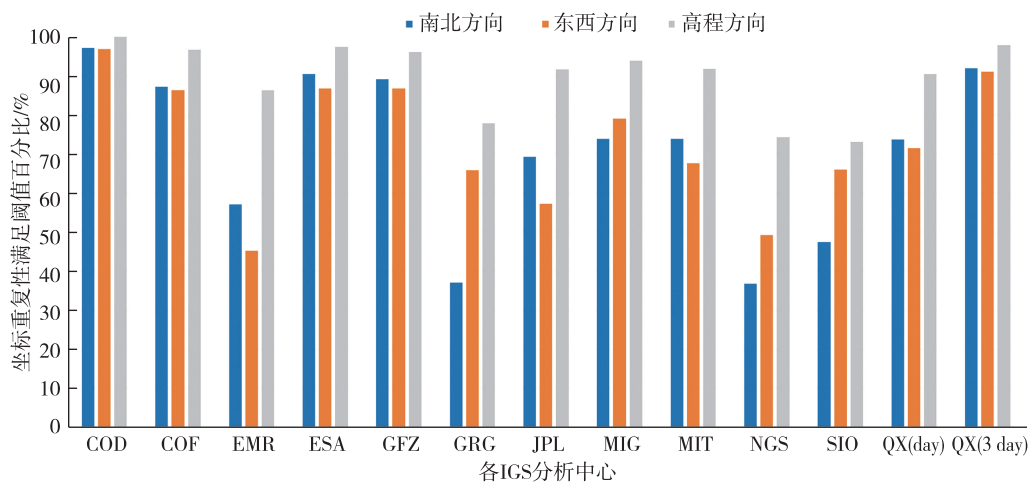


图 4 本文算法和各 IGS 分析中心基站坐标重复性满足阈值百分比

Fig. 4 Percentages of base station coordinates repeatability meeting threshold for IGS analysis centers and the proposed method

IGS 周解差值点位在南北方向、东西方向和高程方向的百分比。

表 1 本文解算周解与 IGS 周解差值比较

Table 1 Difference between the weekly coordinates calculated by the proposed method and by IGS

方向	阈值百分比/%		
	RMSE/mm	±1 cm	±2 cm
南北方向	2.75	99.5	100
东西方向	2.65	99.5	100
高程方向	5.80	92.4	99.3

从表 1 可以看出,本文所采用解算方法得到的基站坐标外符合精度在毫米级,南北和东西方向 RMSE 优于 3 mm,高程 RMSE 优于 6 mm.与 IGS 周解相比,水平方向差异较小,99.5%的水平点位差异在±1 cm 以内,100%的水平点位差异在±2 cm 以内;高程方向差异较大,只有 92.4%的高程点位差异在±1 cm 以内,仍有 0.7%的高程点位差异超过±2 cm.

#### 4 结束语

稳定的毫米级精度的基准站坐标是连续运行基准站网及其系统提供高精度地/星基增强服务的前提.本文采用自研的软件,基于双差数据处理和整网平差对国家北斗地基增强系统建设的“北斗全国一张网”2 600 多个基准站坐标与 IGS 监测站和 ITRF 框架站联合解算,得到解算结果外符合精度南北和东西方向 RMSE 优于 3 mm,高程 RMSE 优于 6 mm,解算精度相比 IGS 各分析中心属于中上水平.

本文提出的解算方法可以支持 3 000 多个

CORS 站整网解算,后续可以用于国家 GPS A、B 级网以及中国地壳运动观测网络与监测网的基站坐标解算与框架维持.解算过程中需注意不同坐标框架之间的转换,如 CGCS2000 国家大地坐标系与 ITRF 框架之间的转换,也希望本文的研究方法和测站数据能为我国北斗坐标系框架的更新和维持做出一定的贡献.

#### 参考文献

##### References

- [1] 姜卫平.GNSS 基准站网数据处理方法与应用[M].武汉:武汉大学出版社,2017  
JIANG Weiping. Data processing methods and applications of the GNSS reference station network[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2017
- [2] 姜卫平.卫星导航定位基准站网的发展现状、机遇与挑战[J].测绘学报,2017,46(10):1379-1388  
JIANG Weiping. Challenges and opportunities of GNSS reference station network[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1379-1388
- [3] 郭树人,刘成,高为广,等.卫星导航增强系统建设与发展[J].全球定位系统,2019,44(2):1-12  
GUO Shuren, LIU Cheng, GAO Weiguang, et al. Construction and development of satellite navigation augmentation systems[J]. GNSS World of China, 2019, 44(2): 1-12
- [4] 过静珺,王丽,张鹏.国内外连续运行基准站网新进展和应用展望[J].全球定位系统,2008,33(1):1-10  
GUO Jingjun, WANG Li, ZHANG Peng. The application and expectation of CORS in international and China[J]. GNSS World of China, 2008, 33(1): 1-10
- [5] 姜卫平,邹璇,唐卫明.基于 CORS 网络的单频 GPS 实时精密单点定位新方法[J].地球物理学报,2012,55(5):1549-1556  
JIANG Weiping, ZOU Xuan, TANG Weiming. A new kind

