

# 利用双差的超大 GNSS 基准站网解算方法改进

程传录<sup>1</sup> 蒋光伟<sup>1</sup> 聂建亮<sup>1</sup> 田晓静<sup>1</sup>

1 国家测绘地理信息局大地测量数据处理中心,陕西 西安,710054

**摘要:**针对 GNSS 超大网解算中的划分子网问题,分析了 GAMIT 软件子网划分模块(NETSEL)算法的局限性。在此基础上,提出了顾及站点分布的区域性与不均匀性的移动格网密度法。以中国大陆构造环境监测网络站点数据为例,算例结果表明,该方法有效削弱了子网划分不合理情况造成的影响,增强了子网结构的可靠性与站点的精度。

**关键词:**大规模 GNSS 网;网解;子网划分;NETSEL;双差方法

**中图法分类号:**P228.41

**文献标志码:**A

随着卫星定位技术的发展,我国许多行业及地区相继建立了 GNSS 基准站点<sup>[1-7]</sup>。为了整体分析板块运动、大气等物理变化,多个国家和区域建立了数百个甚至上千个参考站的 GNSS 超大型网。随着参考站数量的增加,GNSS 网数据处理效率低下的矛盾越发突出。目前,国内外许多学者针对大网解算进行了研究,文献[1]提出了法方程降维方法,提高了计算效率;文献[2]研究了基于非差模式的 GNSS 实时大网数据快速解算理论与方法;文献[2,4]提出了联合几何滤波方法进行网解,将大型法方程化成若干小型法方程解算,提高解算速度;文献[7]系统地研究了高精度 GPS 网的统一与数据处理的方法;文献[8-9]介绍了最新的 GPS 数据处理中各种模型的精化、相位模糊度解算的求解方法、全球框架更新等。上述研究丰富了 GNSS 超大网数据处理,这些研究在 GNSS 大网解算策略上主要基于三种模式:① 全网整体解算。该方法整体计算的可靠性是最高的,并且增强了网解的能力;② 双差网解。该方法将大网划分为若干个子网单独处理,然后采用子网网解合并的方法;③ 非差精密单点定位解(PPP)。在大型网络数据实时处理中,对于  $n$  个测站,网络处理时间是  $O(n^3)$ ,PPP 处理时间是  $O(n)^{[2]}$ 。随着 GNSS 精密服务的深入,对于参考框架的建设与维护、高精度形变网的监测等的研究与应用,虽然 PPP 方法效率最快,但由于 PPP 方法在整体计算时没有完整的方差-协方差,不能

反应点位之间的相关关系,不能满足精密定位服务需求。因此,研究基于双差网解模式的实时数据解算方法,将超大网解算应用于全国 GNSS 基准站数据处理,将提升我国在大地基准维护、地理国情监测、防灾减灾等方面的能力。

在双差网解中,影响定位精度的因素有很多,其中一个重要因素就是子网的图形结构<sup>[10]</sup>,已有研究成果表明不合理的基准站结构可能解存在系统性偏差影响<sup>[9-10]</sup>。因此,如何有效划分子网及增强图形强度是提高基于双差网解模式解算精度的重要因素。本文提出了一种考虑点位分布与区域性差异的移动格网密度法,优化 NETSEL 子网划分图形结构异常。

## 1 最大密度子网划分算法

GAMIT/GLOBK 是权威的高精度 GNSS 数据处理软件,其 NETSEL 模块根据点位分布采用密度等级法(max density to subnet, MDS)依次划分子网。该算法原理简单、计算效率高,在点位分布均匀的情况下可得到较好的子网图形。

最大密度子网划分方法估计子网点数 Num (一般为 30~50)并计算子网个数 Num<sub>1</sub>,将点所在区域格网化,根据点位的随机分布依次求取格网点最大密度处并搜索密度处子网站点,然后迭代计算剩余点数中次最大密度处,直至求到第 Num<sub>1</sub> 个最大次密度,并记录相应最大密度处的

