

Analysis on the Solution of Earth Rotation Parameters with GNSS Data of CMONOC and IGS

Xuechuan Li¹, Binghui Guo¹, Jingwei Li¹, Xuexi Liu²

¹The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin

²School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: leexc0124@163.com

Received: Dec. 25th, 2018; accepted: Jan. 8th, 2019; published: Jan. 15th, 2019

Abstract

In order to analyze the accuracy of the ERP calculated by the GPS observations of the Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC), firstly, 40 GNSS continuously stations from CMONOC and the same number of International GNSS Service (IGS) Stations were selected based on the network geometry. With the observation data of 35 days from January 28th to March 3rd, 2018, the earth rotation parameters (ERP) were calculated respectively. Compared the results with the ERP precision results published by IERS, it was shown that the precision of ERP calculated by the CMONOC data was lower than that of the IERS Bulletin A products, while using the data from the IGS stations, the ERP products with better accuracy than Bulletin A could be obtained. Secondly, in view of the real-time application, this paper also solved the ERP based on the GNSS rapid ephemerides. Results showed that the accuracy of the X_P results based on the IGS data was better than that of the Bulletin A, while the accuracy of other parameters was significantly lower than that of the Bulletin A product.

Keywords

CMONOC, IGS, ERP, GNSS Satellite Ephemerides

陆态网络与IGS数据对地球自转参数的解算精度分析

李雪川¹, 郭炳辉¹, 李经纬¹, 刘学习²

¹中国地震局第一监测中心, 天津

²武汉大学测绘学院, 湖北 武汉

Email: leexc0124@163.com

收稿日期：2018年12月25日；录用日期：2019年1月8日；发布日期：2019年1月15日

摘要

为分析陆态网络GPS数据进行ERP解算的精度，本文首先选取了40个均匀分布的陆态网络GNSS基准站和相同数目的IGS测站，利用其2018年1月28日至3月3日共35天的观测数据分别解算了地球自转参数(ERP)，解算结果与IERS公布的ERP精密结果对比表明，利用区域性的陆态网络测站数据解算ERP的精度要低于IERS Bulletin A预报产品的精度，而利用IGS全球分布的测站数据则可以得到精度明显优于Bulletin A的ERP产品；同时为分析卫星星历对ERP解算精度的影响以及实时应用的考虑，本文还基于GPS快速星历解算了ERP，结果表明除IGS数据解算的XP结果精度优于Bulletin A以外，其他参数的解算结果精度均明显低于Bulletin A产品精度。

关键词

陆态网络，国际GNSS服务，地球自转参数，GNSS星历

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地球自转参数(Earth Rotation Parameters, ERP)包括两个极移参数(X_p , Y_p)和 UT1-UTC (世界时 UT1 和协议世界时 UTC 之差，也可用日长变化 LOD 表示，描述了地球自转速率的变化)，表征了协议地固系到瞬时惯性系间的转换，因此在现代大地测量、地球动力学研究、地壳运动监测等领域都发挥着重要作用，如卫星定轨[1]、参考框架的建立和维持[2]、地震预报[3] [4]等。

目前，ERP 参数主要由国际地球自转与参考服务(International Earth Rotation and Reference Systems Service, 简称 IERS)发布，其结果主要通过 GNSS、VLBI、SLR 以及 DORIS 等多种现代空间大地测量技术的观测数据解算后加权平均得到。而 GNSS 技术由于具有测量精度高、高频采样率、全球布网等优点，在联合数据处理中占据重要的比重，针对 GNSS 在解算 ERP 时的解算策略、测站分布、数据弧长等关键因素，国内外学者对此作了大量研究：文献[5]利用 22 个全球均匀分布的基准站 GPS 观测资料分析了 ERP 的解算精度；文献[6]则分析了利用 GPS 观测资料解算 ERP 的精度影响因素和解算策略；文献[7]和[8]则着重分析了观测弧长对 ERP 解算精度的影响，文献[8]还分析了测站数目对解算结果的影响；针对 ERP 的高频变化，文献[9]和[10]还进行了 ERP 高频解算的研究；基于我国北斗卫星导航系统的观测数据，文献[11]进行了利用北斗观测数据解算 ERP 参数的精度分析。然而，以上研究主要基于全球分布的国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)测站并结合少量国内区域测站数据进行，对利用国内测站数据解算 ERP 研究较少；同时在解算过程中利用了导航卫星的事后精密星历，从而影响了研究的实时应用价值。

