

GNSS 精密单点定位中的实时质量控制

张小红¹ 郭 斐¹ 李 盼¹ 左 翔¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:提出了一套适用于 GNSS 精密单点定位(PPP)的实时质量控制方法,重点研究了钟跳探测与修复、周跳探测与标记、抗差估计方法,并在现有质量控制方法的基础上进行了改进。对比分析了不同质量控制方案对 PPP 的影响,结果表明,钟跳不利于周跳探测,严重影响非差 PPP 的精度和效率,必须对其进行探测与修复;联合 MW、GF 组合可以探测出绝大多数周跳,且较使用单一方法更为准确、可靠;采用改进的抗差估计有效抑制了残余粗差对精密定位的影响,显著提高了 PPP 的精度和可靠性。

关键词:精密单点定位;质量控制;接收机钟跳;周跳;抗差估计

中图分类号:P228.41

质量控制是测量数据处理中的一个重要环节,质量控制的优劣直接影响到 GNSS 精密单点定位(PPP)的精度和可靠性,甚至影响用户使用 PPP 定位结果的可信度。因此,开展 PPP 中的质量控制研究对于推动 PPP 技术的发展和具有十分重要的意义。近年来,国内外许多学者针对 GNSS 测量中的粗差识别、周跳探测、模糊度解算、抗差估计等方面进行了广泛、深入的研究,并取得了丰富的成果^[1-10],但仍存在一些尚需解决的问题,如对接收机钟跳的影响考虑不周;周跳探测模拟居多,缺乏实际数据验证;质量控制过程单一,缺乏稳健的整体控制;对 PPP 数据处理中的质量控制研究更是少见。为此,本文提出了一套适用于 PPP 的实时质量控制体系,深入研究了 PPP 质量控制的过程、方法和效果。

1 PPP 质量控制内涵

PPP 中的质量控制是指为了满足较高的定位精度需求、确保定位服务的可用性、连续性和完好性,充分利用 GNSS 单站和星间可用信息,设计相关算法和操作,对 GNSS 数据资源、定位算法、产品和服务实施持续监控、探测、诊断和改进的过程。完整的 PPP 质量控制涉及 PPP 处理的整个过程和多个方面,具体包括数据/产品质量分

析、数据预处理、函数模型与随机模型精化、误差改正与消除、参数估计与检验。整个 PPP 质量控制体系结构及控制流程如图 1 所示。

1) 数据/产品质量分析旨在对原始观测数据和产品进行初步的质量分析,主要包括原始观测文件的一般性检查,如文件格式、观测值类型、天线类型及天线高等的检查;数据完好性检查,如数据丢失率、粗差剔除率;观测数据质量分析,如信噪比、电离层闪烁、多路径效应等;卫星轨道与钟差产品可用性分析,如产品类型、精度指标、卫星工作状况、健康状态等。

2) 数据预处理是 PPP 质量控制中的关键环节,旨在为后续高精度导航定位算法提供干净的原始数据。与事后 PPP 相比,实时 PPP 中的可用信息较少,且处理过程不可逆,质量控制更为复杂,主要包括粗差识别与定位、钟跳探测与修复、周跳探测与标记等。

3) 误差改正与消除包括采用模型改正或使用高精度的产品,同时顾及其精度信息。

4) 函数模型与随机模型精化主要包括函数模型自适应、随机模型自适应、模型偏差估计与识别、模型误差的补偿等。

5) 参数估计与假设检验包括抗差估计、验后残差分布、方差估计、参数显著性检验等。

收稿日期:2012-06-15。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41074024);国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(41021061)。

