

非差和单差 LEO 星载 GPS 精密定轨探讨

彭冬菊^{①②} 吴 斌^①

(^① 中国科学院上海天文台, 上海 200030; ^② 中国科学院研究生院, 北京 100390. E-mail: pdongju@shao.ac.cn)

摘要 简要介绍了目前 LEO 星载 GPS 定轨方法, 在自主研制的 SHORD-III 软件基础上, 重点探讨了 LEO 星载 GPS 单差和非差动力学定轨, 通过对 GRACE 卫星试算和与 GFZ 事后科学轨道的比较, 表明单差定轨三维位置精度优于 15 cm, 径向、沿迹方向和轨道面法向可达 5, 10 和 6 cm 精度; 非差定轨三维位置精度优于 10 cm, 径向、切向和法向可达 4, 8 和 4 cm 精度. 采用高精度的 SLR 观测外部检核结果表明, SHORD-III 单差定轨距离精度优于 8 cm, 非差定轨距离精度优于 6 cm.

关键词 LEO 精密定轨 单差 非差 GPS SLR GRACE

随着空间技术及 GPS(global positioning system) 技术的快速发展, 星载 GPS 已成为低轨卫星精密定轨的主要手段之一. 尽管星载 GPS 精密定轨已在 TOPEX/Poseidon, GPS/MET 等卫星上试验成功, 并取得了可喜的成绩, 但随着硬件设备质量的提高、科学研究和应用需求对轨道精度提出更高要求, LEO (low earth orbiter) 星载 GPS 定轨方法仍然还有许多问题值得进一步探讨和研究 [1].

根据是否采用低轨卫星动力信息, LEO 星载 GPS 定轨方法可分为: (i) 几何法, 不依赖于任何力学模型, 完全利用星载 GPS 接收机所接收的伪距和相位观测数据 (4 颗以上的 GPS 卫星) 直接进行定位计算得到低轨卫星位置; (ii) 完全动力学法, 即传统意义上的定轨方法, 基于星载 GPS 的伪距和相位观测数据及各种力学模型, 用卫星动力学直接求解轨道根数和其他动力学参数 [2~4]; (iii) 半动力学法, 该方法充分利用卫星的几何和动力学信息, 估计载体加速度随机过程噪声 (一般为一阶 Gauss-Markov 过程), 利用过程参数来吸收卫星动力学模型误差 [1,3,4].

根据 GPS 卫星精密星历及钟差的获取方式不同, LEO 星载 GPS 定轨方法又可分为: (i) 一步法, 采用 LEO 卫星及地面站的原始观测数据, 无需预先知道 GPS 轨道及卫星钟差, 将 LEO 卫星作为“运动的测站”与其他地面站一起求解, 解算的参数包括: GPS 卫星轨道、LEO 卫星轨道、地面站坐标、大气折射参数和地球自转参数等, 该方法软件设计复杂, 计算工作量巨大, 对计算机 GPU 要求较高 [5]. (ii) 两步法, 即第一步先由地面站求 GPS 轨道 (也可直接使用 IGS 产品); 第二步利用

已知的 GPS 轨道进行 LEO 卫星定轨. 一步法与两步法对 LEO 卫星定轨, 在精度上没有明显差别.

本文主要探讨利用已知的 GPS 精密星历及钟差采用完全动力学方法进行 LEO 卫星定轨. 不同于常用的非差和双差定轨 [1~3,6,7], 本文采用非差和单差两种定轨方式: (i) 非差定轨, 利用星载 GPS 所有观测信息, 以无电离层组合的相位观测值作为观测量对 LEO 卫星动力学定轨; (ii) 单差定轨, 对无电离层组合的相位观测值进行卫星间求差, 构成单差定轨观测量, 消除 LEO 卫星钟差的影响. 以此为基础, 编制了相应的 LEO 星载 GPS 定轨软件 SHORD-III, 给出了 GRACE (gravity recovery and climate experiment) 卫星观测数据算例, 并用 GFZ (Geo Forschungs Zentrum) 发布的 GRACE 卫星事后科学轨道和 SLR (satellite laser ranging) 观测数据讨论了算法的可行性和软件的定轨精度.