因此，本文利用了 40 个均匀分布的中国大陆构造环境监测网络(简称“陆态网络”)基准站和相同数目的 IGS 基准站的 GPS 观测数据，分别解算了 ERP 参数的单天解，通过与 IERS 公布的 C04 精密值相比较的方法分析了观测网解算 ERP 的精度；同时，为提高 ERP 解算的实时性，本文还基于实时发布的 GPS 预报星历，同样利用陆态网络和 IGS 观测数据进行了 ERP 解算，解算结果分别与 IERS 发布的 ERP 预报

值进行外符合比较, 以分析其解算精度。

2. GNSS 解算 ERP 的数学模型

在 GNSS 观测模型中, 地面测站通常在地心地固系描述, 卫星坐标则在地心惯性系下描述, 而通过 ERP 参数和章动参数将二者统一到同一坐标系下, 从而建立观测方程。本文利用了 GNSS 数据处理的双差模式, 双差观测方程可表示为[12]:

$$\Delta\varphi_{ij}^{pq} = \frac{f}{c} \Delta\rho_{ij}^{pq} - \Delta N_{ij}^{pq} - \frac{f}{c} (V_{ion})_{ij}^{pq} - \frac{f}{c} (V_{trop})_{ij}^{pq} \quad (1)$$

上式中, $\Delta\varphi_{ij}^{pq}$ 为相位表示的双差观测值, f 为信号频率, c 为光速, $\Delta\rho_{ij}^{pq}$ 为在卫星和接收机间二次求差后的星站距, ΔN_{ij}^{pq} 为双差模糊度, $(V_{ion})_{ij}^{pq}$ 为电离层误差, $(V_{trop})_{ij}^{pq}$ 为对流层误差。其中, $\Delta\rho_{ij}^{pq}$ 可表示为:

$$\Delta\rho_{ij}^{pq} = \sqrt{(X^q - X_j)^2 + (Y^q - Y_j)^2 + (Z^q - Z_j)^2} - \sqrt{(X^q - X_i)^2 + (Y^q - Y_i)^2 + (Z^q - Z_i)^2} - \sqrt{(X^p - X_j)^2 + (Y^p - Y_j)^2 + (Z^p - Z_j)^2} + \sqrt{(X^p - X_i)^2 + (Y^p - Y_i)^2 + (Z^p - Z_i)^2} \quad (2)$$

式中, (X^p, Y^p, Z^p) , (X^q, Y^q, Z^q) 为卫星坐标, (X_i, Y_i, Z_i) , (X_j, Y_j, Z_j) 为测站坐标, 都在地心地固系下描述。如果设 r_T 为地固系坐标矢量, r_i 为 J2000 地心惯性系下坐标矢量, 那么有:

$$r_T = ([P][N][R][W])^T r_i \quad (3)$$

式中, $[P][N]$ 为岁差章动矩阵, $[R] = R_3(-GST)$ 为地球旋转矩阵, GST 表示格林尼治真恒星时, $[W] = R_3(-s') \cdot R_2(X_p) \cdot R_1(Y_p)$ 则为极移矩阵, s' 表示地球中介原点在 ITRS 下的位置, 可用 $s' = -47 \mu as \cdot t$ 计算[13]。 $R_i(\theta)$ 表示正交旋转矩阵, 具体表达式为:

$$R_1(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}, \quad R_2(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}, \quad R_3(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

