

# 利用星载GPS数据确定厘米级Jason-1卫星精密轨道

盛传贞<sup>1,2</sup>,甘卫军<sup>1</sup>,赵春梅<sup>2</sup>,肖根如<sup>1</sup>,陈为涛<sup>1</sup>

(1. 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室,北京100029; 2. 中国测绘科学研究院,北京100830)

## Precise Orbit Determination of Jason-1 Satellite Based on Spaceborne GPS Data with cm-level Accuracy

SHENG Chuazhen, GAN Weijun, ZHAO Chunmei, XIAO Genru, CHEN Weitao

摘要:利用Jason-1卫星星载GPS实测数据,通过非差简化动力学定轨的方法,计算Jason-1卫星2003年1月3日至23日的轨道,并与JPL确定的GPS简化动力学轨道进行对比。结果表明,简化动力学法使Jason-1卫星的径向定轨精度可优于 $\pm 2.5$  cm。

关键词:Jason-1卫星;GPS精密定轨;简化动力学法轨道确定

### 一、引言

继Topex/Poseidon(T/P)卫星后,美国宇航局(NASA)和法国空间中心(CNES)于2001年2月7日将另外一颗海洋测高卫星Jason-1送入太空。Jason-1卫星接替先前运行的T/P卫星,负责对全球海平面进行高精度监测。海洋测高是Williams于1969年提出的,对于载有高度计的卫星而言,其定轨精度尤其是径向精度是制约高度测量数据应用的关键因素之一。为了能够与T/P卫星的测高数据很好地衔接,要求Jason-1卫星轨道的径向分量精度达到 $\pm 2.5$  cm<sup>[1]</sup>。

星载GPS接收机的应用,使得利用GPS数据来确定Jason-1卫星的轨道成为可能。大量连续的、覆盖全球的GPS观测数据,使定轨方法得到了充分发展,开创了低轨卫星精密定轨的新时代。目前,星载GPS定轨的方法主要有以下几种。

1) 几何法。该方法的缺点在于接收机可见GPS卫星几何图形结构经常变化,而这种经常变化的图形结构会导致几何法定轨精度出现波动<sup>[1-2]</sup>。

2) 动力学方法。该方法的特点是能够提供连续的低轨卫星位置,并可以进行轨道预报。但是由于重力场、大气阻力摄动等各种力学模型难以用精确的数学模型表达,限制了低轨卫星定轨精度的提高<sup>[1-3]</sup>。

3) 简化动力学方法。该方法充分利用卫星的几何学和动力学信息,通过估计载体加速度的随机过程噪声,利用设置过程参数来吸收动力学模型误

差,从而达到提高轨道精度的目的<sup>[3-4]</sup>。

本文利用2003年1月3日至23日的实测Jason-1星载GPS数据,采用非差动力学定轨的方法计算该时间段内Jason-1卫星的轨道,并以JPL的GPS简化动力学轨道作为参考,评价了基于本文的策略而获得的非差动力学轨道的精度。

### 二、定轨策略

#### 1. 观测数据

利用星载GPS数据实施低轨卫星精密定轨时,高采样率的GPS卫星精密轨道和钟差是获取高精度定轨结果的前提<sup>[5]</sup>。文中的GPS卫星轨道和精密钟差采用GFZ发布的轨道和钟差产品,其精密轨道和精密钟差产品的采样率均为30 s。

文中选取2003年1月3日至23日的CDDIS数据中心(the crustal dynamics data information system)提供的Jason-1星载GPS观测数据,该数据的采样间隔为10 s。

#### 2. 模型说明

精密定轨处理的是消电离层的载波非差线性组合观测值LC和消电离层伪距非差线性组合观测值PC。表1给出了轨道计算中涉及的时空参考框架、测量模型和力模型<sup>[6-9]</sup>。

#### 3. 定轨方法

简化动力学精密定轨方法是目前广泛使用的定轨方法,它可充分利用卫星的几何和动力学信息。本文以虚拟随机脉冲量作为经验加速度,对

收稿日期:2011-05-27

基金项目:地震行业科研专项资助项目(200708013);国家自然科学基金(E51105)