1 非差、单差 LEO 星载 GPS 观测方程

LEO 卫星相对于 s 卫星 (GPS 卫星) 的非差观测方程如下:

$$P_{LEO,i}^s = \rho_{LEO}^s + c\delta t_{LEO} - c\delta t^s + \delta\rho_{ion,i} + \delta\rho_{rel} + \delta\rho_{pco} + \delta\rho_{pco}^s + \varepsilon_i, \quad (1)$$

其中 $P_{LEO,i}^s$ 为 LEO 卫星伪距观测值, 为相位观测时还包含模糊度; ρ_{LEO}^s 为几何距离; c 为真空中的光速; δt_{LEO} 和 δt^s 分别为低轨卫星和 GPS 卫星钟差; $\delta\rho_{ion,i}$ 为电离层延迟; $\delta\rho_{rel}$ 为相对论改正; $\delta\rho_{pco}$ 为低轨卫星相位中心偏差; $\delta\rho_{pco}^s$ 为 GPS 卫星天线相位中心偏

差; ε_i 为观测噪声. 由于中性大气层高度为 80 km 以下, 而低轨卫星高度大约在 200 km 以上, 故星载 GPS 接收机不受中性大气层延迟的影响. 另外, 与地面接收机相比, 星载 GPS 接收机还不受固体潮及海潮位移影响, 多路径效应也由于经过对天线高度的精心设计而大大削弱. 因此在(1)式右端不包含对流层延迟和多路径效应.

为消除一阶电离层影响, 观测量采用双频消电离层组合(PC 组合)形式:

$$PC = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{LEO,1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{LEO,2}^s, \quad (2)$$

其中 f_1 和 f_2 为 GPS 的 2 个载波频率, $P_{LEO,1}^s$ 和 $P_{LEO,2}^s$ 为 2 个频率的伪距观测量.

同样, 相位观测无电离层 LC 组合:

$$LC = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{LEO,1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{LEO,2}^s, \quad (3)$$

其中 $L_{LEO,1}^s$ 和 $L_{LEO,2}^s$ 为 2 个频率的相位观测量. (2)和(3)式相减得

$$b_{LC} = \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{LEO,1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{LEO,2}^s \right) - \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{LEO,1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{LEO,2}^s \right). \quad (4)$$

在不存在相位周跳的时间段内, 上述 b_{LC} 只有随机的噪声误差, 基本保持为常数, 对其在无相位周跳的时间内进行平均可以提高该量精度. 在探测到相位周跳后, 重新计算该参数值, 将该量与(4)式右端第二项相加即可得到相位平滑后的无电离层伪距观测量.

由此可得无电离层相位平滑伪距的非差观测方程为

$$\tilde{\rho} = \rho_{LEO}^s + c\delta t_{LEO} - c\delta t^s + \delta\rho_{rel} + \delta\rho_{pco} + \delta\rho_{pco}^s + \varepsilon_3, \quad (5)$$

式中 $\tilde{\rho}$ 为消电离层组合的相位平滑伪距.

对于单差定轨, 观测量为在两颗 GPS 卫星观测量间求差构成的单差, 单差原则是通过选取较长时间连续观测到的某颗 GPS 卫星 s_2 作为参考星, 利用其他 GPS 卫星的观测量与该卫星观测量构成单差, 根据(5)式可得单差定轨观测方程:

$$\begin{aligned} \Delta\tilde{\rho}^{s_1s_2} &= \Delta\rho^{s_1s_2} - c(\delta t^{s_1} - \delta t^{s_2}) + \Delta\rho_{rel}^{s_1s_2} \\ &\quad + \Delta\rho_{pco,LEO}^{s_1s_2} + \Delta\rho_{pco}^{s_1s_2} + \varepsilon, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\Delta\tilde{\rho}^{s_1s_2}$ 为 s_1 卫星和 s_2 卫星消电离层组合的相位平滑伪距的观测量之差; $\Delta\rho^{s_1s_2}$ 为几何距离之差; c ,

δt^{s_1} 和 δt^{s_2} 含义同(1)式; $\Delta\rho_{rel}^{s_1s_2}$ 为相对论延迟之差; $\Delta\rho_{pco,LEO}^{s_1s_2}$ 为 LEO 卫星天线相位中心改正之差; $\Delta\rho_{pco}^{s_1s_2}$ 为 GPS 卫星天线相位中心改正之差; ε 为观测噪声之差. 单差定轨的最大优点在于模型简单, 无需求解低轨卫星钟差, 大大减少了求解参数的个数, 有利于提高运算效率.