站点。具体算法如下。

1) 读取站点概略坐标文件,确定子网点数与子网个数。

2) 将区域划分成  $1^\circ \times 1^\circ$  的网格,根据实际站点分布确定网格最大密度位置,在最大密度处搜索最近的 Num 个点。

3) 在剩余的点中,计算次最大密度点,搜索该密度处 Num 个点。

4) 重复步骤 3),计算最大密度,直至所有点都被划分到子网中。

5) 创建子网间的联系点。

6) 从每个子网中抽取距该子网最大密度点距离最小、适中、最大的三个点构成整网的节点网。

## 2 顾及点位分布不均匀性的移动网格密度法

NETSEL 模块的子网划分算法适用于理想化的点位均匀分布的情况。该算法首先从整网局

$$\rho = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\arccos(\sin(\text{Lat}_g) \times \sin(r\text{Lat}_i) + \cos(\text{Lat}_g) \times \cos(r\text{Lat}_i) \times \cos(\text{Long}_g - r\text{Long}_i))} \quad (1)$$

其中,  $\rho$  为密度;  $n$  为总点数;  $\text{Lat}_g$ 、 $\text{Long}_g$  为网格点纬度与经度;  $r\text{Lat}_i$ 、 $r\text{Long}_i$  为第  $i$  个站点的纬度与经度。

3) 在其余的点中重复步骤 2) 直至所有点都被划分到子网中。

4) 创建子网间的联系点。

5) 从每个子网中均匀抽取三个点构成整网的节点网。

## 3 算例分析

本文搜集了中国大陆构造环境监测网 226 个 GNSS 基准站与中国周边附近 IGS 站(见图 1) 2012-05-17 的观测资料,采用 MDS、MMDS 两种算法进行子网划分,使用 GAMIT 软件进行数据处理,并从网结构可靠性、基线重复率、点位精度方面对两种方法进行比较。

### 3.1 子网划分边长长度分析

不同算法构建的子网图形结构差异也较大,若图形边长距离差异巨大,则不能削弱数据处理时对流层与电离层的影响,不能正确估计与测站有关的参数。

子网结构基线长度统计结果如表 1 所示。

部处创建子网,将导致创建的子网边长相差巨大,致使采用基于双差网解的软件解算时,不能有效地削弱共性误差。然而,实际的 GNSS 站点分布存在区域性与不均匀性,在点位分布不均匀的情况下,MDS 将导致子网结构异常,因此,笔者提出了顾及点位分布不均匀的移动网格密度法(move max density to subnet, MMDS)。该方法的主要思想为:从区域起始边向另一边搜索,在起始边(纬度或经度)最小点附近搜索一定半径内的点,计算该搜索区域的最大密度点,记录距最大密度点数近的 Num 个点(一般子网点数为 30~50),创建子网。按照上述方法在剩余站点中依次创建子网。具体步骤如下。

1) 将区域划分成  $1^\circ \times 1^\circ$  的网格,读取站点概略坐标,根据总点数与子网,确定子网点数与子网个数。

2) 寻找经度(纬度)最小的点,在一定半径内,计算搜索区域的最大密度点并记录离最大密度点最近的 Num 个点。

任意一格网点密度采用如下公式计算:

