

超大观测网络及多 GNSS 系统的快速数据处理

陈俊平¹ 张益泽^{1,2} 谢益炳^{1,2} 周旭华¹

1 中国科学院上海天文台,上海,200030

2 同济大学测绘与地理信息学院,上海,200092

摘要:采用 IGS 全球约 110 个多模观测站 4 周的观测数据,在不同采样间隔下进行精密定轨数据处理。分析了不同采样间隔下产品的精度以及数据处理的耗时情况。大量计算结果表明:①随着数据采样间隔的增加,数据处理时间呈线性减少的趋势。本文表明,采用 15 min 采样间隔比 5 min 采样间隔计算效率最多可以提高 50% 以上。②数据采样间隔的变化对轨道、钟差、ERP 参数、参考框架等解算参数的影响很小。当采样间隔为 5~10 min 时,基本上没有影响。为分析不同采样间隔产品对用户定位的影响,采用了全球 22 个测站 4 周的数据进行 PPP 静态定位,并且采用 GRACE 卫星 1 周的数据进行运动学精密定轨。采用不同轨道、钟差的静态结果表明,不同产品对水平方向精度的影响小于 2 mm,高程方向精度的影响小于 6 mm。GRACE 卫星动态定位结果表明,不同产品对各个方向精度的影响小于 1.5 cm,三维位置的影响小于 2 cm。本文结论对于当前测站个数 > 250 的非差数据处理有参考意义。

关键词:GNSS; SHA; 分析中心; 采样间隔; 效率

中图法分类号:P228.41

文献标志码:A

至 2011-08,IGS 观测网络已有 380 个测站,其中 150 个为 GPS/GLONASS 双模站^[1]。我国也建成了由 260 个 GNSS 连续观测基准站、2 000 多个区域站构成的陆态网络。测站数的增多,能够大大增加卫星可见的个数,从而提高卫星轨道、钟差、ERP 等的精度。此外,多模观测的引入以及测站统一参与解算,有助于参考框架的统一与精化。然而,测站数的增加以及多卫星系统的加入,使得解算的参数更多、耗时更长。

目前解决这个问题的方案有两种:采用双差,从而法方程不含钟差参数并且模糊度的个数也大大减少^[1];采用非差,在每个历元消去钟差参数以及不再有效的分段参数^[2]。采用双差的方法无法解算钟差参数,钟差参数的求取需要重新采用非差的方法获取^[3]。而采用非差消参数的方法,随着测站个数的增多以及 GLONASS 等系统的引入,解算的耗时会不断增加。取数据采样间隔为 5 min,100 个站 GPS 数据处理一次迭代只需约 2 min,整个数据处理只需要 20 min 左右;而 300 个站 GPS 数据处理一次迭代需要 40 min 以上,整个数据处理则需要 10 h 以上;对于多系统综合数

据处理,100 站的 GPS/GLONASS 综合数据处理一次迭代的时间约为 10 min 左右,约为 GPS 单系统数据处理的 5 倍。采用非差消参数的解算方法,数据处理的耗时主要在消参数的过程。由于需要在每个历元进行参数消去,这涉及到较大矩阵的求逆以及大矩阵的相乘。测站个数的增多以及多系统的加入,在每个历元需要消去的参数也将大大增加,并且整体矩阵的维数也大大增加,从而数据处理的耗时也快速增加。

消参数的过程需要在每个历元进行,因此解算的耗时与历元个数呈线性关系,历元个数的减少能够有效减少数据处理的时间。对于卫星轨道根数、测站坐标、地球自转参数、系统偏差等参数而言,由于其定义为单天常数,受历元个数的影响相对较少。而对于钟差、对流层延迟等参数,历元个数的减少可能会影响参数的解算。为实现解算效率以及产品精度的最优组合,本文分析了不同采样间隔下超大 GNSS 观测网络数据处理的产品精度以及耗时,为超大网络以及多 GNSS 系统的快速数据处理提供参考。

收稿日期:2013-03-07

项目来源:中科院百人计划资助项目;国家 863 计划资助项目(2013AA122402);国家自然科学基金资助项目(11273046, 40974018, 41174024);上海市科委资助项目(12DZ2273300, 13PJ1409900)。