从(3)式可知, ERP 中的极移参数 (X_p, Y_p) 包含在 $[W]$ 矩阵中, 另一个参数 $UT1-UTC$ 则包含在 $[R]$ 矩阵的计算中。因此利用 GNSS 双差观测值解算 ERP 参数, 观测值对 ERP 的偏导数为:

$$\frac{\partial \Delta\rho_{ij}^{pq}}{\partial(x_p, y_p)} = \frac{\partial \Delta\rho_{ij}^{pq}}{\partial \bar{r}_T} \cdot \frac{\partial r_T}{\partial [W]} \cdot \frac{\partial [W]^T}{\partial(x_p, y_p)} \cdot ([P][N][R])^T \cdot r_i \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Delta\rho_{ij}^{pq}}{\partial(UT1-UTC)} = \frac{\partial \Delta\rho_{ij}^{pq}}{\partial r_T} \cdot [W]^T \cdot \frac{\partial [R]^T}{\partial(UT1-UTC)} \cdot ([P][N])^T \cdot r_i \quad (6)$$

3. GNSS 数据与解算策略

陆态网络目前有 260 个分布全国的 GNSS 连续观测站, 为研究中国大陆地壳运动变化提供了大量观测数据[14]。研究表明, 测站分布、测站数量及观测弧段等观测条件对 ERP 的解算精度都有显著的影响, 全球均匀分布的 40 个左右的测站即可解算与 IERS 公布精度相当的 ERP 产品[8]。

本文为研究陆态网络数据解算 ERP 参数的能力, 选取了全国分布均匀的 40 个陆态连续站, 所选测站分布见图 1; 同时为对比分析全球分布的测站对 ERP 解算精度的影响, 同样选取了分布均匀的 40 个 IGS 测站进行了解算, 其测站分布如图 2 所示。

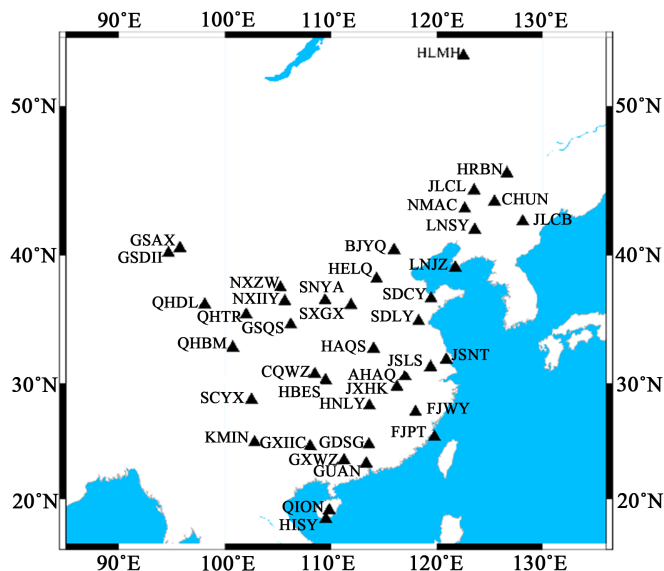


Figure 1. CMONOC stations

图 1. 陆态网络基准站分布图

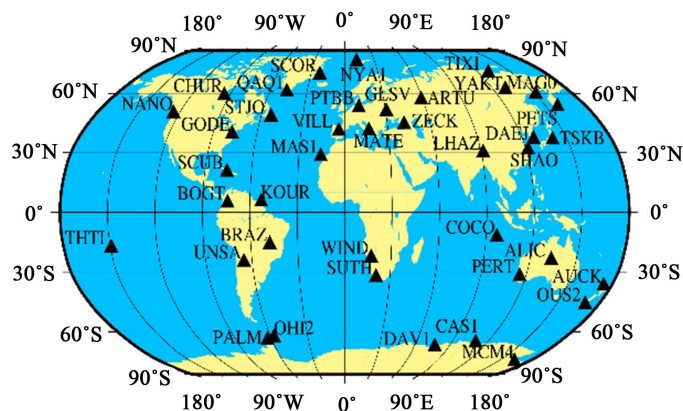


Figure 2. IGS stations

图 2. IGS 测站分布图

本文的数据解算使用了瑞士伯尔尼大学开发的 Bernese GNSS 数据解算软件[15], 在其双差处理过程文件 RNX2SNX.PCF 的基础上增加了 ERP 解算功能, 利用单天解的模式解算当天的 ERP 值。具体解算策略如表 1 所示。