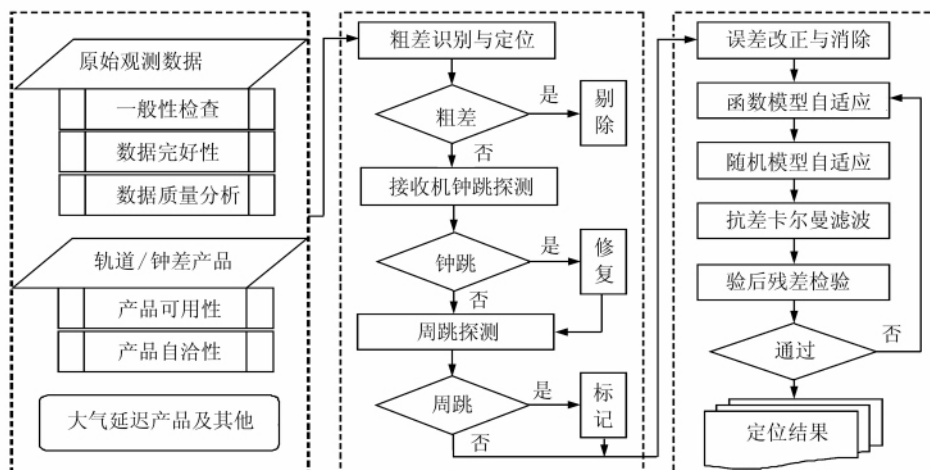


图 1 GNSS 精密单点定位实时质量控制体系结构

Fig. 1 Structure of GNSS Quality Control System

2 PPP 实时质量控制方法

2.1 实时钟跳探测与修复

钟跳将导致所有观测到的卫星、所有频率上的伪距或相位观测值产生类似周跳的数据阶跃，但它与周跳有本质的区别。由钟跳引起的观测值阶跃大致分为两类：伪距阶跃、相位连续；伪距和相位同时发生阶跃。钟跳对周跳探测、精密定位极为不利，对于第一类阶跃，MW (Melbourne-Wübbena) 组合法容易将其误探为周跳，导致所有卫星的模糊度重新初始化；GF (Geometry-Free) 组合法虽然不会将其误判为周跳，但错误的模糊度先验信息将影响位置等参数的估计。对于第二类阶跃，钟跳引起的系统性偏差将被接收机钟差完全吸收，不会影响定位解算。因此，针对第一类钟跳，必须进行探测与修复。

钟跳探测与修复可从观测值域或参数域进行，但基于观测值域的钟跳探测与修复更有利于实时数据的质量控制。因此，本文采用观测值历元差分法进行实时钟跳探测与修复。令

$$\begin{cases} \Delta P(i) = P(i) - P(i-1) \\ \Delta L(i) = L(i) - L(i-1) \end{cases} \quad (1)$$

构造检验量 S 及其条件式：

$$\begin{cases} S^j(i) = \Delta P^j(i) - \Delta L^j(i) \\ |S^j(i)| > k_1 \approx 0.001 \cdot C \end{cases} \quad (2)$$

式中，上标 j 代表卫星； i 代表历元； P 为伪距观测值； L 为相位观测值； k_1 为阈值； C 为光速。对于某一历元，当且仅当所有可用卫星满足式(2)时，认为该历元时刻可能存在钟跳或所有卫星同时发生大周跳，此时利用式(3)计算钟跳候选值 m ，并

根据式(4)确定实际钟跳值 J_s (ms)：

$$m = \alpha \cdot \left(\sum_{j=1}^n S^j \right) / (n \cdot C) \quad (3)$$

$$J_s = \begin{cases} \text{int}(m), & |m - \text{int}(m)| \leq k_2 \\ 0, & |m - \text{int}(m)| > k_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中， α 为系数因子， $\alpha = 10^3$ ； k_2 为阈值， $k_2 = 10^{-5} \sim 10^{-7}$ 。

钟跳修复时，采用反向修复法，即当发生第一类钟跳时，将连续的相位观测值调整成阶跃形式，同伪距基准保持一致。这种方法不仅有利于保持伪距和相位基准的一致性，同时还未破坏模糊度参数的连续性，有利于后续精密定位的精度和效率。其修复公式为：

$$\tilde{L}^j(i) = L^j(i) + \dot{\rho} \cdot J_s / \alpha + J_s \cdot C / \alpha \quad (5)$$