2 LEO 动力学模型及定轨方案

完全动力学定轨, 力学模型的选取和参数解算是关键, 在 J2000.0 地心惯性系中作用在卫星上的力 A_{total} 依照其性质可分解为 3 部分, 即地球对卫星的中心引力 $A_{two-body}$, 保守力摄动 A_{grav} 和非保守力摄动 $A_{non-grav}$:

$$A_{total} = A_{two-body} + A_{grav} + A_{non-grav},$$

$$A_{two-body} = -\frac{GM_e}{r^3} \mathbf{r},$$

$$A_{grav} = A_N + A_{NS} + A_{Tides} + A_{RO} + A_{REL},$$

$$A_{non-grav} = A_{drag} + A_{solar} + A_{earth} + A_{rad} + A_{tangent} + A_{RTN},$$

式中 GM_e 为地球引力常数; $\mathbf{r}$ 为卫星位置矢量; A_N 为 N 体摄动; A_{NS} 为地球形状摄动; A_{Tides} 为潮汐摄动, 其包含固体潮、海潮和大气潮摄动; A_{RO} 为地球自转形变附加摄动; A_{REL} 为相对论摄动; A_{drag} 为大气阻力摄动; A_{solar} 为太阳直射辐射压摄动; A_{earth} 为地球反照辐射压摄动; A_{rad} 为卫星本体辐射摄动; A_{RTN} 为周期性 RTN 摄动.

软件具体实现时没考虑大气潮摄动和卫星本体辐射摄动, 软件中使用的周期性 RTN 摄动经验公式见下式, 软件中使用到的各种力学模型和参数解算方案见表 1.

$$A_{RTN} = \begin{bmatrix} A_R \\ A_T \\ A_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_R \cos u + S_R \sin u \\ C_T \cos u + S_T \sin u \\ C_N \cos u + S_N \sin u \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 u 为卫星纬度, 其余为待估参数.

地球重力场模型是低轨卫星精密定轨的主要摄动误差源, 因此地球重力场模型的合理选取是提高低轨卫星定轨精度的关键, 软件中采用的重力场模型为 CSR 利用 GRACE 卫星 363 d (2002~2003 年, <http://www.csr.utexas.edu/grace/gravity/>) 观测资料估算得到的 GGM02s^[8,9] 模型与地面重力资料联合解算得到的 GGM02c^[8] 模型. 实际计算表明, GGM02c, GGM02s, GGM01s (GRACE 卫星 111 天观测资料, <http://www.csr.utexas.edu/grace/gravity/ggm01/>), GGM01c (GGM01s 和地面重力资料) 和 EIGEN3P (CHAMP 卫星

3 年资料解算得到, http://www.gfz-potsdam.de/champ/results/grav/008_eigen-3p.html)模型对 GRACE 卫星定轨精密差异不显著.

表 1 软件中使用到的模型及参数

摄动力/模型	描述	备注
地球重力场模型	GGM02c 模型	150×150 阶, 不估算
大气阻力摄动	DTM94 模型	分段估计大气阻力参数 c_d
太阳光压与地球返照辐射压	Box-Wing 模型	不估算
固体潮	IERS96	不估算
海潮	CSR4.0	不估算
周期性 RTN 摄动	见(5)式	分段估计参数 c_T, s_T, c_N, s_N
地球自转参数	IERS Bulletin B	不估算
初始轨道	3-D 位置和速度	一天估算一组初轨
大行星历表	JPL DE/LE 200	不估算
模糊度	实数解	分圈估算模糊度参数
LEO 钟差	非差参数	每个历元估算一个钟差

3 算例分析

3.1 与 GFZ 事后科学轨道比对

基于以上方法, 本文采用 GRACE-A 和 GRACE-B 卫星 2002 年 11 月 5~25 日 21 d (年积日 309~329) 星载 GPS 观测资料 [10,11], 用 SHORD-III 精密定轨结果与 GFZ

发布的 GRACE 卫星事后科学轨道进行了比较. 定轨采用的 GPS 星历及钟差来自 GFZ 提供的 30 s 采样率的事后精密轨道 [10,11] 比较, 如果如下.