Table 1. Data processing strategy

表 1. 数据解算策略

| | |
|----------|---------------------------------|
| 卫星系统 | GPS/GLONASS |
| 参考框架 | IGS14 |
| 天线相位中心改正 | PCV_COD.I14 |
| 数据截止高度角 | 10° |
| 数据采样率 | 30 s |
| 解算参数 | 测站坐标, ERP 参数, 模糊度参数, 钟差参数和对流层参数 |

4. 数据解算

4.1. 陆态网与 IGS 全球网的解算对比

根据上一节中选定的陆态网络 40 个基准站, 解算了 2018 年 1 月 28 日(年积日 28)至 3 月 3 日(年积日 62)共 35 天的 GNSS 数据。IGS 测站则同样利用选定的 40 站的相同时间段的观测数据, 分别解算了 ERP, 解算结果与 IERS 公布的 C04 精密值作比较, 以此评估解算精度。

解算过程中使用了 IGS 发布的精密星历产品, ERP 先验值则使用了 IERS 发布的预报结果 Bulletin A 产品(<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php>)。

解算完成后, 分别将陆态网络基准站数据和 IGS 测站数据解算的结果与 ERP 的精密结果(C04 产品)相比较[15], 以评估解算结果的外符合精度。

为比较解算结果与 Bulletin A 产品的精度, 同样计算了 Bulletin A 相对于 C04 产品的差值。图 3 给出了陆态网络基准站数据计算结果(正方形标记)、IGS 测站数据计算结果(三角标记)以及 Bulletin A 计算结果(圆形标记), 其中, 上图为 X_p 参数结果, 中图为 Y_p 结果, 下图则为 UT1-UTC 结果。需要指出的是, 图中给出的数值是三类 ERP 结果与 C04 产品作差后取绝对值后的结果。