作者简介:盛传贞(1985—),男,山东泰安人,博士生,主要研究方向为GNSS数据处理和卫星精密轨道确定。

Jason-1 卫星进行简化动力法定轨。

表 1 轨道计算中涉及的时空参考框架、测量模型和力模型

项目	模型	标准
参考框架	协议惯性系统	J2000
	协议地球固定系统	ITRF2005
	时间系统	GPS
测量模型	高度角/(°)	3
	采样间隔/s	30
	相位模糊度	作为未知参数估计
	相位中心及其变化	考虑
	对流层	无
力学模型	GPS 卫星钟差	固定 GFZ 的 30 s 钟差
	GPS 卫星轨道	固定 GFZ 最终的精密星历
	重力场	EIGEN2 120 × 120
	质心引力	太阳、月亮和其他行星摄动( DE200)
	潮汐	固体潮汐、极潮、海洋潮汐
	相对论效应	考虑
	太阳光压	CODE 扩展光压模型( ECOM)

文中定轨采用的观测数据是含有卫星钟差和接收机钟差的伪距离和相位观测量,当忽略噪声和各种延迟改正时,其观测方程可写成如下形式<sup>[1-3]</sup>

$$\rho'(t) = \rho(t) + c\delta_R(t) - c\delta_S(t) \quad (1)$$

$$\varphi(t) = \rho(t) + c\delta_R(t) - c\delta_S(t) + \lambda N(t) \quad (2)$$

式中  $\rho$  和  $\varphi$  分别为伪距和相位观测值量(单位为 m);  $\rho$  为卫星到接收机之间的几何距离;  $\delta_R$  与  $\delta_S$  分别为接收机钟差、卫星钟差;  $N$  为相位模糊度;  $t$  为观测对应的历元。

#### 4. 参数估计

在卫星精密轨道确定中,需要估计的参数包括:

- 1) 6 个开普勒轨道根数(半长轴、偏心率、倾角、升交点赤经、近地点幅角、纬度幅角)。

- 2) CODE 的九参数光压模型。

$$\text{光压摄动 } \mathbf{a}_{rpr} = \mathbf{a}_D + \mathbf{a}_Y + \mathbf{a}_X$$

式中

$$\mathbf{a}_D = (a_{D0} + a_{DC} \cdot \cos u + a_{DC} \cdot \sin u) \cdot \mathbf{e}_D$$

$$\mathbf{a}_Y = (a_{Y0} + a_{YC} \cdot \cos u + a_{YS} \cdot \sin u) \cdot \mathbf{e}_Y$$

$$\mathbf{a}_X = (a_{X0} + a_{XC} \cdot \cos u + a_{XS} \cdot \sin u) \cdot \mathbf{e}_X$$

其中  $a_{D0}$ 、 $a_{DC}$ 、 $a_{DS}$ 、 $a_{Y0}$ 、 $a_{YC}$ 、 $a_{YS}$ 、 $a_{X0}$ 、 $a_{XC}$ 、 $a_{XS}$  是光压模型的 9 个参数;  $\mathbf{e}_D$  为太阳-卫星方向单位向量;  $\mathbf{e}_Y = \frac{\mathbf{e}_D \times \mathbf{r}}{|\mathbf{e}_D \times \mathbf{r}|}$  为卫星太阳帆板轴的单位向量;  $\mathbf{e}_X = \mathbf{e}_Y \times \mathbf{e}_D$ 。

定轨中同时求解这 9 个光压参数。

- 3) LEO 星载 GPS 接收机钟差。每个观测历元设置一个星载 GPS 接收机钟差参数。

- 4) 经验加速度: 在  $R$ 、 $T$ 、 $N$  方向上进行分段解算,根据处理经验,每 1.5 h 设置一组经验加速度参数,且对该经验加速度约束为  $1E-06$ 。

