



## 论文

# JASON-2 卫星精密轨道确定: GPS, SLR 和 DORIS 分析

盛传贞<sup>①②\*</sup>, 甘卫军<sup>①</sup>, 赵春梅<sup>②</sup>, 张小强<sup>②</sup>, 孙保琪<sup>③</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;

③ 中国科学院国家授时中心, 临潼 710600

\*联系人, E-mail: shengchuanzhen@163.com

收稿日期: 2012-06-24; 接受日期: 2012-07-23; 网络出版日期: 2013-01-23

国家自然科学基金资助项目(批准号: 41174082, 41074012, 41274018)

**摘要** 本文针对 GPS, SLR 和 DORIS 3 种观测手段的定轨问题进行了研究. 以 JASON-2 卫星为例, 讨论了 GPS, SLR 和 DORIS 的定轨策略、轨道精度评价和轨道叠加问题. 并基于 2009-01-21-25 日实测数据进行了试验. 试验结果表明, DORIS 定轨结果要优于 GPS 和 SLR; 不同的轨道验证方法得到的 GPS 和 SLR 轨道的相对精度不同; 基于 SLR 验证和轨道重叠验证的结果定权, 综合 GPS, SLR 和 DORIS 进行轨道叠加, 其叠加轨道的精度是一致的, 通过与 JPL 轨道比较, 其径向精度为 2 cm.

**关键词** GPS, SLR, DORIS, JASON-2, 精密轨道确定

**PACS:** 05.40.Ca, 06.20.Dk, 06.30.Gv, 07.90.+c

**doi:** 10.1360/132012-553

继 Topex/Poseidon(T/P)和 JASON-1 卫星之后, 美国宇航局(NASA)和欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)于 2008 年 6 月 20 日将又一颗海洋测高卫星 JASON-2 送入太空<sup>[1]</sup>. 该卫星将协同在同一环地球轨道上运行的 JASON-1 卫星, 继续对全球海平面进行高精度监测. 负责向地面传输全球海平面高度、洋流流速及方向、海洋内储存的热量等数据. 这些数据将有助于提高飓风预测准确度, 并更准确地为船舶提供海事气象预报<sup>[1,2]</sup>.

海洋测高是 Williams 1969 年提出的, 对载有高度计的卫星, 其定轨精度尤其是径向精度是制约卫

星数据应用的关键因素之一. 此外, 为了协同 JASON-1 卫星的科学任务, 要求 JASON-2 卫星的轨道精度至少在径向分量上应与 JASON-1 卫星一致<sup>[2]</sup>. 因此, JASON-2 卫星除在轨道设计方面仍沿袭 JASON-1 卫星外, 即选择了较高的轨道(约 1335 km)以减小定轨时地球引力场和大气阻力的影响; 同时仍采用了 SLR(satellite laser ranging), DORIS (doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite) 和 GPS(global positioning system)多项测定轨技术<sup>[2,3]</sup>.

由于 JASON-2 卫星同时搭载了 GPS, SLR 和 DORIS 3 种定轨手段, 如何基于这三种定轨手段来获

**引用格式:** 盛传贞, 甘卫军, 赵春梅, 等. JASON-2 卫星精密轨道确定: GPS, SLR 和 DORIS 分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 219-224  
Sheng C Z, Gan W J, Zhao C M, et al. Precise orbit determination of JASON-2 satellite: analysis of GPS, SLR and DORIS (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 219-224, doi: 10.1360/132012-553