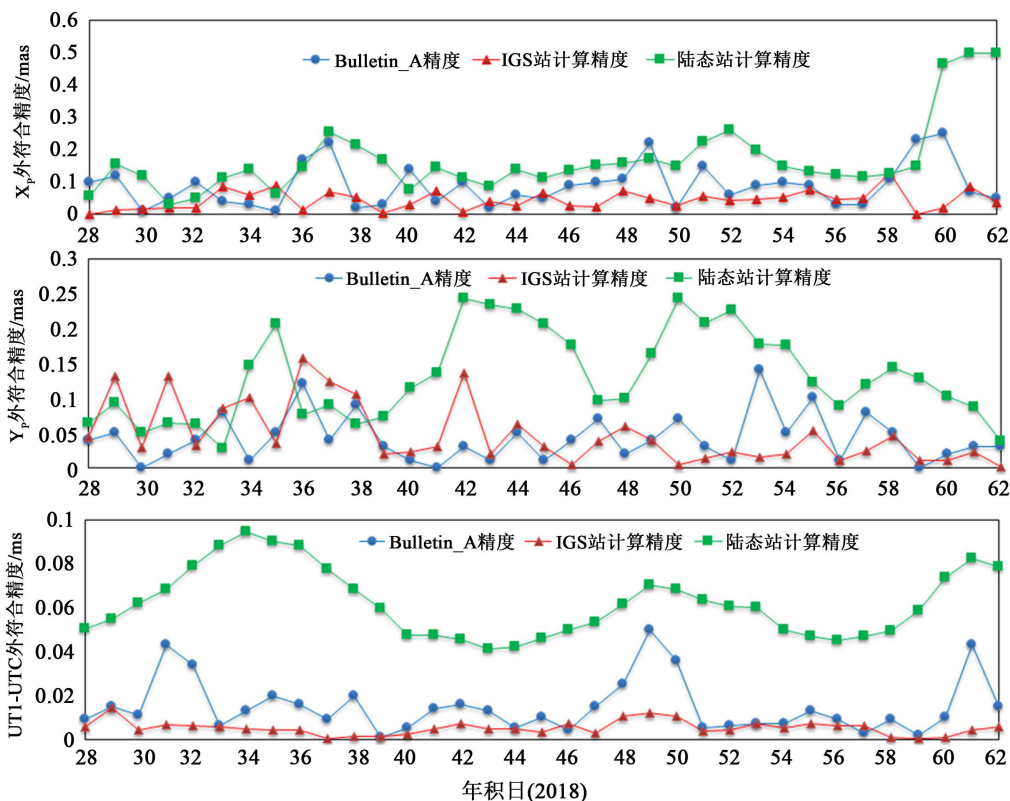


Figure 3. The precision of ERP computed by CMONOC and IGS using precision ephemeris

图 3. IGS 精密星历下陆态网与全球网的 ERP 解算精度

从图 3 可以看出, 对于 IGS 测站数据计算结果, X_p 参数与 UT1-UTC 参数精度相比 Bulletin A 产品精度有了明显的改进, Y_p 参数精度则与 Bulletin A 产品基本相当, 统计表明(表 2), 由 IGS 测站数据解算的 X_p 和 UT1-UTC 参数结果的均方根误差(RMS)分别为 0.053 mas 和 0.006 ms, 明显优于 Bulletin A 产品的 0.11 mas 和 0.019 ms; 而 Y_p 参数结果的均方根误差为 0.065 mas, 高于 Bulletin A 产品的 0.054 mas。

Table 2. The statistics of ERP precision computed by precision ephemeris
表 2. 精密星历下 ERP 计算结果精度统计

| | Bulletin A 精度 | | | IGS 全球网计算精度 | | | 陆态网计算精度 | | |
|--------------|---------------|-------|-------|-------------|--------|-------|---------|-------|-------|
| | 最大值 | 最小值 | RMS | 最大值 | 最小值 | RMS | 最大值 | 最小值 | RMS |
| X_p (mas) | 0.25 | 0.01 | 0.11 | 0.129 | 0 | 0.053 | 0.498 | 0.029 | 0.201 |
| Y_p (mas) | 0.14 | 0.00 | 0.054 | 0.158 | 0.001 | 0.065 | 0.243 | 0.027 | 0.145 |
| UT1-UTC (ms) | 0.05 | 0.001 | 0.019 | 0.015 | 0.0002 | 0.006 | 0.094 | 0.041 | 0.064 |

相对于 IGS 测站的结果, 陆态网基准站的结果精度则低于 Bulletin A 产品的精度, 三类参数结果的均方根误差分别为 0.201 mas, 0.145 mas 和 0.064 ms。图 3 展示的陆态网络基准站数据解算结果与 C04 的差值曲线也表明其结果精度要低于 Bulletin A 产品精度。

陆态网络作为一个区域性的 GNSS 观测网络, ERP 解算精度低于 Bulletin A 产品精度, 而利用全球分布的 IGS 测站数据, 可得到精度明显高于 Bulletin A 的 ERP 产品。

4.2. GNSS 快速星历下解算分析

4.1 节利用 GNSS 精密星历, 分别基于陆态网络基准站数据和 IGS 测站数据解算了 ERP, 并分析了解算结果的精度。然而, IGS 公布的精密星历产品也是一种事后的产品, 其延迟周期为 12 天~17 天, 在一些实时性的应用中无法使用, 为此 IGS 每天还发布快速星历产品, 为 GNSS 的实时应用提供服务 (<http://www.igs.org/products>)。因此本节基于 IGS 发布的快速星历产品, 利用与 3.1 节相同的解算策略, 分析陆态网络基准站数据和 IGS 站数据解算 ERP 的精度。