21 d 定轨结果与 GFZ 事后科学轨道比较: (i) 单天单差定轨(SD)结果和单天非差定轨(ZD)结果与 GFZ 事后科学轨道比较得到的三维位置精度见图 1, 横轴表示年积日, 纵轴表示三维位置精度, 单位为 cm; (ii) GRACE-A 卫星 21 d 单差定轨和非差定轨结果在径向(R)、沿迹方向(T)和轨道面法向(N)三个方向的偏差见图 2, GRACE-B 卫星 21 天单差定轨和非差定轨结果在 R, T, N 三个方向的偏差见图 3, 横轴表示年积日, 纵轴表示 R, T, N 三个方向的偏差, 单位为 cm.

图 1 表明, 以 GFZ 事后科学轨道为参考, SHORD-III 软件单差定轨精度优于 15 cm, 非差定轨精度优于 10 cm, 考虑到 GFZ 轨道本身误差, 取 5~6 cm, 则本文单差定轨精度约 14 cm, 非差定轨精度约 8 cm.

图 2 和 3 表明, (i) 本软件对 GRACE 卫星定轨结果与 GFZ 事后科学轨道在 T 方向差异最大, 符合动力学定轨的一般规律; (ii) R, T, N 三个方向无显著系统偏差, 误差主要为卫星轨道的周期误差; (iii) 本软件非差定轨精度优于单差定轨精度.

3.2 SLR 校验

GRACE-A 和 GRACE-B 卫星上不仅搭载有 GPS

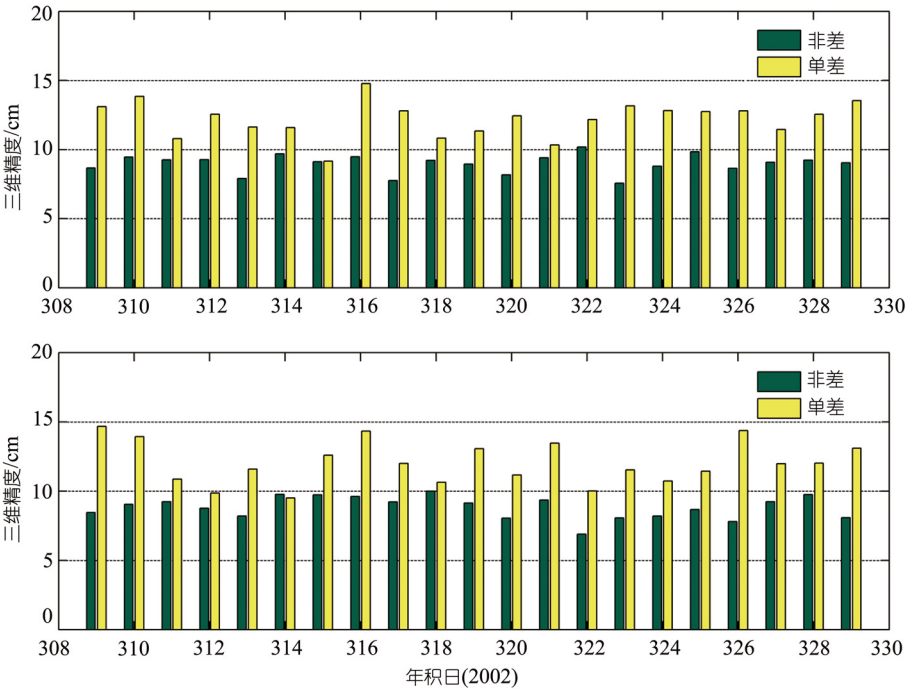


图 1 单差非差定轨三维精度图

(a) 与 GFZ 比较, GRACE-A 卫星三维位置精度; (b) 与 GFZ 比较, GRACE-B 卫星三维位置精度

接收机,还配备了激光反射器,SLR的观测精度优于1 cm^[4],因此可以利用SLR观测资料对星载GPS定轨结果进行外部检核.利用SLR观测资料对星载GPS定轨结果进行外部检核,实际就是比较SLR直接测得的站星距与星载GPS定轨结果计算得到的站星距,因此,必须仔细考虑测站及SLR观测资料的各项改正^[6,12].