取高精度、高可靠性的轨道是卫星应用中首要解决的问题<sup>[1,4]</sup>。目前,国内外学者的研究工作主要集中在观测层面的融合,该方式通过将所有的观测量同时组建观测方程,一起参与参数估计,进行轨道解算<sup>[2,4]</sup>。该方式可以弥补单一手段数据缺失的不足<sup>[4]</sup>,但是需要不同手段的先验权,而先验权的获取需要对待处理数据本身有充分的了解,而只有通过对该数据处理才能对数据有充分的了解,这本身就存在矛盾;此外,还要求软件同时具备多类数据处理能力<sup>[1,4]</sup>。因此,本文采用另一种处理方法,即首先采用不同手段的观测数据进行轨道计算,不同类型观测数据可以采用不同的软件进行计算,然后对估计的轨道进行精度评价,基于评价的结果定权,最后进行轨道叠加。该方法的优点在于轨道叠加的先验权是基于轨道精度评价结果给定的,不必预先对待处理数据有充分了解,而且克服了多手段兼容软件的依赖。

本文的研究内容包括以下3个方面:(i)介绍了基于SLR, DORIS和GPS的JASON-2卫星精密定轨策略;(ii)JASON-2卫星轨道精度评价方式,主要采用SLR验证,重叠弧段和外部轨道比较;(iii)轨道叠加,基于轨道精度评估结果进行轨道叠加。由于SLR, GPS和DORIS各手段及定轨策略涉及内容较多<sup>[4-8]</sup>,本文中仅做简单介绍,重点是轨道的精度评价和叠加问题。

## 1 定轨策略

卫星精密定轨策略是卫星精密定轨中首要解决的问题。JASON-2卫星同时搭载了GPS, SLR和DORIS3种定轨手段,这些测量设备相对于前一代设备从测量精度和可靠性方面均有了提高<sup>[1,4,7]</sup>,因此,JASON-2卫星定轨策略解决的是如何基于各手段的高精度观测量来确定高精度和稳定性的卫星轨道。卫星精密定轨策略主要涉及以下几个方面:(i)弧段长度(解算每组轨道所需要的数据长度);(ii)参数化(参数估计类型、数目及先验权);(iii)数据编辑(包括数据的剔除、权确定)<sup>[8,9]</sup>。在以往的精密定轨处理策略中,GPS简化动力学定轨通常采用30h数据,而DORIS和SLR定轨采用3天短弧或1周的数据<sup>[2,9]</sup>。参数化是卫星定轨策略研究中极为重要的问题,尤其是经验加速度的设置和约束问题,直接影响到定

轨的精度<sup>[5,9]</sup>。在卫星精密定轨策略研究中,另外一个重要的问题是数据编辑。通常数据剔除是在迭代中通过残差逐步实施,对于整体残差离群的观测异常站,需要对该站进行剔除<sup>[7,10]</sup>;而先验权的设定主要根据不同的处理形式而采用不同的定权方案。由于JASON-2卫星定轨策略涉及内容较多,不再累赘,具体定轨策略详见表1<sup>[1,2,11-13]</sup>。

## 2 轨道精度评价

卫星精密定轨中另外一个比较重要的问题是关于轨道的精度评价。由于卫星的真实位置是无法获取的,因此精确的卫星轨道精度评价是难以实现的,只能通过一些行之有效的方式对轨道的相对精度进行初步评价。本文主要采用SLR验证、重叠弧段比较、外部轨道比较3种方式对轨道精度进行评价。

### 2.1 SLR 检验

SLR具有观测精度高(可达1cm)、无模糊度和不受电离层影响等特点,因此,可用来对轨道精度进行评价<sup>[2,3]</sup>。通常采用受较小大气影响的高角度激光观测对轨道进行评价,然而高角度的观测量通常相对较少,对于3d弧段的短弧段轨道评价,就缺乏足够的稳定性和可靠性<sup>[14]</sup>。因此,为了获取稳定可靠的评估结果,为轨道叠加提供先验信息,文中采用15°的低高度角激光观测数据。评估采用下式:

$$\begin{aligned} \Delta^i &= \rho_o^i - (\rho_c^i + \Delta\rho_{\text{all}}^i + \varepsilon^i), \\ \delta_R &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (\Delta^i)^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\rho_o^i$ 为激光观测值, $\rho_c^i$ 为基于待评估轨道计算的站心距, $\Delta\rho_{\text{all}}^i$ 为各类影响的等效距离和(包括测站偏心、测站偏移、大气延迟、海潮负荷、固体潮、质心改正和广义相对论效应改正)<sup>[3]</sup>, $\varepsilon^i$ 为观测误差, $\delta_R$ 为每日的SLR残差RMS值。