图 4 给出了解算结果与 C04 产品的差值取绝对值后的曲线结果, 同样, 上中下三图分别为 X_p 、 Y_p 和 UT1-UTC 结果, 圆形标记曲线为 Bulletin A 产品结果, 正方形标记则为陆态网络基准站结果, 三角标记曲线为 IGS 站结果。

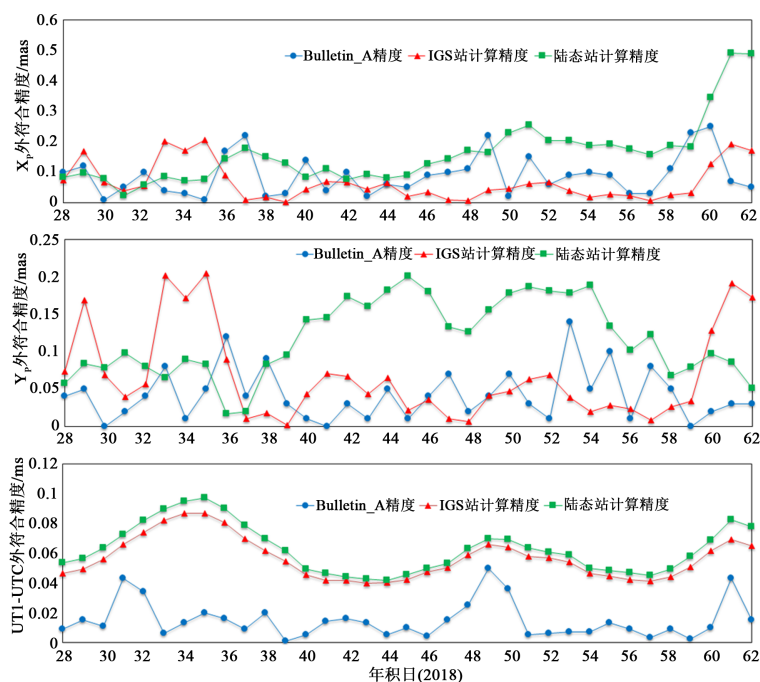


Figure 4. The precision of ERP computed by CMONOC and IGS using rapid ephemerides
图 4. IGS 快速星历下陆态网与全球网的 ERP 解算精度

从图 4 可以看出, 相比使用精密星历的计算结果, 即使利用 IGS 全球站数据, 快速星历下计算的 ERP 精度除 X_p 参数略优于 Bulletin A 外, 其他参数的解算精度均低于 Bulletin A 产品; 而利用陆态网络基准站解算的结果精度则更低。

表 3 给出了 ERP 解算的统计结果。利用 IGS 全球网数据计算的 ERP 结果的均方根误差分别为 0.09 mas, 0.151 mas 和 0.058 mas, 其中 X_p 参数结果优于 Bulletin A 产品的 0.11 mas; 而利用陆态网络基准站计算的 ERP 结果的均方根误差分别为 0.191 mas, 0.128 mas 和 0.065 mas。

Table 3. The statistics of ERP precision computed by rapid ephemerides

表 3. 快速星历下 ERP 计算结果精度统计

| | Bulletin A 精度 | | | IGS 全球网计算精度 | | | 陆态网计算精度 | | |
|--------------|---------------|-------|-------|-------------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | 最大值 | 最小值 | RMS | 最大值 | 最小值 | RMS | 最大值 | 最小值 | RMS |
| X_p (mas) | 0.25 | 0.01 | 0.11 | 0.205 | 0.002 | 0.09 | 0.492 | 0.024 | 0.191 |
| Y_p (mas) | 0.14 | 0.00 | 0.054 | 0.572 | 0.026 | 0.151 | 0.201 | 0.017 | 0.128 |
| UT1-UTC (ms) | 0.05 | 0.001 | 0.019 | 0.087 | 0.040 | 0.058 | 0.009 | 0.002 | 0.065 |