本文采用了2002年11月5~25日21 d的SLR观测数据检验星载GPS单差定轨和非差定轨结果,SLR观测资料来自NASA的CDDIS标准点数据,该数据是通过原始观测数据进行预处理生成的间隔为5 s的标准点.在检核过程中,SLR观测资料扣除了

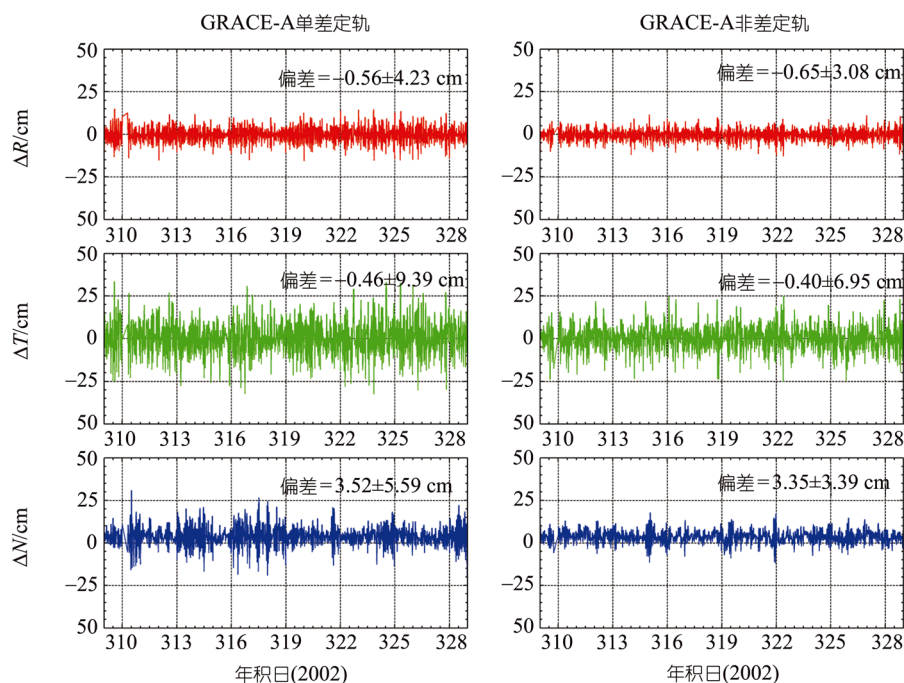


图2 GRACE-A定轨结果与GFZ事后科学轨道比较残差图

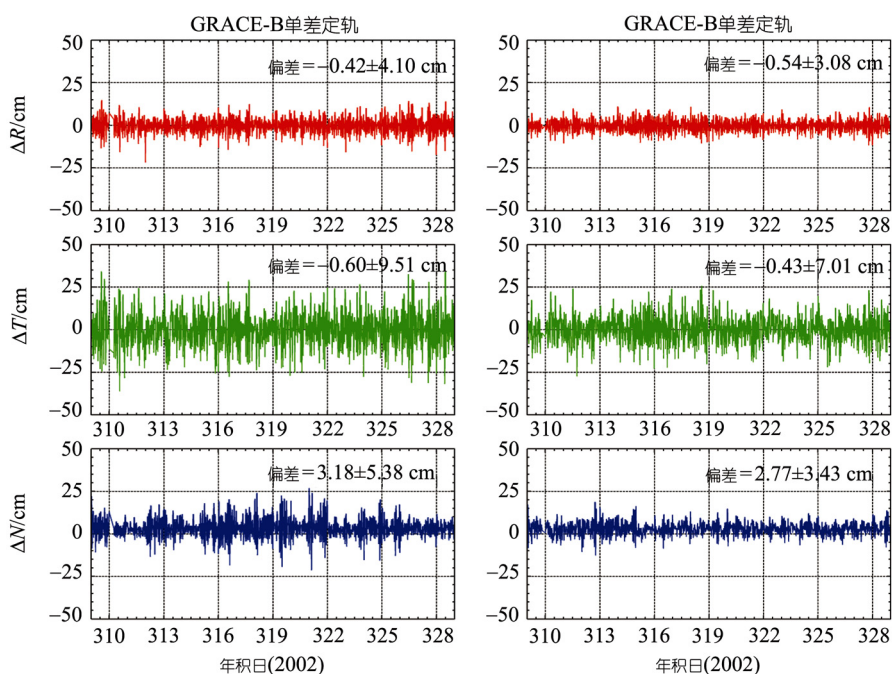


图3 GRACE-B定轨结果与GFZ事后科学轨道比较残差图

潮汐改正、测站偏心改正、卫星质心改正、大气折射改正和相对论延迟改正。由于 GRACE 卫星轨道高度低、飞行速度快、难以跟踪,因此 SLR 观测数据少,在计算的 21 d 有 14 个测站跟踪到了 GRACE-A 卫星,共 81 圈,1858 个标准点数据;13 个站跟踪到了 GRACE-B 卫星,共 73 圈,1663 个标准点数据。

表 2 和 3 分别列出了各个测站观测对 GRACE-A 和 GRACE-B 卫星单差定轨和非差定轨外部检核的统计结果(不考虑高度角)。由表 2 和 3 可知,在利用 SLR 检核星载 GPS 定轨结果时,对于单差定轨,除 7838 站直接检核均方根误差(RMS)大于 10 cm 外,其余各站的均方根误差均小于 10 cm;对于非差定轨,各站的均方根误差均小于 10 cm。

