

固定模糊度的精密单点定位几何定轨方法及结果分析

张小红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:传统的基于 PPP(precise point positioning)模式的定轨方法采用浮点解,导致其定轨精度及可靠性较双差固定解稍差。为了进一步提高 PPP 模式事后定轨的精度和可靠性,利用 2012 年 1 月 2~7 日全球 IGS 跟踪站数据计算出当天所有卫星的宽巷和窄巷 FCB 产品,实现了 GRACE 卫星固定 PPP 整数模糊度的精密定轨。并将定轨结果分别与 GFZ 事后精密轨道、K 波段测距结果进行比较,分析其内外符合精度。实验结果表明:与 GFZ 提供的事后精密轨道相比,GRACE-A 卫星单天轨道固定解的精度为 R 方向 2~3 cm, T 方向大部分优于 2 cm, N 方向优于 2 cm,较之浮点解的定轨结果 3 个方向分别改善了约 19%、30%、50%;GRACE-B 卫星 3 个方向精度分别为 2~3 cm、2 cm 左右、1~2 cm,较之浮点解各方向也有同等程度的改善。与 K 波段测距结果相比,浮点解的 KBR 残差 STD 均值为 22.6 mm,固定解为 16.4 mm,比浮点解提高了约 28%。可见,PPP 模糊度固定解明显改善了解低轨卫星的定轨精度,能提供更为可靠的轨道服务。

关键词:精密单点定位;模糊度固定;低轨卫星;精密定轨;KBR

中图分类号:P228.41

近年来,GPS 技术以其高精度、全天候、实时、连续跟踪等优点,已成为低轨卫星精密定轨的主要技术手段。其中,PPP 模式的非差几何定轨法不但可以取得与简化动力学定轨法相当的定轨精度,而且因其具有数学模型简单,定轨精度与轨道高度无关,不受双差定轨法需要全球分布的地面基准站限制等特点,在低轨卫星精密定轨领域得到了广泛关注。许多学者对该方法进行了相关研究^[1-6]。研究表明,几何法定轨可以获得径向(R)、切向(T)、法向(N)优于 5 cm 的定轨精度。国际上一些著名的研究机构也研制了相应的定轨软件,如 JPL 的 GIPSY、GFZ 的 EPOS、武汉大学的 PANDA 和 TriP^[7]等。

由于不依赖于任何力学模型,几何法精密定轨信息可直接用来恢复地球重力场,具有重要的科学意义和研究价值。然而,基于该方法反演地球重力场,得到的重力场模型的质量在很大程度上

上依赖于几何轨道的精度。尽管传统 PPP 模式目前已能够取得 R 、 T 、 N 各方向 3~5 cm 的定轨精度,但是传统的 PPP 模型采用浮点解,导致其定轨精度和可靠性不及双差固定解,若能够准确地固定非差整周模糊度,则可进一步提高 PPP 模式定轨的精度和可靠性,从而改善重力场模型时空分辨率。文献[8]利用中国区域的 IGS 测站生成 FCB 产品,对经过中国区域上空的 GRACE 卫星 15 min 的观测数据进行了 PPP 固定解解算,明显提高了短时间内的定轨精度。但其无法实现 GRACE 卫星全天连续的固定解精密定轨。为此,本文采用全球 PPP 模糊度固定解的思路,利用 2012 年 1 月 2~7 日全球 IGS 跟踪的观测数据,通过估计各天所有 GPS 卫星的相位小数偏差,进而实现 GRACE-A、B 卫星单天固定 PPP 整数模糊度的事后精密定轨,并将固定解的定轨结果与 PPP 浮点解定轨结果进行比较分析。

收稿日期:2013-04-18。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41074024,41204030);国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(41021061);中央高校基本科研业务费专项资金资助(2012214020207);中央高校基本科研经费资助项目。

1 方法

1.1 观测方程

低轨卫星星载 GPS 接收机双频载波相位和伪距观测值的基本观测方程如下^[4]：

$$L_{LEO,i}^s = \rho_{LEO,i}^s + c\delta t_{LEO} - c\delta t^s + \delta\rho_{ion,i} + \delta\rho_{pco,i} + \delta\rho_{pcv,i} + \lambda_i \cdot N_{LEO,i}^s + \epsilon_{Li} \quad (1)$$

$$P_{LEO,i}^s = \rho_{LEO,i}^s + c\delta t_{LEO} - c\delta t^s - \delta\rho_{ion,i} + \delta\rho_{pco,i} + \delta\rho_{pcv,i} + \epsilon_{Pi} \quad (2)$$