式中， $\tilde{L}^j(i)$ 为修复后的相位观测值； $\dot{\rho}$ 为卫地距变化率。

2.2 实时周跳探测与标记

对于单站 PPP，尤其是采样率较低、机动性较复杂的观测数据，受残余误差和观测噪声的影响，周跳修复的可靠性难以保证，而错误的修复又会对参数估计造成不利影响，因此，仅对周跳进行探测和标记，不作修复。联合 MW 组合和 GF 组合几乎可以探测出所有周跳，其检验量 T_{WL} 和 T_{GF} 分别为：

$$T_{WL} = (L_{WL} - P_{NL}) / \lambda_{WL} \quad (6)$$

$$T_{GF} = L_4 = L_1 - L_2 \quad (7)$$

式中， L_{WL} 为宽巷相位值； P_{NL} 为窄巷伪距值； λ_{WL} 为宽巷相位波长。然而，MW 组合法对低高度角卫星的探测效果不佳；GF 组合受采样率的影响，其阈值选取不统一。为了充分利用所有卫星（包括低高度角）的观测数据，笔者针对不同采样率、不同高度角的实际数据进行了大量测试后，提出

采用以下经验阈值模型：

$$\begin{aligned} R_{WL}(E,R) &= \begin{cases} (-0.2E+4) \cdot b_{WL}, E < 15^\circ \\ b_{WL}, E \geq 15^\circ \end{cases} \\ b_{WL}(R) &= \begin{cases} 1.0c, 0 < R \leq 1\text{ s} \\ 1.5c, 1 < R \leq 15\text{ s} \\ 2.0c, 15 < R \leq 30\text{ s} \end{cases} \quad (8) \\ R_{GF}(E,R) &= \begin{cases} (-0.4E+7) \cdot b_{GF}, E < 15^\circ \\ b_{GF}, E \geq 15^\circ \end{cases} \\ b_{GF}(R) &= \begin{cases} 0.05\text{ m}, 0 < R \leq 1\text{ s} \\ 0.10\text{ m}, 1 < R \leq 15\text{ s} \\ 0.15\text{ m}, 15 < R \leq 30\text{ s} \end{cases} \quad (9) \end{aligned}$$

式中, R_{WL} (周)、 R_{GF} (m) 分别为 MW 组合、GF 组合周跳检验量的阈值; E 、 R 分别为卫星高度角和采样间隔。上述阈值设置相对宽松, 是从保持数据连续性、减少不必要的重新初始化角度考虑的; 未探测到的小周跳通过后续的迭代抗差估计可实现进一步的质量控制。

2.3 改进的抗差估计

经过数据预处理阶段的质量控制后, 仍不排除部分小周跳或粗差混入正常观测值中, 影响 PPP 的定位结果。为抵制异常误差的影响, 测量工作者提出了许多行之有效的方法, 如丹麦法、IGGⅢ方案、抗差贝叶斯估计等^[7,8]。本文采用改进的迭代抗差估计实时地调节最大残差 v_i 对应的观测量 l_i 的权 p_i , 等价权函数参考 IGGⅢ方案, 可表示为：

$$\bar{p}_i = \begin{cases} p_i, |\bar{v}_i| \leq k_0 \\ p_i \frac{k_0}{|\bar{v}_i|} \left(\frac{k_1 - |\bar{v}_i|}{k_1 - k_0} \right)^2, k_0 < |\bar{v}_i| \leq k_1 \\ 0, |\bar{v}_i| > k_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中, \bar{v}_i 为标准化残差; $k_0 = 1.5$; $k_1 = 3.0$ 。与 IGGⅢ方案有所不同, 本文采用的方案是每次迭代仅对当前验后残差最大的观测量使用等价权, 降低其对参数估计的贡献, 避免因设计矩阵的影响, 部分(或单一)粗差被分配到其他正常观测值中, 导致其验后残差偏大, 甚至接近粗差本身的残差, 从而降低正常观测值的权阵, 影响 PPP 定位解的精度和可靠性。在实际数据处理过程中, 考虑到实时质量控制的效率, 为防止滤波发散, 迭代次数一般选取 3~5。