第一作者:陈俊平,研究员,博士,博士生导师,主要从事卫星大地测量和地球动力学研究。E-mail:junping@shao.ac.cn

1 采用的数据以及计算策略

上海天文台于近年发展了高精度测地分析系统 iGPOS (integrated geodetic platform of SHAO), 建立了 GNSS 全球数据分析中心 (SHA)^[4]。iGPOS 基于传统的最小二乘估计, 采用非差的解算方式, 所采用的物理改正模型是基于最新的 IERS 规范^[5], 估计的参数包括卫星轨道根数 (每颗卫星每天 15 个参数)、测站坐标 (每个站每天 3 个参数)、地球自转参数 (每天 3 个参数)、钟差参数 (每颗卫星、每个测站、每个历元 1 个参数)、对流层参数 (每个测站每 h 1 个 ZTD 参数, 每个测站每天 2 个梯度参数) 以及模糊度等参数。在得到以上精密产品之后, 采用钟差加密的算法^[6], 将精密钟差加密到 30 s。SHA 提供的产品精度与 IGS 各个分析中心产品精度相当: 与 IGS 及其分析中心相比, SHA 的 GPS 轨道精度为 1.5 cm, GLONASS 轨道精度为 3.2 cm; GPS 钟差精度为 40 ps, GLONASS 钟差精度为 100 ps^[4]。为分析采样间隔对数据处理时间以及产品精度的影响, 选取了 IGS 全球约 110 个 GPS/GLONASS 站从星期周 1 686 到 1 689 的数据进行处理。数据处理的模式以及参数设置与 SHA 分析中心 GPS/GLONASS 综合数据处理一致。

为分析采样间隔对数据处理的耗时以及产品精度的影响, 数据处理中的采样间隔设为 300 s (5

min)、360 s (6 min)、420 s (7 min)、... 直到 900 s (15 min)。采用不同采样间隔的数据, 分析其对产品的影响, 包括轨道 (采样率 15 min)、钟差 (采样率 30 s)、地球自转参数以及参考框架等, 并分析不同采样间隔下得到的产品对用户 PPP 定位以及低轨卫星运动学定轨的影响。

2 不同采样间隔下的产品精度

2.1 数据处理耗时

数据处理的效率是分析中心数据处理能力的重要因素。图 1 列出了针对以上 4 周 GPS 数据在不同采样间隔下的单天数据处理的平均耗时情况。数据处理基于普通台式机 (CPU: Intel Core i7-2600, 3.4 GHz; RAM: 8×2.0 G=16.0 G)。可以看到, 随着采样间隔的增大 (从 5 min 增加到 15 min), 数据处理耗时几乎呈线性减少的模式。比较采样间隔为 5 min 以及 15 min 在不同测站个数单天数据处理的耗时可以看到, GPS+GLONASS 综合数据处理耗时从 114 min 减少到 55 min, 减少了 52%。此外, 对上海天文台陆态网络分析中心^[7]日常处理 270 个测站耗时的计算表明, 采样间隔为 5 min 的耗时为 727 min (>12 h), 而采样间隔为 15 min 的耗时减少到 475 min (<8 h), 减少了 1/3 以上。由以上结果可以看出, 适当增大采样间隔能够极大地提高数据处理的效率。

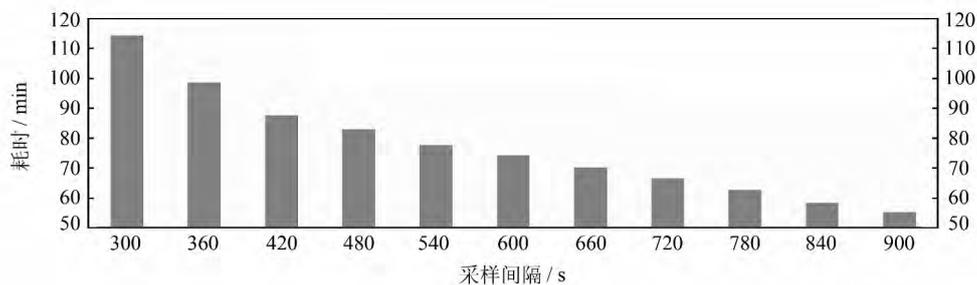


图 1 不同采样间隔下 GPS+GLONASS 数据处理耗时情况

Fig. 1 Mean Processing Time Using Data of Different Sampling of GPS+GLONASS Solution

2.2 产品精度

对于精密数据处理来说, 产品精度是最为关键的因素之一。特别是对于非差的 PPP 用户定位, 由于卫星轨道、卫星钟差等参数需要进行固定, 因此这些产品的精度将直接决定用户定位的水平。测站坐标是国际参考框架 ITRF 定义的重要手段。数据处理采样间隔的改变, 也可能影响以上产品的精度。