式中,LEO 代表低轨卫星; s 代表 GPS 卫星; i 为观测频率; $L_{LEO,i}^s$ 为低轨卫星和 GPS 卫星 s 在频率 i 上的载波相位观测值; $P_{LEO,i}^s$ 为低轨卫星和 GPS 卫星 s 在频率 i 上的伪距观测值; $\rho_{LEO,i}^s$ 为低轨卫星和 GPS 卫星 s 间的几何距离; c 为真空中的光速; δt_{LEO} 为低轨卫星的钟差; δt^s 为 GPS 卫星 s 的钟差; $\delta\rho_{ion,i}$ 为频率 i 上的电离层延迟改正; $\delta\rho_{pco,i}$ 为天线相位中心偏差改正; $\delta\rho_{pcv,i}$ 为天线相位中心变化改正; λ_i 为频率 i 的载波波长; $N_{LEO,i}^s$ 为频率 i 上的载波相位整周模糊度; ϵ_{Li} 、 ϵ_{Pi} 分别为载波相位和伪距观测值噪声。由于低轨卫星轨道高度一般在 200 km 以上(GRACE 卫星的轨道高度约 485 km),而对流层在 40 km 以下,所以星载 GPS 观测数据不受对流层延迟的影响,也无需考虑固体潮汐的影响。故与地面观测数据的表达式不同,式(1)、式(2)中没有 $\delta\rho_{tro,i}$ 、 $\delta\rho_{tide,i}$ 等改正项。

1.2 PPP 模糊度固定方法

文献[9-11]先后对 PPP 模糊度固定进行了较为深入和系统的研究,并取得了丰富的成果。本文采用文献[11]中的模糊度固定方法。

1.3 数据处理策略

GPS 观测数据的质量控制是非差数据处理中的关键环节。由于低轨卫星运行速度快,相邻历元间电离层延迟变化较大,星载 GPS 数据较之地面观测数据将存在更多的周跳和粗差。本文在数据预处理阶段首先进行钟跳探测与修复,避免将接收机钟跳引起的观测值跳变误判为周跳。然后采用联合观测值 LLI 信息以及 Melbourne-Wübben 组合^[12]的方法进行周跳探测。此外,使用 IGS 提供的 15 min 间隔的精密星历和 30 s 间隔的钟差信息固定 GPS 卫星轨道与钟差。对观测值中影响在 cm 级以上的系统误差,如相对论效应、天线相位中心偏移与变化、相位缠绕使用模型进行改正。值得注意的是,目前 IGS 分析中心提供的 ANTEX 文件中只给出了天底角在 14° 以内的 PCV 信息,而星载接收机观测 GPS 卫星的

天底角常常超过 14° (可达到 17°),这时常规的内插方法便会失效。本文对天底角超出 14° 的部分用 14° 角的 PCV 值进行改正。另外,目前执行各种低轨卫星任务的分析中心并没有提供星载 GPS 接收机的 PCV 改正信息,由于其本身对定轨结果的影响较小(mm 级),本文没有考虑该项误差改正。卫星截止高度角设置为 5° 。

2 实验结果及分析

为了分析 PPP 固定解的定轨精度及可靠性,本文选取了 2012 年 1 月 2~7 日 GRACE 双星的星载 GPS 观测数据,利用 TriP 软件分别进行 PPP 浮点解和固定解精密定轨。并与 GFZ 提供的事后精密轨道以及 K 波段测距结果进行比较,分析模糊度固定后的 PPP 定轨精度。定轨中用到的各种数据如星载 GPS 数据(GPS1B)、姿态数据(SCA1B)、K 波段数据(KBR1B)以及事后精密轨道数据(NAV1B)均可以从 GFZ 信息系统与数据中心(information system and data center, IS-DC)免费获取。

2.1 与 GFZ 事后精密轨道比较

目前,GFZ 发布的 GRACE 卫星事后精密轨道精度为 $2\sim 3$ cm^[13],采样间隔更新为 5 s。比较时,将 PPP 定轨结果与事后精密轨道做差,然后将其互差转换到 RTN 轨道坐标系下(R 、 T 、 N 分别表示轨道径向、切向和法向分量)。图 1 代表性地给出了 GRACE-A 卫星在年积日 007 天的定轨结果。可以看出,浮点解的定轨结果不是很稳定,部分历元偏差比较大,甚至达到了 3 dm。而固定解定轨结果各方向偏差较小,基本上在 1 dm 内,而且整个观测时段内都比较稳定。少数历元偏差相对较大,是由于可观测卫星数太少,模糊度精度较差等原因,导致模糊度未能成功固定。