SLR 外部检核表明:(i) 单差定轨和非差定轨结果与 SLR 观测之间无显著系统偏差,如 GRACE-B

表 2 SLR 观测资料检核 GRACE-A 卫星星载 GPS 定轨结果

测站号、测站名	平均值/cm		RMS/cm		圈数	标准 点数
	SD	ZD	SD	ZD		
1884(拉脱维亚里加)	1.2	2.3	5.5	4.3	4	94
7080(德克萨斯)	2.8	2.4	0.4	1.2	1	5
7090(澳大利亚堪培拉)	0.9	3.3	6.1	5.1	17	238
7105(马里兰格林贝尔特)	-1.2	-1.2	7.3	2.5	6	160
7110(加利福尼亚)	-0.5	-0.9	4.6	5.3	7	224
7210(夏威夷)	-1.2	1.5	7.2	3.0	7	159
7237(中国长春)	-4.0	-1.5	6.1	3.8	7	133
7811(波兰博罗维茨)	0.3	-3.7	6.0	4.5	2	20
7835(法国格拉斯)	-2.8	-2.5	4.3	4.1	3	60
7836(德国波茨坦)	3.2	-1.0	5.5	4.0	4	178
7837(中国上海)	-1.4	-0.8	7.8	1.5	4	43
7838(日本和歌山)	-2.6	-0.5	10.3	4.9	3	109
7839(澳大利亚格拉茨)	0.6	-1.2	6.2	4.1	13	368
7840(英国赫斯特蒙索)	5.7	-2.9	4.3	4.0	3	67
总和	-0.00	-0.59	6.72	4.64	81	1858