基于上述方法分别对2009年1月21-25日的GPS,SLR和DORIS定轨结果进行了评价。SLR观测数据高度角取15°,并根据计算的每日的RMS求其均值和均方差。结果如图1和表2,其中表2为各天残差RMS均值和均方差统计值。因此,基于SLR验证可以看出:DORIS定轨结果优于SLR和GPS定轨

表1 JASON-2 卫星精密定轨策略

Table 1 the strategy for precise orbit determination of JASON-2

定轨软件	
GPS	BERNESE GPS Software V5.1
DORIS	UTOPIA
SLR	UTOPIA
地球物理模型	
GPS	地球重力场/潮汐和章动模型 行星星历 地球定向参数 EIGEN2/( IERS2000/IAU2000) DE200 IERS C04
DORIS/SLR	地球重力场/潮汐模型 行星星历/大气密度 地球定向参数 JGM3/GOT99.2 DE403/ MSIS-86 IERS C04
观测数据	
GPS	2009年01月21-25日, 非差观测, 等权处理
SLR	2009年01月20-27日, SLR 距离观测, 等权处理
DORIS	2009年01月20-27日, 多普勒观测, 等权处理
测量模型	
相位中心	GPS: 星固系(SBF X, Y, Z): (1.194, -0.598, 0.703)m SLR: 星固系(SBF X, Y, Z): (1.194, -0.598, 0.684)m DORIS: 星固系(SBF X, Y, Z): (2.385, -0.217, 0.521)m
GPS 卫星	IGS 15 min 精密星历、30 s 精密钟差
SLR/DORIS 站坐标	ILRS(International SLR Service)/IDS(International DORIS Service)提供
估计参数	
测量模型	GPS: GPS 载波相位模糊度; 星载 GPS 接收机钟差; DORIS: DORIS 测量偏差; 对流层尺度因子(每个弧段)
力学模型	GPS: 轨道六参数; CODE 光压 9 参数; 随机脉冲 24 组/天 DORIS: 卫星位置和速度; 每 8 h 一组大气阻力 $C_D$ 和变化率 $\dot{C}_D$ ; 每天一组经验加速度(切向和法向) SLR: 卫星位置和速度; 每天一组大气阻力 $C_D$ 和变化率 $\dot{C}_D$ ; 每天一组经验加速度(切向和法向)
弧段长度	
弧段长度	GPS: 30 h 弧段: 前 24 h 为最终定轨结果, 后 6 小时参与轨道弧段重叠检验 SLR/DORIS: 3 d 弧段, 中间一天为最终定轨结果, 末尾一天前 6 h 弧段重叠

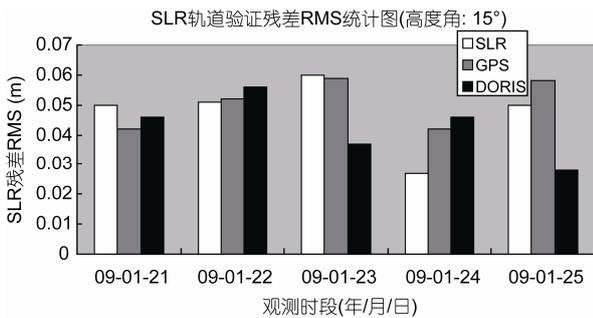


图1 SLR 验证 GPS, DORIS, SLR 轨道各天残差 RMS 统计值

Figure 1 statistical value of every day for GPS, DORIS and SLR validated by SLR.