5. 结语

本文分别利用陆态网络基准站和 IGS 测站的 GNSS 观测数据, 以 IERS 公布的预报产品 Bulletin A 为先验值, 解算了 2018 年 1 月 28 日至 3 月 3 日共 35 天的 ERP, 将结果与 IERS 公布的 C04 精密值相比较, 表明利用 IGS 全球分布的测站数据可得到精度明显优于 Bulletin A 的 ERP 产品, 而利用陆态网数据得到的结果精度则低于 Bulletin A 产品精度, 这表明要高精度的解算 ERP 参数, 分布均匀的全球范围的测站是必要的, 只利用某一区域的测站数据无法得到高精度的 ERP 结果。

同时 GNSS 快速星历下的计算结果表明, 在全球分布的测网条件下, 单独利用 GNSS 数据解算的 ERP 精度, 除 X_p 精度略优于 Bulletin A 产品的 X_p 精度外, 其他两参数的精度均低于 Bulletin A 产品; 而陆态网络的计算结果精度均低于 Bulletin A 产品。因此在实时应用需求下, 在保证全球分布测网的前提下, 还需要进一步研究如何提高实时星历产品下的 ERP 解算精度。

基金项目

中国地震局第一监测中心科技创新主任基金(FMC2017006), 中国地震局地震科技星火计划项目(XH18066Y)。

参考文献

- [1] Tapley, B.D., Schutz, B.E. and Born, G.H. (2004) Statistical Orbit Determination. Elsevier Academic Press, Burlington.
- [2] Altamimi, Z., Collilieux, X. and Legrand, J. (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**, 1-19. <https://doi.org/10.1029/2007JB004949>
- [3] 陈学忠, 李艳娥, 王恒信, 等. 2004 年印尼苏门答腊 MW9.0 地震前地震活动增强现象及其与地球自转的关系[J]. 地球物理学报, 2013(1): 79-90.
- [4] 王恒信, 郭祥云, 李艳娥, 等. 地球自转对强震震中附近中小地震的影响[J]. 地震地磁观测与研究, 2013(Z3): 52-60.
- [5] 何战科, 杨旭海, 李志刚, 等. 利用 GPS 观测资料解算地球自转参数[J]. 时间频率学报, 2010, 33(1): 69-76.
- [6] 王新静, 袁运斌, 谭冰峰, 等. 用 GPS 观测资料解算地球自转参数的方法及影响因素分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(10): 902-906.

- [7] Meindl, M., Dach, R., Thaller, D., *et al.* (2012) The impact of the Processing Batch Length in GNSS Data Analysis on the Estimates of Earth Rotation Parameters with Daily and Sub-Daily Time Resolution. *EGU General Assembly*, **14**, 8026.
- [8] 魏二虎, 刘学习, 孙浪浪, 等. 测站数目和观测弧段对 GPS 解算地球自转参数的影响分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(2): 187-191.
- [9] 魏二虎, 李广文, 畅柳, 等. 利用 GPS 观测数据研究高频地球自转参数[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(7): 818-821.
- [10] Wei, E.H., Jin, S.G., Wan, L.H., *et al.* (2015) High Frequency Variations of Earth Rotation Parameters from GPS and GLONASS Observations. *Sensors*, **15**, 2944-2963. <https://doi.org/10.3390/s150202944>
- [11] 徐天河, 王潜心, 于素梅, 等. 利用区域 GPS/BDS 数据确定地球自转参数[J]. 导航定位学报, 2015, 3(3): 13-17.
- [12] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.
- [13] 李征航, 魏二虎, 王正涛, 等. 空间大地测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.
- [14] 占伟, 武艳强, 章力博, 等. 陆态网络 GNSS 连续站分区分解算方案的对比分析[J]. 地震, 2014(4): 136-142.
- [15] Dach, R., Lutz, S., Walser, P., *et al.* (2011) Bernese GNSS Software Version 5.2. Astronomical Institute, University of Bern, Bern.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-549X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: gst@hanspub.org