#### 5. 定轨精度评价

##### (1) 残差分析

残差是观测资料拟合程度的体现,是模型和数据的吻合度,因此,可以通过残差来初步分析卫星轨道的精度问题。通过残差统计结果可以看出,码观测量残差 RMS 的均值和均方差分别为 0.239 m 和 0.238 m,而相位观测量残差 RMS 的均值和方差分别为 0.005 m 和 0.006 m,与码和相位观测量的精度是一致的。但在 2003 年 1 月 3 日至 5 日期间,相位观测量残差 RMS 明显要大于其他各天,分析主要是由于该段数据中低高度角的 GPS 卫星数目居多,数据质量相对要差。Jason-1 卫星非差简化动力学定轨残差统计如表 2 所示; Jason-1 卫星非差简化动力学定轨相位残差 RMS 如图 1 所示; Jason-1 卫星非差简化动力学定轨码残差 RMS 如图 2 所示。

表 2 Jason-1 卫星非差简化动力学定轨残差统计

m

时间标识	年积日 (DOY) /d	相位观测量			码观测量		
		min	max	RMS	min	max	RMS
2003-01-03	3	-0.031	0.034	0.008	-0.993	0.995	0.249
2003-01-04	4	-0.031	0.036	0.008	-0.991	0.995	0.258
2003-01-05	5	-0.030	0.032	0.007	-0.994	0.999	0.241
2003-01-07	7	-0.029	0.036	0.005	-0.998	0.987	0.242
2003-01-08	8	-0.031	0.030	0.005	-0.990	1.003	0.226
2003-01-09	9	-0.031	0.038	0.005	-0.996	0.994	0.222
2003-01-10	10	-0.028	0.032	0.005	-1.000	0.993	0.239
2003-01-11	11	-0.032	0.033	0.005	-0.996	0.992	0.239
2003-01-12	12	-0.029	0.036	0.004	-1.000	0.999	0.243
2003-01-13	13	-0.037	0.037	0.005	-0.995	0.999	0.229

续表 2

m

时间标识	年积日 (DOY) /d	相位观测量			码观测量		
		min	max	RMS	min	max	RMS
2003-01-15	15	-0.042	0.033	0.005	-0.979	0.996	0.218
2003-01-16	16	-0.032	0.038	0.005	-1.002	1.001	0.254
2003-01-17	17	-0.029	0.034	0.005	-0.990	0.997	0.239
2003-01-19	19	-0.033	0.036	0.007	-1.003	0.993	0.233
2003-01-20	20	-0.035	0.029	0.006	-0.998	0.996	0.229
2003-01-21	21	-0.030	0.040	0.005	-1.001	0.996	0.238
2003-01-22	22	-0.034	0.036	0.006	-0.997	1.005	0.237
2003-01-23	23	-0.031	0.027	0.005	-0.998	1.006	0.239
mean		-0.032	0.034	0.006	-0.996	0.997	0.238