结果, 而 GPS 定轨结果较为稳定, 3 种手段定轨结果差异并不十分显著. 基于 15° 高度角 SLR 观测值检核, GPS, SLR 和 DORIS 轨道精度均在 5 cm 左右.

表2 各天残差 RMS 均值和均方差统计值(单位: m)

Table 2 the mean and standard deviation for RMS of residual error of every day

	SLR	GPS	DORIS
均值	0.048	0.051	0.043
均方差	0.012	0.008	0.011

## 2.2 重叠弧段比较

重叠弧段比较是基于独立解算轨道的重叠弧段的部分段进行比较, 然后基于统计结果作为轨道精度评估的依据. GPS, SLR 和 DORIS 的轨道重叠方式如图 2 所示.

针对 3 种手段的每个重叠弧段, 均进行 6 h 的轨道重叠比较, 然后, 计算弧段重叠部分的位置差异 RMS, 其计算方法如下所示<sup>[6,10]</sup>:

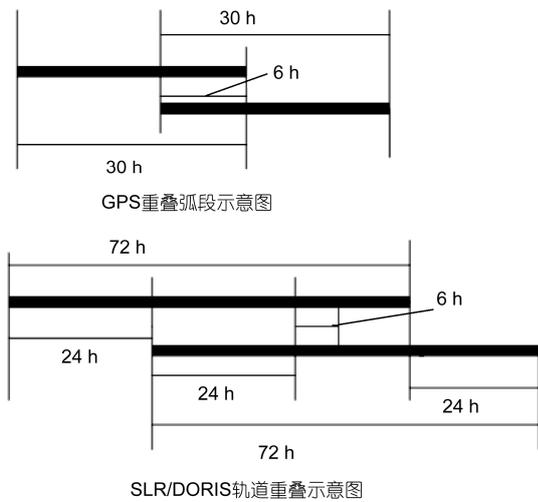


图 2 SLR, DORIS 和 GPS 轨道重叠方式示意图

Figure 2 Schematic diagram of orbit overlap for SLR, DORIS and GPS.

$$\begin{aligned}
 \delta_x &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (X_1 - X_2)^2}, \\
 \delta_y &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (Y_1 - Y_2)^2}, \\
 \delta_z &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (Z_1 - Z_2)^2}, \\
 \delta_{pos} &= \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2},
 \end{aligned} \tag{2}$$

其中  $X_1, Y_1, Z_1$  和  $X_2, Y_2, Z_2$  分别为轨道重叠部分的坐标位置, 而  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$  分别为重叠段的 3 个方向差异的 RMS 值.

限于篇幅, 本文仅给出重叠弧段的位置差异 RMS 值(表 3). 通过重叠弧段比较反映出: DORIS 定轨结果要优于 GPS 和 SLR, 且呈现比较好的稳定性, 其位置差异 RMS 为 3 cm 左右.

表 3 重叠弧段位置差异 RMS 统计表(单位: m)

Table 3 RMS for position difference using orbit overlap method

时段	SLR	GPS	DORIS
2009-01-21	0.070	0.053	0.036
2009-01-22	0.029	0.089	0.034
2009-01-23	0.026	0.086	0.022
2009-01-24	0.031	0.056	0.019
2009-01-25	0.059		0.053
均值	0.043	0.071	0.033
均方差	0.020	0.019	0.013

### 2.3 外部轨道比较

外部轨道比较是轨道评估中一种重要的轨道精度评价方式. 该方式通过将计算的最终轨道与其他分析中心解算的轨道进行比较, 可以体现出不同软件、不同测量模型和力学模型所引起的轨道差异.

文中采用 JPL 公布的 JASON-2 试验阶段的轨道, 该轨道是基于 GPS 数据, 采用简化动力学定轨方法计算得到的, 其径向精度优于  $2 \text{ cm}^{[1-3]}$ .