表 3 SLR 观测资料检核 GRACE-B 卫星星载 GPS 定轨结果

测站	平均值/cm		RMS/cm		圈数	标准 点数
	SD	ZD	SD	ZD		
1884(拉脱维亚里加)	3.8	0.4	7.5	2.7	4	103
7090(澳大利亚堪培拉)	-0.2	1.6	6.9	5.3	21	295
7105(马里兰格林贝尔特)	-3.2	-1.0	2.9	4.5	4	70
7110(加利福尼亚)	-2.7	-0.0	8.8	5.8	9	265
7210(夏威夷)	0.3	-3.8	3.6	1.8	2	50
7237(中国长春)	-0.2	-1.6	8.4	6.4	9	187
7811(波兰博罗维茨)	3.2	3.8	3.1	1.6	2	27
7835(法国格拉斯)	6.2	4.2	1.1	0.9	1	20
7836(德国波茨坦)	-4.1	0.1	5.5	4.0	4	112
7837(中国上海)	4.8	5.3	2.4	3.6	1	7
7838(日本和歌山)	-0.2	-2.3	9.1	6.6	3	145
7839(澳大利亚格拉茨)	-1.1	-1.2	5.7	5.1	10	300
7840(英国赫斯特蒙索)	0.2	-1.6	5.8	4.5	3	83
总和	-0.66	-0.04	7.42	5.40	73	1664

非差定轨结果与 SLR 观测之间的偏差为 (-0.05 ± 5.40) cm; (ii) SLR 检核单差定轨和非差定轨的结果与 GFZ 事后精密轨道比对的结果相符合,这也表明本软件定轨结果与 GFZ 事后科学轨道之间无显著系统偏差; (iii) 非差定轨精度优于单差定轨精度,这也与 GFZ 事后科学轨道比对结果相符合。

4 结论

根据本文提出的单差和非差定轨方法和在此方法上发展的卫星动力学精密定轨软件 SHORD-III 对 GRACE 卫星定轨计算结果表明: (i) 单差定轨三维位置精度优于 15 cm, 径向、切向和法向可达 5, 10 和 6 cm 精度; (ii) 非差定轨三维位置精度优于 10 cm, 径向、切向和法向可达 4, 8 和 4 cm 精度; (iii) SLR 外部检核表明, SHORD-III 单差定轨距离精度优于 8 cm, 非差定轨距离精度优于 6 cm。

本文研究表明 LEO 卫星星载 GPS 动力学定轨采用单差和非差方法都可达到较高精度, 单差定轨算法简捷、速度快, 非差定轨精度略高。本文提出的单差方法是一种新的尝试, 进一步改善方法可提高单差动力学法的定轨精度。

参 考 文 献

- Švehla D, Rothacher M. Kinematic and reduced-dynamic precise orbit determination of low earth orbiters. *Adv Geosci*, 2002, 1: 1—10
- Švehla D, Rothacher M. Kinematic and Dynamic Precise Orbit Determination using GPS. *GOCE/CryoSat-Workshop*. 2003
- Visser P, vandenijssell J. Aiming at a 1-cm orbit for Low Earth Orbiters: Reduced-dynamical and kinematic precise orbit determination. *Space Sci Rev*, 2003, 8: 27—36[DOI]
- 叶叔华, 黄诚. 天文地球动力学. 济南: 山东科技出版社, 2000. 91—92
- Zhu S, Reigber C, Massmann F H, et al. Strengthening of Reference Frame Solutions by CHAMP and GRACE. *Sapporo: IUGG*, 2003
- Švehla D, Rothacher M. EGS-AGU-EUG Nice Kinematic and reduced-dynamic precise orbit determination of CHAMP satellite over one year using spaceborne GPS phase zero-differences only. *Nice: EGS-AGU-EUG Joint Assembly*, 2003
- 赵齐乐. GPS 导航星座及低轨卫星的精密定轨理论和软件研究. 博士学位论文. 武汉: 武汉大学, 2004. 6—7
- Tapley B, Ries J, Bettadpur S, et al. GGM02-an improved earth gravity field model from grace. *J Geod*, 2005, 79: 467—478[DOI]
- Reigber C, Schmidt R, Flechtner F, et al. An earth gravity field model complete to degree and order 150 from GRACE: EIGEN-GRACE02s. *J Geodyn*, 2005, 39: 1—10[DOI]
- Case K, Kruizinga G, Wu S. GRACE level 1B Data Product User Handbook Version 1.2, 2004
- Bettadpure S. Product Specification Document Version 4.3, 2006
- 秦显平, 焦文海, 程芦颖, 等. 利用 SLR 检核 CHAMP 卫星轨道. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2005, 30(1): 38—41