对 GRACE 卫星 6 d 的定轨偏差进行平均值和均方差统计,以反映定轨精度,结果如表 1、图 2 所示。其中,006 天 GRACE-A 卫星的观测数据质量较差。

从表 1 可以看出,除了 006 天以外,其余各天的浮点解和固定解定轨结果与 GFZ 事后精密轨道相比均无明显的系统偏差。对每天 RTN 方向的定轨偏差均值分别取平均,GRACE-A 卫星 PPP 浮点解的平均偏差为 $(-0.3, -0.1, -1.8)$ cm,固定解平均偏差为 $(-0.5, -0.7, -0.5)$ cm; GRACE-B 卫星 PPP 浮点解、固定解的平均偏差分别为 $(0.3, 1.0, -0.3)$ cm、 $(-0.1, 0.5, -0.1)$

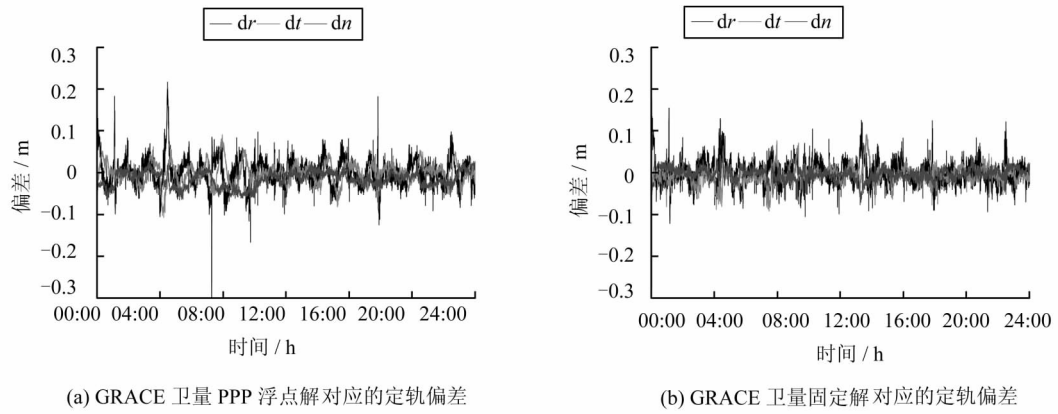


图 1 GRACE 卫星 PPP 浮点解与固定解定轨偏差 (DOY 007)

Fig.1 Orbit Determination Bias of Float Solution and Fix Solution for GRACE-A on DOY 007

表 1 GRACE 卫星定轨偏差均值统计/cm

Tab.1 Mean Bias of PPP Float and Fix Solution for GRACE Orbit Determination/cm

DOY	GRACE-A						GRACE-B					
	浮点解均值			固定解均值			浮点解均值			固定解均值		
	R	T	N	R	T	N	R	T	N	R	T	N
002	-0.2	-0.3	-1.8	-0.3	-0.9	-0.8	0.1	1.2	-1.5	-0.3	0.3	-0.3
003	-0.4	-0.2	-0.3	-0.5	-0.2	-0.2	0.4	1.1	0.0	0.0	0.7	0.1
004	-0.3	-0.1	-1.4	-0.6	-1.0	0.1	0.3	0.9	-0.6	0.0	0.5	-0.2
005	-0.2	-0.2	-2.0	-0.4	-0.7	-0.6	0.7	0.8	-0.1	0.0	0.4	0.1
006	-0.4	0.0	-4.2	-0.8	-0.7	-1.5	0.2	1.3	0.4	-0.4	0.6	-0.1
007	-0.1	-0.1	-1.4	-0.1	-0.6	-0.2	0.3	1.2	0.1	0.0	0.6	0.1