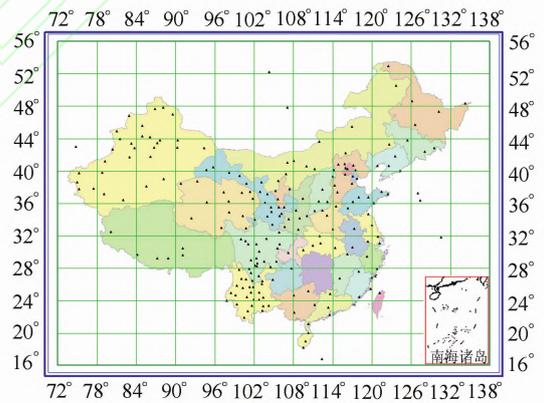


图 1 GNSS 站点分布图

Fig. 1 Distribution of GNSS Sites

表 1 各方案基线长度统计/km

Tab. 1 Statistics of Base Line Length of Scheme/km

方案	最短边长	最长边长	平均边长
MDS	31	7 211	1 176
MMDS	25	2 025	777

### 3.2 基线分量重复率分析

一般通过对基线分量的重复率来判定方案的优劣,通常以单天解的重复率作为依据来判别解的精度。

$$R = \left[ \frac{\frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(b_i - \bar{b})^2}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中,  $n$  为单天解的个数,  $b_i$ 、 $\sigma_i$  分别为单天解基线分量和相应方差;  $\bar{b}$  为单天解基线分量的加权平均值。

基线重复率比较统计结果见表 2。

表 2 各方案基线重复率

Tab. 2 Base Line Repeation of Scheme

方案	$\bar{R}$ 北方向	$\bar{R}$ 东方向	$\bar{R}$ 天顶方向	$\bar{R}$ 长度
MDS	2.32	2.17	2.07	1.00
MMDS	2.20	1.18	1.80	0.54

### 3.3 点位精度

两种方案划分的子网图形结构,在一定程度上也影响结果的可靠性与精度,两方案结果统计如图 2 与表 1、表 3 所示。图 2 中,横轴为两种方案差异在各个方向的差异,纵轴为两种方案对应差异的个数。

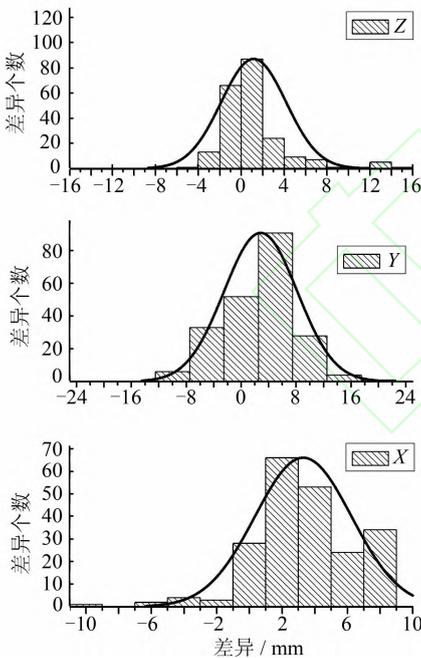


图 2 两种方案各方向差异

Fig. 2 Difference between The Two Scheme

表 3 各方案误差统计/mm

Tab. 3 Errors Statics of Schemes/mm

方案	X 方向平均精度	Y 方向平均精度	Z 方向平均精度
MDS	1.6	3.3	2.3
MMDS	1.4	3.0	2.1

从以上图表结果可得出如下结论。

1) MMDS 方法较 MDS 法更加合理, MDS 法没有考虑子网间基线的距离、子网的相互关系,

在初步划分子网时破坏了网型的完整性,使后续的子网图形会出现结构异常。从两种方法划分的子网图形结构可发现, MDS 法可能导致网点基线距离不是很均匀,甚至基线长度达到数千 km,在数据处理时,点位之间的相关性就很弱,构建双差方程不能很好地削弱对流层、电离层影响。

2) MMDS 方法基本考虑了我国 GNSS 基准点的区域特性,使子网边长较合理。基于 MDS 法构建的每个子网最多一个 IGS 站提供解算基准;基于 MMDS 法的子网周围可有 4~6 个 IGS 站,基本能满足子网各个方向会有一个 IGS 站,使网型对称、结构合理,从而可削弱基准站分布不合理对解算结果的影响。

3) 根据 MMDS 方法划分的子网的基线重复率优于 MDS 法的基线结果,结果也更加可靠。

4) MDS 方法的点位精度也稍优于 MDS 方法的结果,其差异可能是由点位观测数据质量、子网图形结构、解算策略等因素造成的。

## 4 结 语

采用 GAMIT 软件中的 NETSEL 子网划分模块在点位分布均匀的情况下,也可得到较合理的图形结构,但其未考虑点位分布的区域性,在点位分布不均匀的情况下划分的子网图形结构弱。采用顾及点位分布不均匀性的 MMDS 法划分子网,可进一步改善子网划分的图形结构,提高图形结构的可靠性与解算精度。