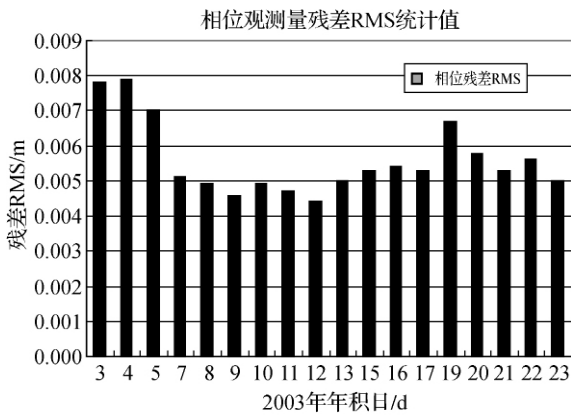


图1 Jason-1 卫星非差简化动力学定轨相位残差 RMS

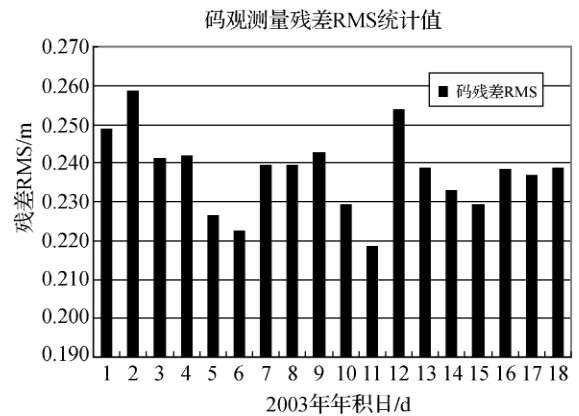


图2 Jason-1 卫星非差简化动力学定轨码残差 RMS

(2) 外部轨道比较

为了进一步评价和分析 Jason-1 卫星简化动力学轨道的精度, 通过与 JPL 提供的轨道进行比较, 该

轨道精度比较高, 径向精度达  $\pm 2 \text{ cm}^{[10]}$ 。Jason-1 卫星非差简化动力学定轨结果如表 3 所示。Jason-1 卫星非差简化动力学定轨位置差异如图 3 所示。

表 3 Jason-1 卫星非差简化动力学定轨结果

m

时间标识	年积日(DOY) /d	轨道差异统计值 RMS			
		R	T	N	1D
2003-01-03	3	0.029	0.065	0.032	0.045
2003-01-04	4	0.027	0.053	0.040	0.041
2003-01-05	5	0.023	0.052	0.033	0.038
2003-01-07	7	0.022	0.041	0.017	0.028
2003-01-08	8	0.018	0.037	0.017	0.025
2003-01-09	9	0.022	0.044	0.019	0.031
2003-01-10	10	0.021	0.039	0.015	0.027
2003-01-11	11	0.015	0.028	0.017	0.021
2003-01-12	12	0.016	0.035	0.014	0.024
2003-01-13	13	0.019	0.043	0.018	0.029
2003-01-15	15	0.020	0.046	0.021	0.031
2003-01-16	16	0.020	0.047	0.021	0.032
2003-01-17	17	0.022	0.053	0.024	0.036
2003-01-19	19	0.024	0.046	0.026	0.033
2003-01-20	20	0.020	0.042	0.021	0.029
2003-01-21	21	0.030	0.072	0.020	0.046
2003-01-22	22	0.025	0.054	0.020	0.036
2003-01-23	23	0.021	0.049	0.018	0.033
mean		0.022	0.047	0.022	0.032
方差		0.004	0.011	0.007	0.007