3 质量控制对 PPP 的影响

3.1 实验方案设计与数据描述

为了评价上述质量控制体系对 PPP 的效果,

设计了如表 1 所示的 4 种实验方案。方案①旨在考察钟跳对周跳探测和 PPP 解算的影响, 采用的数据为 2011 年年积日(DOY)为 100 当天所有可用 IGS 跟踪站共 384 个测站的 GNSS 观测数据, 数据采样间隔为 30 s。方案②~④旨在通过分析残余周跳、残余粗差对 PPP 定位的影响, 进而为采取更为严密和完整的质量控制措施、提高 PPP 定位的精度及可靠性提供必要的依据, 其中静态 PPP 采用的数据为随机抽取的 50 个 IGS 跟踪站 30 s 采样间隔的 GNSS 数据。所有实验方案均是基于武汉大学研制的 TriP V2.0 软件, 并加入上述质量控制过程。

表 1 4 种方案对应的质量控制策略
Tab. 1 Four Schemes with Different Quality Control Procedures

方案	钟跳修复	GF 组合	MW 组合	抗差估计
①	×	✓	✓	✓
②	✓	✓	×	×
③	✓	✓	✓	×
④	✓	✓	✓	✓

3.2 实验结果与分析

3.2.1 钟跳探测与修复实验

方案①共发现 15 个测站包含 4 种不同类型的接收机产生了不同程度的钟跳(仅顾及第一类阶跃情形)。表 2 统计了这 15 个测站的钟跳情况。

表 2 钟跳探测结果统计
Tab. 2 Summarize of Clock Jump Detection

测站名	接收机类型	钟跳频次	测站名	接收机类型	钟跳频次
BIS2	SEPT POLARX2	3	MIKL	TRIMBLE 4700	23
JASK	SEPT POLARX2	77	POLV	TRIMBLE 4700	23
JOGJ*	SEPT POLARX2	6	SULP	TRIMBLE 4700	21
MARN	SEPT POLARX2	41	INEG	TRIMBLE 5700	23
UNSA	SEPT POLARX2	4	SMST	TRIMBLE 5700	7
ZWE2	SEPT POLARX2	3	ISTA	ASHTECH Z-XII3	13
GENO	TRIMBLE 4000SSI	23	METS*	ASHTECH Z-XII3	4
CAGL	TRIMBLE 4700	23			

注: * 表示 JOGJ、METS 的数据时长分别为 8 h、5 h。

钟跳引起伪距观测值不连续, 若不进行修复, 使用 MW、GF 组合法易将其误探为周跳。封三彩图 1 为 GENO 站 G22 卫星某一弧段内观测值及周跳探测标记时序。图中主纵轴对应 P_1 、 P_2 、 L_1 、 L_2 观测值, 辅纵轴对应周跳标记 CS (数值“1”代表周跳)。由封三彩图 1 可知, 钟跳修复前, 所有钟跳时刻均被标记为周跳; 而钟跳修复后, 能够有效地将其与周跳区分。封三彩图 2 为 GENO 站钟跳修复前后对应的动态 PPP 定位误差时序图。可以看出, 钟跳未修复时, 其动态

PPP 反复多次进行重收敛,定位精度较低,究其原因,正是由于频繁的钟跳现象(平均每 1 h 发生一次)被误认为周跳,导致所有卫星的模糊度参数重新初始化。钟跳修复后,保证了数据处理的连续性,避免了不必要的重初始化,定位结果得到显著改善,收敛后,北、东、高方向的定位精度均达到 cm 级。其他发生钟跳的测站均有类似的结果,限于篇幅,本文不再罗列。因此,在精密单点定位过程中,必须在数据预处理阶段进行钟跳修复。