2.2.1 轨道和钟差

图 2 列出了不同采样间隔情况下 GPS 轨道与 IGS 最终精密轨道以及精密卫星钟差比较的统计情况。总体说来, 采用不同采样间隔数据对轨道、钟差的影响不大, 最差的轨道精度仍然优于 2 cm, 最差的钟差精度优于 0.085 ns (2.6 cm)。在采样间隔为 5~10 min 时, 轨道精度基本不变, 优于 1.4 cm, 钟差精度优于 0.06 ns (1.8 cm)。当采样间隔大于 10 min 时, 轨道、钟差精度逐渐变差。

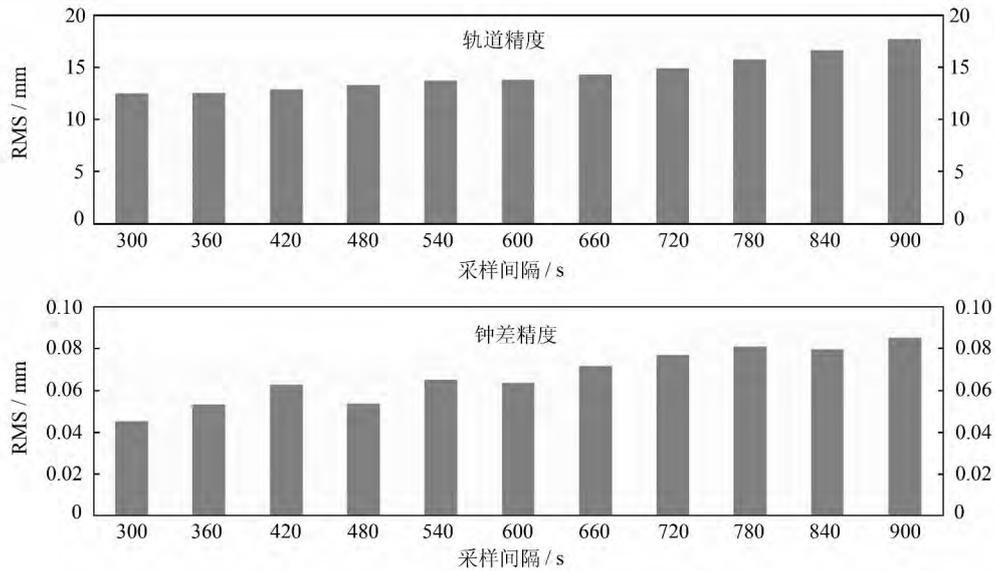


图 2 不同采样间隔下 GPS 产品精度情况

Fig. 2 Mean Precision of Orbits and Clocks Using Data of Different Sampling, Comparing to the IGS Final Orbits

2.2.2 参考框架

将不同采样间隔下的卫星轨道与 IGS 最终轨道作 Helmert 相似变换, 求取转换参数, 此参数反映了参考框架之间的转换。对不同轨道作转换求得的尺度、旋转、平移等参数的比较显示, 不同采样间隔下, 尺度因子的变化幅度小于 0.01 ppb, 平移参数的变化小于 0.4 mm, 这些变化的幅度都呈随机变化的方式, 且幅度远小于其精度范围。旋转参数随采样间隔变化的情况如图 3 所示, Y 、 Z 方向的变化比较随机, 而 X 方向则存在随采样间隔增大而逐渐增大的趋势, 这一结果可能与数据处理所采用的观测网络有关。数据处理用到的观测网络中, 靠近 Y 轴(经度 90°)附近的测站个数偏少, 而区域内测站的个数会影响该地区参数的解算。根据投影关系, 坐标受采样间隔变化的影响将主要反映在 X 轴方向。此外, 将精密定轨中得到的测站坐标进行比较也得到了相同的结论。

此外, 对大气参数、地球自转参数等的比较也发现, 其受数据采样间隔的影响很小。

3 不同采样间隔下产品的应用情况

为进一步验证采样间隔对产品的影响情况, 将以上不同采样间隔数据得到的产品(以下分别简称为 5 min-Prod, 6 min-Prod, ..., 15 min-Prod)应用到静态以及动态 PPP 中。其中静态 PPP 实验中采用了精密定轨定位中没有采用的 22 个 IGS 测站从星期 1 686 到 1 689 共 28 d 的数

据; 动态 PPP 采用了 GRACE-A、GRACE-B 卫星 2010 年年积日第 94~100 d 的数据。

3.1 静态 PPP

为反映不同软件之间的系统差, PPP 计算采用了 BERNESE 5.0 软件^[1], 采样率为 30 s, 每天数据长度为 24 h。首先求取每个测站 PPP 单天解, 之后以每 7 d 为一组求取坐标重复率。由于采用了 4 周的数据, 每个测站有 4 个重复率值。图 4 列出了基于不同采样间隔数据得到的 GPS 轨道、钟差计算的所有测站坐标重复率的中值。可以看到, 采用以上不同轨道、钟差产品对于测站定位的影响, 在 GPS 定位精度范围内, 水平方向小于 2 mm, 高程方向小于 6 mm。