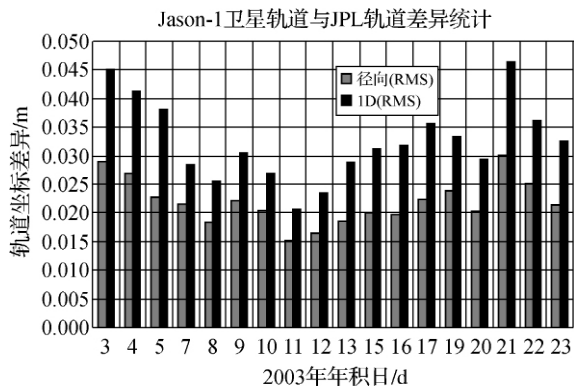


图3 Jason-1 卫星非差简化动力学定轨位置差异

通过与 JPL 公布的 Jason-1 卫星轨道进行比较, 其结果如下: Jason-1 卫星简化动力学轨道与 JPL 的简化动力学轨道位置在径向、沿迹向和法向差异的 RMS 均值为 0.022 m、0.047 m 和 0.022 m 左右; 而轨道位置在径向、沿迹向和法向差异的 RMS 的方差为 0.004 m、0.011 m 和 0.007 m 左右。但是, 2003 年 1 月 3 日和 4 日的简化动力学轨道相对于其他天的轨道精度略差, 主要是 2003 年 1 月 3 日和 4 日 Jason-1 卫星星载 GPS 观测数据存在大量的低高度角(小于零度)数据, 推断可能是由于该数据段 Jason-1 卫星姿态进行调整所致。此外, 2003 年 1 月 21 日和 22 日的简化动力学轨道精度也比较差, 主要是在该数据段上, GPS 部分卫星进行调整, 观测的 GPS 卫星数目比较少, 影响了该数据段上的轨道精度。各天轨道差异均反映出 Jason-1 卫星简化动力学轨道的沿迹向的轨道差异最大, 属于简化动力学定轨的本身的缺陷。以 JPL 的简化动力学轨道作为比较的基准轨道, 除部分存在问题的数据段外(2003 年 1 月 3 日、4 日、21 日、22 日), 基于本文的处理方法, Jason-1 卫星非差简化动力学轨道的径向精度优于  $\pm 2.5$  cm 左右, 可以满足 Jason-1 最初的设计要求。

### 三、结束语

本文基于 Jason-1 卫星星载 GPS 实测数据, 采

用非差简化动力学定轨的方法, 计算了 Jason-1 卫星 2003 年 1 月 3 日至 23 日 Jason-1 的精密轨道, 并通过与 JPL 计算的精密轨道比对和残差分析两种手段分析了该精密轨道的精度。实际计算结果表明, 基于本文的定轨策略, 除了少数部分数据段由于 Jason-1 卫星或 GPS 卫星调整引起的数据质量较差外, 基于 Jason-1 星载 GPS 数据简化动力学定轨, 其径向轨道精度可以优于  $\pm 2.5$  cm, 能满足 Jason-1 卫星的海洋计划。

### 参考文献:

- [1] 彭冬菊, 吴斌. 非差与单差 LEO 星载 GPS 精密定轨探讨[J]. 科学通报, 2007, 52(6): 715-719.
- [2] 韩保民. 基于星载 GPS 的低轨卫星几何法定轨理论研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所 2003.
- [3] 张飞鹏, 黄城, 廖新浩, 等. 综合多种观测技术精密确定海洋卫星 ERS-2 的轨道[J]. 科学通报, 2001, 46(14): 1227-1238.
- [4] BERTIGER W I, BAR-SEVER Y E, CHRISTENSEN E J, et al. GPS Precise Tracking of Topex/Poseidon: Results and Implication [J]. JGR Oceans Topex/Poseidon Special Issue, 1994, 99(C12): 24449-24464.
- [5] 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[D]. 武汉: 武汉大学 2004.
- [6] TAPLEY B D, SCHUTZ B E, BORN G H. Statistical Orbit Determination [M]. Amsterdam: Elsevier 2004.
- [7] 欧吉坤. 测量平差中不适定问题解的统一表达式与选权拟合法[J]. 测绘学报, 2004, 33(4): 283-288.
- [8] BEUTLER G. Methods of Celestial Mechanics [M]. New York: Springer Publishing Company 2005.
- [9] 袁运斌, 欧吉坤. GPS 观测数据中的仪器偏差对确定电离层延迟的影响及处理方法[J]. 测绘学报, 1999, 28(2): 110-114.
- [10] HAINES B, BERTIGER W, DESAI S, et al. Initial Orbit Determination Results for Jason-1: Towards a 1-cm Orbit [J]. Journal of Navigation, 2003, 50(3): 171-179.

(上接第 10 页)

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 严伟, 王庆, 宋玉兵, 等. 基于 GPRS 的 CORS 网络差分模块设计[J]. 现代测绘, 2008(5): 10-12.
- [3] 宋玉兵, 丁玉平, 沈飞. JSCORS 的建设和最新进展[J]. 测绘通报, 2009(2): 73-74.
- [4] 查东辉. 3G 网络探索研究[J]. 科技管理研究, 2009(3): 259-260.
- [5] 王铮, 毕婧. 3G 和无线网络技术的展望[J]. 2011(3): 62-63.
- [6] 丁明雷. 我国 3G 发展现状与前景分析[J]. 软件导报, 2011(2): 127-129.
- [7] 邱蕾. GNSS 网络 RTK 的定位算法及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学 2009.