3.2.2 基于方案②~④的 PPP 实验

钟跳修复后,依次采用方案②~④对 50 个 IGS 跟踪站 30 s 采样间隔的观测数据进行静态 PPP 解算。由于 GF 组合已经具有较强的周跳探测能力,利用其能探测出绝大多数的周跳,且大部分测站的观测数据质量较好,因此,利用这三种不同的质量控制方案,对于大多数测站的静态 PPP 解差异很小。但是,也有 10 个测站因质量控制的严密程度不同,造成定位结果存在较大差异。表 3 给出了这 10 个测站在不同质量控制方案下对应的三维位置精度(外符合精度)及改善程度。比较表 3 中方案②和方案③的精度发现,OHI3 和 VILL 站的定位精度由 6~8 cm 显著提高至 mm 级,改善程度达到 90% 左右,说明这两个测站的数据中存在一些 GF 组合不敏感的周跳,导致其周跳探测不够准确,影响了最终的定位结果。联合 MW 组合后,提高了周跳探测的能力和可靠性。相比于方案③,方案④由于采用了更为严密的质量控制,有效抑制了数据预处理阶段未被正确处理的周跳或误差的影响,定位结果更加准确、可靠。除精度已经达到 mm 级的 OHI3 站外,几乎所有的测站均有不同程度的改善,改善后的三维定位精度基本上在 1~2 cm,平均改善程度达到 49.8%,这也说明基于最大验后残差的迭代抗

差估计有效削弱了残余误差的影响,保证了 PPP 解的精度和可靠性。动态 PPP 具有类似的结论,限于篇幅,本文不再单独罗列。

4 结 语

本文提出了一套适用于 GNSS 精密单点定位的实时质量控制方法。结果表明,联合使用多种质量控制手段,能够显著改善定位解的质量,提高精密单点定位的精度和可靠性。尽管采用本文提出的实时质量控制方法对大量的 IGS 事后数据进行 PPP 处理取得了较好的效果,但检验其实时性和有效性最好的方法还是利用实时数据流进行 PPP 解算;同时解算结果的质量检验和质量评价也是后续 PPP 质量控制体系中的重要环节,这些都有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Baarda W. A Testing Procedure for Use in Geodetic networks[J]. Geodesy, 1968, 2(5):1-97
- [2] Teunissen P J G. Quality Control in Navigation Systems[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1990, 5(7): 35-41
- [3] Blewitt G. An automatic Editing Algorithm for GPS Data[J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(3): 199-202
- [4] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise Point Positioning for Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 5 005-5 017
- [5] Kim D, Langley R B. Quality Control Techniques and Issues in GPS Applications: Stochastic Modeling and Reliability Test[C]. International Symposium on GPS/GNSS, Jeju Island, Korea, 2001
- [6] 李德仁. 误差处理和可靠性理论[M]. 北京: 测绘出版社, 1988
- [7] 杨元喜. 抗差估计理论及其应用[M]. 北京: 八一出版社, 1993
- [8] 陶本藻. 测量数据处理的统计理论和方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2007
- [9] 方荣新, 施闯, 魏娜, 等. GPS 数据质量控制中实时周跳探测研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(9): 1 094-1 097
- [10] 蔡华, 赵齐乐, 孙汉荣, 等. GNSS 实时数据质量控制[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(7): 1 094-1 097

第一作者简介: 张小红, 教授, 博士, 博士生导师, 现主要从事 GNSS 精密单点定位和 GNSS/INS 组合方面的科研和教学工作。
E-mail: xhzhang@sgg.whu.edu.cn

表 3 不同质量控制方案对应的静态 PPP 三维位置精度及改善效果

Tab. 3 Positioning Accuracy of Kinematic PPP with Different Quality Control Schemes

测站 名	3D 精度/m			改善程度/%	
	方案②	方案③	方案④	方案③-②	方案④-③
ADIS	0.053	0.053	0.028	-	47.2
DUM1	0.029	0.025	0.016	13.8	36.0
JPLM	0.029	0.030	0.024	-	20.0
KOUR	0.053	0.053	0.018	-	66.1
MATE	0.047	0.047	0.024	-	48.9
NANO	0.019	0.019	0.011	-	42.1
NICO	0.028	0.028	0.007	-	75.0
OHI3	0.059	0.007	0.008	88.1	-
VILL	0.084	0.008	0.003	90.5	62.5
ZECK	0.033	0.032	0.016	3.0	50.0

Real-time Quality Control Procedure for GNSS Precise Point Positioning

ZHANG Xiaohong¹ GUO Fei¹ LI Pan¹ ZUO Xiang¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: We discuss a real-time quality control (QC) procedure for precise point positioning (PPP) with emphasis given to the detection and repair of clock jump, cycle slip detection and robust estimation. Four schemes with different QC procedures are designed to test the effects on PPP. The results show that clock jump should be first compensated during the preprocessing phase since it may cause the cycle slip detection invalid and seriously affect the precision and efficiency of zero-difference PPP. The union of MW and GF combinations can detect the vast majority of cycle slips which is more accurate and reliable than any single one. With an improved robust estimation, gross errors and their impact on positioning are effectively suppressed, which led to significant improvements in the accuracy and reliability of PPP.