3.2 低轨卫星运动学精密定轨

动态定位中轨道、钟差的误差能够直接在接收机动态位置中得到反映。采用以上基于不同采样间隔数据得到的 GPS 精密轨道以及钟差, 利用上海天文台研制的低轨卫星运动学精密定轨软件^[8], 对 GRACE-A 以及 GRACE-B 卫星 2010 年年积日第 94~100 d 的数据进行了动态 PPP 定位计算。将两颗卫星采用以上不同轨道、钟差产品得到的 PPP 动态位置与 JPL 公布的精密轨道 PSO 进行比较, 图 5 统计了差值的 RMS 情况。由图可以看出, 采用不同轨道、钟差对动态 PPP 定位的影响小于 2 cm, 量级本身在动态 PPP 的精度范围内。

进一步分析卫星运动学轨道的影响, 将基于 5 min-Prod 以及 15 min-Prod 的 GRACE-A 卫星动态 PPP 轨道与 JPL 公布的精密轨道 PSO 进行

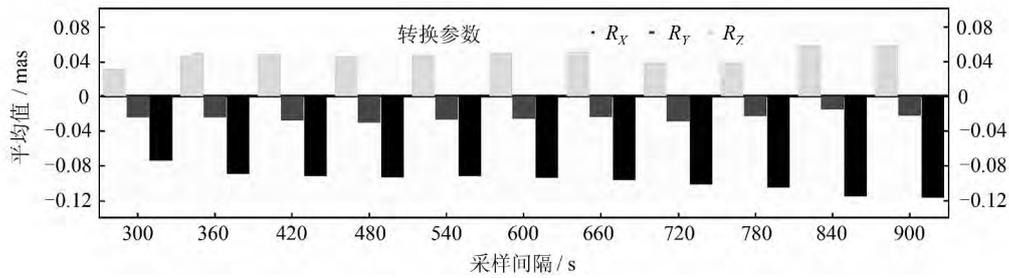


图3 不同采样间隔下参考框架转换参数的变化情况

Fig. 3 Mean Rotation Parameters of Helmert Transformation Between GPS Orbits Under Different Data Sampling and the IGS Final Orbits

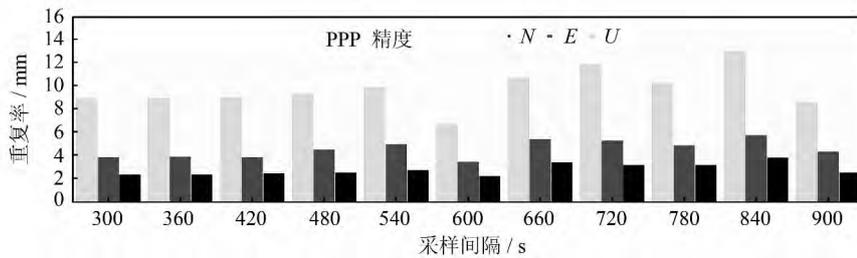


图4 不同采样间隔数据求得的轨道、钟差产品对测站 PPP 精度的影响

Fig. 4 Median Precision of Static PPP of 22 Stations, Using Different GPS Orbits/Clocks

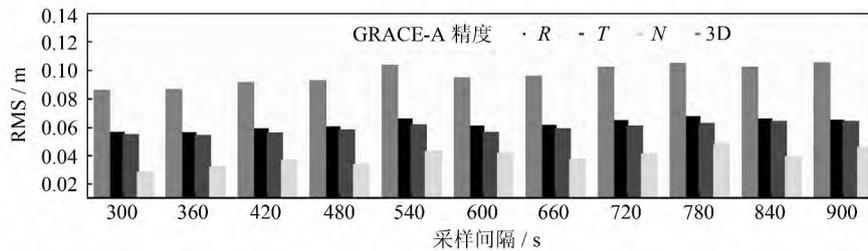


图5 不同采样间隔数据求得的 GPS 轨道、钟差产品对 LEO 动态 PPP 精度的影响

Fig. 5 Kinematic Orbit Precision of GRACE-A Using Different GPS Orbits/Clocks

比较。统计表明,采用以上两种不同 GPS 轨道、钟差,LEO 轨道在 R 、 T 、 N 方向变化的均值为 0.1 cm、0.2 cm、0.5 cm,两种轨道差值的 RMS 为 3.4 cm、3.6 cm、3.6 cm。这也表明,以上得到的不同 GPS 产品对动态定位精度的影响在 GPS 动态定位的精度范围内。