## 参 考 文 献

- [1] Ge M, Dick G G G. A New Data Processing Strategy for Huge GNSS Global Network [J]. *Journal of Geodesy*, 2006, 82: 199-203
- [2] Cai Hua. Application Research of Method of Large GNSS Network Realtime Data Rapid Solution [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010 (蔡华. GNSS 大网实时数据快速解算方法应用研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2010)
- [3] Geng Tao, Zhao Qile, Liu Jingnan, et al. Realtime Precise Point Position Based on PANDA Software [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhu University*, 2007, 32(4): 312-315 (耿涛, 赵齐乐, 刘经南, 等. 基于 PANDA 软件的实时精密定位研究. [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(4): 312-315)
- [4] Vollath U, Landau H, Chen X M. Network RTK Concept and Performance [C]. *The GNSS Symposi-*

- um, Wuhan, 2002
- [5] Hou Hesheng, Jiang Zaisen. On Micro-dynamic Deformation Informations Obtained from GPS Observations During KunLun Mountain Ms 8. 1 Earthquake in 2001[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(3): 9-13 (侯贺晟, 江在森. 基于 GPS 观测的昆仑山 8.1 级地震微动态变形研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2008, 28(3): 9-13)
- [6] Ta La, Guo Liangqian, Liu Xia, et al. Micro-dynamic Characteristics of GPS Sites in TianJin Area [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(5): 27-32 (塔拉, 郭良迁, 刘峡, 等. 天津地区 GPS 站点的微动态变化特征研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(5): 27-32)
- [7] Sui Lifen. Research on Unification and Data Processing for High-Precision GPS Networks [D]. Zhengzhou: Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 2001 (隋立芬. 高精度 GPS 网的统一与数据处理若干问题研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2001)
- [8] Wang Min. New Development in GPS Data Processing and Its Impaction Position [J]. *Recent Development in World Seismology*, 2007(7): 3-8 (王敏. GPS 数据处理方面的最新进展及其对定位结果的影响[J]. *国际地震动态*, 2007(7): 3-8)
- [9] Cheng Guangyi, Zhang Haidong, Zhang Yingli, et al. Data Analysis of Third-Order GPS Geodetic Network by Advanced GPS Reference Point [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(2): 96-99 (程广义, 张海东, 张英利, 等. 利用高等级点加强三级 GPS 网的处理分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(2): 96-99)
- [10] Xu Changrong, Chen Yanmei. The Study on the Impact of Geometric Distribution of Datum Points to the Accuracy on GPS Control Network [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2011(3): 1 842-1 843 (徐昌荣, 陈艳梅. GPS 控制网中基准点的几何分布对精度的影响研究[J]. *安徽农业科学*, 2011(3): 1 842-1 843)

## Improving the Processing Strategy Based on Double-Differenced Observations for Huge GNSS Network

CHENG Chuanlu<sup>1</sup> JIANG Guangwei<sup>1</sup> NIE Jianliang<sup>1</sup> TIAN Xiaojing<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geodetic Data Processing Center, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Xi'an 710054, China

**Abstract:** In connection with huge GNSS network data processing, has three strategy approaches, a whole huge net data process, a non-difference method and a divide the network to small networks process, we propose to divide a network and analyse the limitations of this module based on the GAMIT subnet module and present a move grid density method. The method is researched and analyzed in detail using data from CMONOC. The results indicate that the baseline repeatability and site precision is more than methods based on the GAMIT subnet module method's result, while the algorithm weakens the unreasonable situation in subnetting, enhancing the reliability of a subnet structure.

**Key words:** huge GNSS network; network solution; subnetwork; NETSEL; double-difference approach

**First author:** CHENG Chuanlu, senior engineer, specializes in GNSS data processing. E-mail: xiancl@163.com

**Foundation support:** The National 863 program of China, No. 2009AA121402-5.