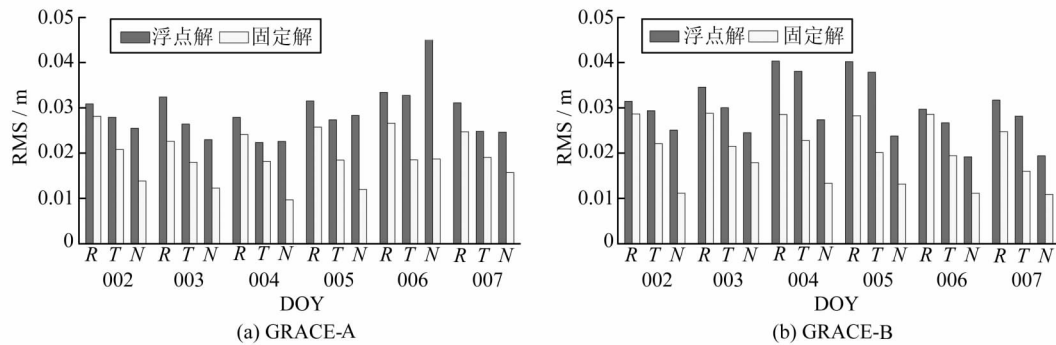


图 2 GRACE-A、GRACE-B 卫星定轨偏差 RMS 统计图

Fig.2 RMS Bias of Orbit Determination for GRACE-A and GRACE-B

cm。整体上,PPP 模糊度固定对 T 、 N 方向定轨结果的改善较为明显。从图 2 来看,除 006 天以外,GRACE-A 卫星 PPP 浮点解的定轨精度约为 R 方向 3~4 cm, T 方向和 N 方向均为 2~3 cm; PPP 固定解的定轨结果 R 方向为 2~3 cm, T 方向大部分优于 2 cm, N 方向优于 2 cm。较之浮点解,固定解定轨精度在 R 、 T 、 N 方向分别改善了约 19%、30%、50%。GRACE-B 卫星 PPP 浮点解的定轨精度为 R 方向 3~5 cm, T 方向约为 3~4 cm, N 方向 2~3 cm;固定解的定轨精度 R 方向为 2~3 cm, T 方向 2 cm 左右, N 方向 1~2 cm。固定解较浮点解定轨结果在各方向也有同

等程度的改善。这表明,PPP 固定解显著改善了低轨卫星的定轨精度和可靠性,尤其是能够明显提高切向和法向定轨精度,但对径向的改善程度较小。这是因为 RTN 坐标系的径向类似于定位中的高程方向,而 PPP 模糊度固定并不能明显改善高程方向的定位精度^[14]。

2.2 与 KBR 测距结果比较

GRACE 卫星上不仅搭载有星载 GPS 接收机,还配备了高精度的 K 波段测距系统(K -band ranging system, KBR),用于测定 GRACE 双星间的距离和距离变率以恢复地球重力场,其测距精度可达 10^{-6} m 量级。值得注意的是,KBR 实

际测得的是一个有偏距离,包含了 GRACE-A、B 卫星间的真实距离和一个距离偏差,该距离偏差在 K 波段未发生周跳时为一常值。本文在处理时,先根据 GRACE-A 和 GRACE-B 卫星的定轨结果计算其星间距离,然后与经过改正的 KBR 观测值做差得到 KBR 残差,然后统计每一 KBR 观测弧段中 KBR 残差的标准偏差 STD 以分析定轨精度。

从图 3 可以看出,PPP 浮点解的 KBR 残差 STD 约为 20~30 mm,平均值为 22.6 mm;固定 PPP 模糊度后,KBR 残差 STD 优于 19 mm,平均值为 16.4 mm,较之浮点解提高了约 28%。由于采用 KBR 测距结果进行轨道检核,主要反映 A/B 卫星沿切向(T)的定轨精度。该数值与 § 2.1 中的结果一致,进一步表明了 PPP 模糊度固定能够改善定轨精度。

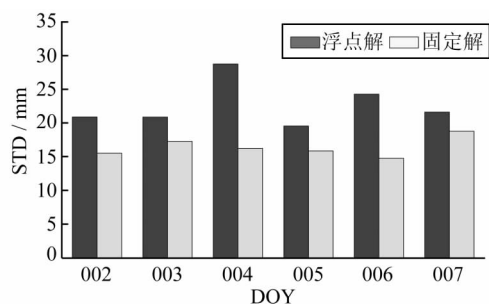


图 3 KBR 测距值与 GRACE-A、B 卫星星间距离差值标准差统计图

Fig. 3 STD of Distance Difference Between KBR and PPP Solution

3 结 语

本文利用 TriP 软件对 2012 年 1 月 2~7 日 GRACE 双星的观测数据分别进行了 PPP 浮点解和固定解精密定轨。结果表明,固定解较浮点解定轨结果在各方向也有同等程度的改善;PPP 固定解能够提供更可靠更高精度的轨道服务,具有重要的科学和应用价值。