4 结 语

本文针对超大网络多 GNSS 系统数据进行非差数据处理存在的耗时长、效率低的问题,讨论了观测数据采样间隔对数据处理效率以及产品精度的影响。利用上海天文台高精度测地分析系统,采用 1 686 到 1 689 四个星期 IGS 全球 GNSS 网络的观测数据,进行了大量的计算与分析。结果表明:① 随着数据采样间隔的增加,数据处理时间呈线性减少的趋势,并且处理测站个数、卫星

系统越多,该趋势越加显著,采用 15 min 采样间隔比 5 min 采样间隔计算效率最多可以提高 50%以上。② 数据采样间隔的变化对轨道、钟差、ERP 参数、参考框架等解算参数的影响很小,当采样间隔为 5~10 min 时,基本没有影响。③ 不同采样间隔数据得到的产品(包括轨道、钟差、ERP 等)对用户精密定轨定位不产生影响。本文的结论对于当前测站个数 > 250 的非差数据处理有参考意义,在无法提高计算机性能的前提下,可以适当考虑增加数据采样间隔。

参 考 文 献

- [1] Dach R, Hugentobler U, Fridez P, et al. Bernese GPS Software Version 5.0[M]. Bern: Astronomical Institute, University of Bern, 2007
- [2] Ge M, Gendt G, Dick G, et al. A New Data Processing Strategy for Huge GNSS Global Networks

- [J]. *J Geod*, 2006, 80:199-203
- [3] Bock H, Dach R, Jaggi A, et al. High-rate GPS Clock Corrections from CODE: Support of 1 Hz Applications[J]. *J Geod*, 2009, 83: 1 083-1 094
- [4] Chen J, Wu B, Hu X, et al. SHA: the GNSS Analysis Center at SHAO[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, 160: 213-221
- [5] McCarthy D, Petit G. IERS Conventions[R]. IERS Technical Note 32. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2003
- [6] Chen J, Zhang Y, Zhou X, et al. GNSS Clock Corrections Densification at SHAO: from 5 min to 30 s [J]. *Science China: Physics, Mechanics & Astronomy*(Accepted)
- [7] Chen J, Wu Bin, Hu X, et al. Shanghai Astronomical Observatory CMONOC Data Analysis Center [C]. The Third China Satellite Navigation Academic Conference, 2012(陈俊平, 吴斌, 胡小工, 等. 上海天文台陆态网络数据分析中心[C]. 第三届中国卫星导航学术年会, 2012)
- [8] Peng Dongju, Wu Bin. Kinematic Precise Orbit Determination of LEO Satellite Using Space-borne Dual-frequency GPS Measurements[J]. *Journal of astronomy*, 2012, 52(6): 495-509(彭冬菊, 吴斌. 基于双频星载 GPS 数据的 LEO 卫星运动学定轨研究[J]. 天文学报, 2011, 52(6): 495-509)

Rapid Data Processing of Huge Networks and Multi-GNSS Constellation

CHEN Junping¹ ZHANG Yize^{1,2} XIE Yibing^{1,2} ZHOU Xuhua¹

¹ Shanghai Astronomical Observatory, Shanghai 200030, China

² College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: In the first part of the paper we discuss the challenges of huge networks and multi-GNSS data processing for the zero-difference(ZD) strategy. Using 4 weeks' of data from global IGS GPS/GLONASS stations, we performed daily data processing with data sampling ranging from 5-15 min. A comparison of the processing time and product precision under different sampling data shows: ① Computation efficiency is greatly improved by increasing data sampling; our results show the improvement of maximum 52%; ② Difference of product precision was marginally observed, and product precision is almost the same when the sampling rate was changed from 5-10 min. To analyze the impact of different products on positioning applications, we performed PPP for 22 globally distributed IGS stations and kinematic precise orbit determination for GRACE satellites using products generated from different data sampling procedures. Results show: ① Static PPP precision differs by less than 2 mm and 6 mm for the horizontal and height components, respectively; ② kinematic PPP precision differs by less than 1.5 cm for each coordinate component and less than 2 cm in three-dimensions.

Key words: GNSS; SHA; analysis center; data sampling; efficiency

First author: CHEN Junping, professor, PhD, PhD supervisor, specializes in satellite geodesy and geodynamics. E-mail: junping@shao.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41174024, 11273046, 40974018; the 100 Talents Program of the Chinese Academy of Sciences; the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program), No. 2013AA122402; the Shanghai Committee of Science and Technology, No. 12DZ2273300, 13PJ1409900.