- of real-time PPP method for GPS single-frequency receiver using CORS network[J].Chinese Journal of Geophysics,2012,55(5):1549-1556
- [6] 李鹤峰,秘金钟,党亚民,等.基于 CORS 的多基准站 BDS/GPS 融合差分网定位性能分析[J].大地测量与地球动力学,2014,34(6):81-85  
LI Hefeng, BEI Jinzhong, DANG Yamin, et al. Study on positioning with differential network of BDS/GPS fusion system based on multiple CORS reference stations [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(6): 81-85
- [7] 高旺,高成发,潘树国,等.北斗三频宽巷组合网络 RTK 单历元定位方法[J].测绘学报,2015,44(6):641-648  
GAO Wang, GAO Chengfa, PAN Shuguo, et al. Single-epoch positioning method in network RTK with BDS triple-frequency widelane combinations [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(6): 641-648
- [8] 姚宜斌,冯鑫滢,彭文杰,等.基于 CORS 的区域大气增强产品对实时 PPP 的影响[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(12):1739-1748  
YAO Yibin, FENG Xinying, PENG Wenjie, et al. Local atmosphere augmentation based on CORS for real-time PPP [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(12): 1739-1748
- [9] 张熙,黄丁发,廖华,等.CORS 网型结构对网络 RTK 服务性能的影响研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(7):887-893  
ZHANG Xi, HUANG Dingfa, LIAO Hua, et al. Impacts of CORS network structure for real-time differential positioning service performance [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(7): 887-893
- [10] 章传银,王伟,甘卫军,等.利用 CORS 站网监测三峡地区环境负荷引起的地壳形变与重力场时空变化[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(9):1287-1294  
ZHANG Chuanyin, WANG Wei, GAN Weijun, et al. Monitoring temporal and spatial changes of crustal deformation and gravity field caused by environmental load in the Three Gorges Reservoir region based on CORS network [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(9): 1287-1294
- [11] 姜卫平,袁鹏,田攀,等.区域 CORS 组网中的坐标基准统一方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2014,39(5):566-570  
JIANG Weiping, YUAN Peng, TIAN Zhi, et al. Coordinate datum unification for regional CORS network combination [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(5): 566-570
- [12] 刘经南,刘晖,邹蓉,等.建立全国 CORS 更新国家地心动态参考框架的几点思考[J].武汉大学学报(信息科学版),2009,34(11):1261-1265,1284  
LIU Jingnan, LIU Hui, ZOU Rong, et al. Some thoughts on the establishment of nationwide continuously operating reference stations [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(11): 1261-1265, 1284
- [13] 姜卫平,赵倩,刘鸿飞,等.子网划分在大规模 GNSS 基准站网数据处理中的应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2011,36(4):389-391,505  
JIANG Weiping, ZHAO Qian, LIU Hongfei, et al. Application of the sub-network division in large scale GNSS reference station network [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(4): 389-391, 505
- [14] 程鹏飞,成英燕.我国毫米级框架实现与维持发展现状和趋势[J].测绘学报,2017,46(10):1327-1335  
CHENG Pengfei, CHENG Yingyan. The current status and tendency of China millimeter coordinate frame implementation and maintenance [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1327-1335
- [15] 杨元喜,陆明泉,韩春好.GNSS 互操作若干问题[J].测绘学报,2016,45(3):253-259  
YANG Yuanxi, LU Mingquan, HAN Chunhao. Some notes on interoperability of GNSS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(3): 253-259
- [16] 魏子卿,吴富海,刘光明.北斗坐标系[J].测绘学报,2019,48(7):805-809  
WEI Ziqing, WU Fuhai, LIU Guangming. The BeiDou coordinate system [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7): 805-809
- [17] 郭树人,蔡洪亮,孟轶男,等.北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J].测绘学报,2019,48(7):810-821  
GUO Shuren, CAI Hongliang, MENG Yinan, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7): 810-821
- [18] 卢望,宿宸庚,胡敏,等.北斗三号系统互操作实现与性能分析[J].中国科学(物理学 力学 天文学),2021,51(1):26-39  
LU Jun, SU Chengeng, HU Min, et al. Analysis of the BeiDou navigation satellite system: interoperability and performance [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2021, 51(1): 26-39
- [19] 程鹏飞,文汉江,刘焕玲,等.卫星大地测量学的研究现状及发展趋势[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(1):48-54  
CHENG Pengfei, WEN Hanjiang, LIU Huanling, et al. Research situation and future development of satellite geodesy [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(1): 48-54
- [20] 程鹏飞,成英燕.基于 GNSS 的 CGCS2000 数据处理技术综述[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):2071-2078  
CHENG Pengfei, CHENG Yingyan. An overview of the CGCS2000 coordinate processing technique based on GNSS [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 2071-2078
- [21] 姚宜斌.GPS 精密定位定轨后处理算法与实现[D].武汉:武汉大学,2004  
YAO Yibin. Research on the algorithm and realization of post-processing for GPS precise positioning and orbit determination [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004

## Solving coordinates of GNSS reference station network

ZHAO Yi<sup>1,2</sup> WU Xiaoli<sup>1</sup> JIANG Yingming<sup>3</sup> FENG Yantong<sup>1</sup>

1 Qianxun Spatial Intelligence Inc., Shanghai 200438

2 Qianxun Spatial Intelligence (Zhejiang) Inc., Huzhou 313299

3 School of Land and Resources, Surveying and Mapping Engineering, Shandong Agriculture and Engineering University, Jinan 250100

**Abstract** In view of the difficulties in data processing and adjustment of coordinate calculation perplexed large-scale GNSS reference station network, this paper proposes a coordinate calculation method. The method is elaborated in four aspects including selection of global framework sites, division of reference station network subnets, single-day data processing of base stations, and global network adjustment calculation. Finally, the internal and external consistency accuracies of the calculation results are evaluated. The analysis results show that the method can solve reference coordinates for network with more than 3 000 stations, and the RMSE of the results is better than 3 mm in both north-south and east-west directions, and better than 6 mm in elevation. The accuracy of the calculation is higher than those of most IGS analysis centers.

**Key words** continuously operating reference system ( CORS ); coordinate frame; coordinate datum; large scale GNSS reference station network