Key words: PPP; quality control; clock jump; cycle slip; robust estimation

About the first author: ZHANG Xiaohong, professor, Ph.D., Ph.D supervisor, majors in the research and education on GNSS precise point positioning and GNSS/INS combinations.

E-mail: xhzhang@sgg.whu.edu.cn

.....
(上接第 905 页)

Multi-resolution Representation of 3D Complex Building Model with Features Preservation

JIANG Shaobo^{1,3} YANG Bisheng^{1,3} SUN Xuan^{2,3}

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 Engineering Research Center for Spatio-Temporal Data Smart Acquisition and Application, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: We propose a method for multi-resolution representation of 3D complex building model with features preservation based on improved volumetric techniques. Firstly, the polygonal model of 3D complex building is converted into volumetric representation, and the voxels are stored in an octree. Then, various resolution cell models can be generated by clustering the octree cells with a basis on quadratic error metric. Finally, the multi-resolution isosurfaces are extracted and the features are reproduced using normals as expected LOD models. The experimental results show that the proposed method has the characteristics of less calculation and better ability of preserving main structure features of original building.

Key words: 3D complex building; octree; quadratic error; LOD models; feature preservation

About the first author: JIANG Shaobo, Ph. D candidate, majors in multi-resolution modelling and progressive transmission of spatial data.
E-mail: jiangshaobo_2006@163.com

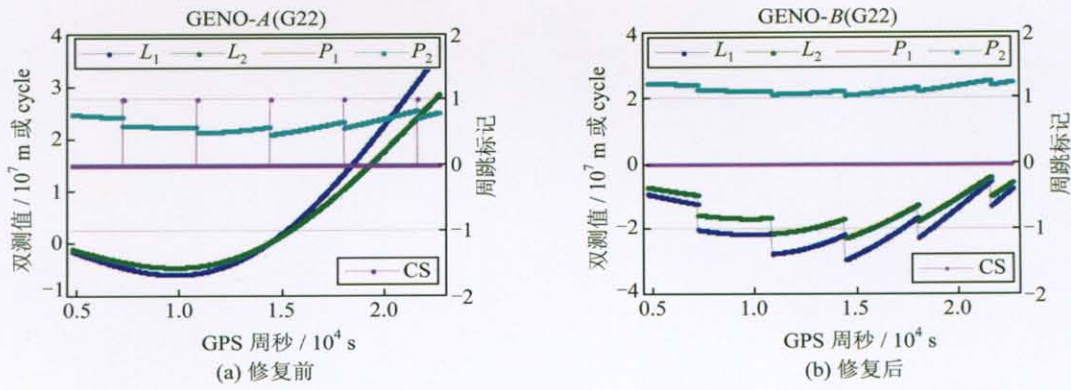


图 1 钟跳修复前后 G22 卫星观测值及周跳探测标记时序图

Fig. 1 Time Series of GPS Observations and Cycle Slip Flag with (-out) Clock Jump Repair