通过将 DORIS, GPS 和 SLR 定轨结果分别与 JPL 简化动力学轨道进行比较, 统计每天轨道差异的 RMS(表 4), 可反映出轨道的相对精度. 文中仅给出位置差异 RMS, 结果显示: 基于外部轨道比较方式, DORIS 结果无论在精度和稳定性方面均优于 SLR 和 GPS, 其中 SLR 轨道最差, 其位置差异在 14 cm 左右.

### 3 轨道叠加

JASON-2 卫星同时搭载有 GPS, SLR 和 DORIS 定轨手段, 轨道叠加的目的是充分利用 3 种手段, 获得更加稳定可靠的轨道结果<sup>[12]</sup>. 本文分别依据上述 3 种轨道评价方法的结果来进行轨道叠加. 叠加时, 首先根据轨道的精度评价结果, 赋予不同手段轨道以权重系数, 然后叠加生成一组轨道解, 具体叠加方法如下所示:

$$P_{i,j} = \frac{\frac{1}{\delta_{i,j}}}{\frac{1}{\delta_{i,SLR}} + \frac{1}{\delta_{i,GPS}} + \frac{1}{\delta_{i,DORIS}}},$$

$$X_{i,res} = P_{i,SLR} \times X_{i,SLR} + P_{i,GPS} \times X_{i,GPS} + P_{i,DORIS} \times X_{i,DORIS}, \tag{3}$$

$i = X, Y, Z; j = \text{SLR, DORIS, GPS}$ ,

其中  $X_{i,j}$  为  $i$  方向,  $j$  手段的坐标值,  $P_{i,j}$  为  $i$  方向,  $j$  手

表 4 3 种手段与 JPL 轨道比较位置差异 RMS 统计表(单位: m)

Table 4 RMS for Position difference comparing between JPL solution and orbit determined by SLR, GPS or DORIS

时段	SLR	GPS	DORIS
2009-01-21	0.136	0.098	0.084
2009-01-22	0.111	0.118	0.074
2009-01-23	0.139	0.124	0.082
2009-01-24	0.174	0.117	0.065
2009-01-25	0.137	0.120	0.068
均值	0.139	0.115	0.075
均方差	0.022	0.010	0.008

段的权系数,  $\delta_{i,j}$  为  $i$  方向, SLR 手段的 RMS. 由于缺少 2009 年 01 月 25 日 GPS 重叠弧段轨道精度, 因此该段数据叠加时将其权系数设置为 0. 叠加后, 通过将叠加的轨道与 JPL 标准轨道比较, 得出其径向分量差异<sup>[2,3]</sup>. 此外, 文中还采用了均值加权来进行轨道叠加, 该方法假定 3 种手段的权完全一致.

表 5 和图 3 为基于 4 种加权方法得到的轨道与 JPL 轨道径向分量差异的 RMS 值. 通过表 5 和图 3 可以看出: 均值加权方式要略差一些, 因为它是一种完全无先验信息的加权; 外部轨道比较形式的加权

表 5 不同加权方法径向差异 RMS 统计表(单位: m)

Table 5 RMS of orbit radial difference by using different weighting method

时段/3 种 叠加方法	均值	重叠 弧段	SLR 验证	外部轨道 比较
2009-01-21	0.020	0.019	0.017	0.017
2009-01-22	0.024	0.021	0.021	0.019
2009-01-23	0.017	0.012	0.015	0.014
2009-01-24	0.019	0.014	0.017	0.015
2009-01-25	0.029	0.027	0.027	0.027
均值	0.022	0.019	0.019	0.018
均方差	0.004	0.006	0.005	0.005

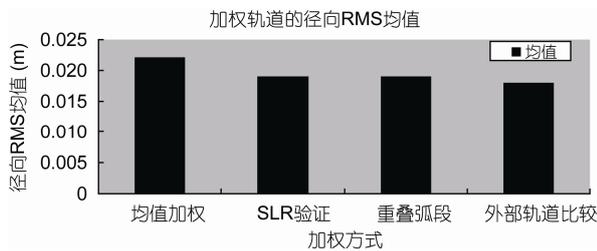


图 3 不同加权方法轨道径向差异 RMS 均值

Figure 3 RMS of orbit radial difference by using different weighting method.