参 考 文 献

[1] Bisnath S B, Langley R B. Precise Orbit Determination of Low Earth Orbiters with GPS Point Positioning[C]. ION National Technical Meeting, Long Beach, CA, 2001

[2] Montenbruck O. Kinematic GPS Positioning of LEO Satellites Using Ionosphere-free Single Fre-

quency Measurements [J]. Aerospace Science and Technology, 2003, 7(5): 396-405

[3] Jäggi A, Beutler G, Bock H, et al. Kinematic and Highly Reduced-dynamic LEO Orbit Determination for Gravity Field Estimation[C]. Dynamic Planet-Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic Tools, Bern, 2006

[4] shla D, Rothacher M. Kinematic and Reduced-dynamic Precise Orbit Determination of Low Earth Orbiters[J]. Advances in Geosciences, 2003(1): 47-56

[5] 李建成, 张守建, 邹贤才, 等. GRACE 卫星非差运动学厘米级定轨[J]. 科学通报, 2009(16): 2 355-2 362

[6] 张守建, 李建成, 邹贤才, 等. GRACE 卫星非差运动学精密定轨分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(6): 679-682

[7] 张小红, 何锡扬, 李星星. TriP 软件非差几何法精密定轨精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(11): 1 327-1 330

[8] 李星星, 张小红, 李盼. 固定非差整数模糊度的 PPP 快速精密定位定轨[J]. 地球物理学报, 2012(3): 833-840

[9] Gabor M J. GPS Carrier Phase Ambiguity Resolution Using Satellite-Satellite Single Differences[D]. Austin: University of Texas, 1999

[10] Geng J, Teferle F N, Shi C, et al. Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning with Hourly Data[J]. GPS Solutions, 2009, 13(4): 263-270

[11] Zhang Xiaohong, Li Pan, Guo Fei. Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning with Hourly Data for Global Single Receiver[J]. Advances in Space Research, 2012, 51(1): 153-161

[12] Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data[J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(3): 199-202

[13] Dunn C, Bertiger W, Bar-Sever Y, et al. Instrument of Grace[J]. GPS World, 2003, 14(2): 16-29

[14] Blewitt G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2 000 km[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(B8): 10 187-10 203

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 地学应用方面的科研和教学工作。E-mail: xhzhang@sgg.whu.edu.cn

Kinematic Precise Orbit Determination Based on Ambiguity-Fixed PPP

ZHANG Xiaohong¹ LI Pan¹ ZUO Xiang¹

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

Abstract: With the development of space-borne GPS technologies and IGS precise orbit and clock products, precise orbit determination (POD) of Low Earth Orbiters (LEOs) based on PPP technology has become a hot issue. At present, an accuracy of 3~5 cm in Radial(R), Along-track(T), Cross-track(N) components can be achieved with conventional PPP. However, the results are less precise or reliable than the double-differenced fixed solution due to the ambiguity-float solution in traditional PPP. In order to further improve the precision and reliability of POD with PPP, daily observations from all IGS tracking stations through day 2 to 7 in 2012 were used to estimate the wide and narrow-lane fractional cycle bias (FCB) of all satellites for PPP integer ambiguity resolution. The POD of the two GRACE satellites were respectively compared with GFZ's post precise orbit and K-band measurements for the analysis of the inner and external conformities. As compared to GFZ, the daily orbital accuracy of the ambiguity-fixed solution in this work is about 2~3 cm in R direction, better than 2 cm in T direction and better than 2 cm in N direction for GRACE-A, an improvement of 19%, 30% and 50% respectively when compared with that of the float solution. The POD precision for GRACE-B are 2-3 cm, 2 cm and 1-2 cm in R , N , T directions for the fixed solution, respectively. The accuracy improvement in the fixed solution for GRACE-B is nearly equivalent with that for GRACE-A. For K-band cases, the mean STD error of KBR residual is about 16.4 mm for the fixed solution, and 22.6 mm for the float solution. These results show that PPP with ambiguity-fixed can greatly improve POD precision of LEO satellites and provide more reliable orbital service.

Key words: PPP; ambiguity resolution; low earth orbiters; precise orbit determination; KBR

About the first author: ZHANG Xiaohong, professor, Ph.D supervisor, majors in the research and education on GNSS precise point positioning and its application in geoscience.

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