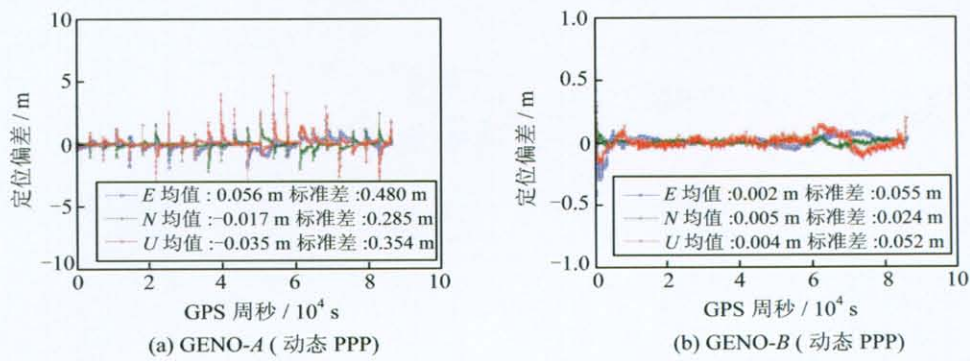


图 2 钟跳修复前后 GENO 站动态 PPP 定位精度时序图

Fig. 2 Bias of Kinematic PPP with (-out) Clock Jump Repair

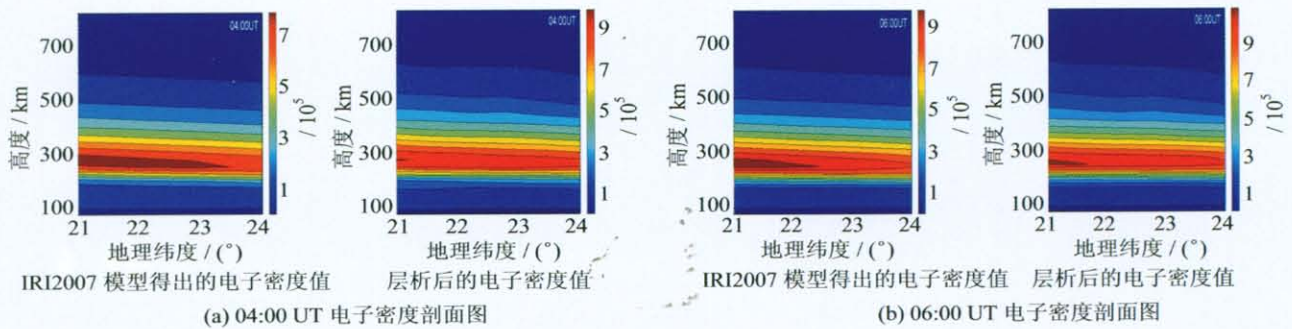


图 3 东经 114°子午面上 04:00 UT 和 06:00 UT 电子密度剖面图

Fig. 3 Electron Density Profile of Meridian Plane of Longitude 114° in 04:00 UT and 06:00 UT

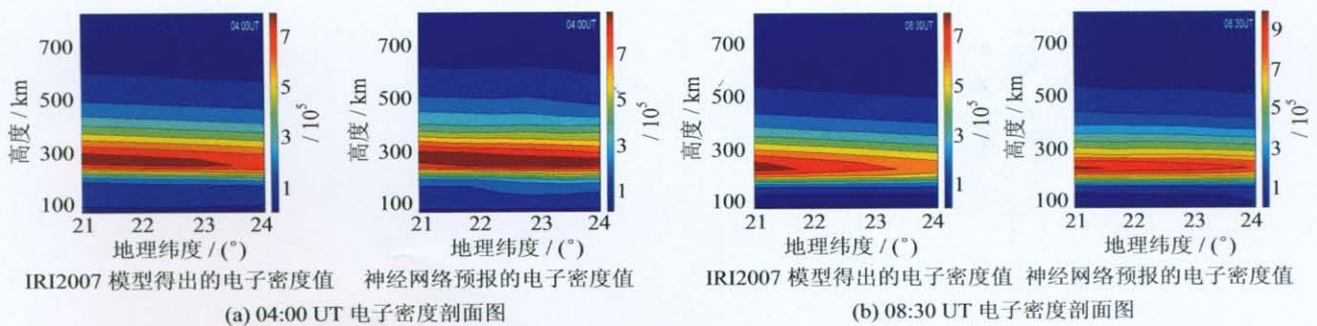


图 4 东经 114°子午面上 04:00 UT 和 08:30 UT 电子密度剖面图

Fig. 4 Electron Density Profile of Meridian Plane of Longitude 114° in 04:00 UT and 08:30 UT