方式最优, 但是实际中这种加权方式是不可能实现的(基于某一轨道比较结果加权, 而后再与此轨道比较); SLR 验证和重叠弧段加权方式具有相似的精度, 其径向精度优于 2 cm 左右, 因此在实际应用中, 可以采用 SLR 或重叠弧段加权形式.

## 4 结论

本文基于 SLR, DORIS 和 GPS 分别计算了 2009-01-21-25 日的 JASON-2 卫星轨道, 并通过与 JPL 精密轨道比对、轨道重叠检验以及 SLR 检验 3 种方式对轨道进行了评价, 并根据评价结果进行加权, 得到最终叠加轨道. 通过计算说明:

(i) JASON-2 卫星定轨结果通过与 JPL 精密轨道比对、轨道重叠检验以及 SLR 检验均体现出 DORIS 定轨结果优于 SLR 和 GPS 定轨结果.

(ii) 轨道重叠检验和 SLR 验证均体现出 SLR 轨道结果要优于 GPS 结果, 而 JPL 轨道比较却表明 GPS 结果优于 SLR 结果, 基于不同方式评价, 其结果存在差异性.

(iii) 对 GPS、SLR 和 DORIS 加权综合生成精密轨道时, 若没有任何先验信息时, 采用平均加权方式, 其结果要差. 可以采用 SLR 检核和轨道重叠方式加权, 两种方式精度相当.

基于 SLR, DORIS 和 GPS 对 JASON-2 精密定轨结果表明: 基于各个手段分别进行定轨, 然后基于对各个手段的轨道评估结果进行加权叠加, 生成精密轨道, 可以获得比较高的精度. 同时该方法不需要数据的先验信息, 且摆脱了软件能兼容处理多类数据的要求. 因此, 这种基于轨道层面的叠加方法, 可以为我国海洋 2 号卫星精密定轨工作提供有益的参考.

## 参考文献

- Cerri L. Preliminary strategy for Jason-2 POD. In: Presentation, DORIS Analysis Working Group Meeting (AWG) of the International DORIS Service. Paris: IDS Publication, 2008
- Lemoine F G, Zelensky N P, Chinn D S, et al. Towards development of a consistent orbit series for TOPEX/Poseidon, Jason-1 and Jason-2. Adv Space Res, 2010, 46(12): 1513-1540
- Peng D J, Wu B. Discussion about precise orbit determination of LEO satellite using single-difference and indifference method (in Chinese). Chin Sci Bull, 2007, 52(6): 715-719 [彭冬菊, 吴斌. 非差与单差 LEO 星载 GPS 精密定轨探讨. 科学通报, 2007, 52(6): 715-719]
- Zhang F P, Huang C, Liao X H. Precise Orbit determination of ERS-2 satellite using several observation technologies (in Chinese). Chin Sci Bull, 2001, 46(14): 1227-123 [张飞鹏, 黄斌, 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. 科学通报, 2001, 46(14): 1227-1238]

- 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. 博士学位论文. 武汉: 武汉大学, 2004
- 6 Bertiger W I, Bar-Sever Y E, Christensen E J, et al. GPS precise tracking of Topex/Poseidon: Results and implication. *J Geophys Res*, 1994, 99(C12): 24449–24464
- 7 Tapley B D, Schutz B E, Born G H. *Statistical Orbit Determination*. Holland: Elsevier, 2004
- 8 韩保民. 星载 GPS 低轨卫星几何法定轨理论研究. 博士学位论文. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2003
- 9 Beutler G, Jäggi A, Hugentobler U, et al. Efficient satellite orbit modeling using pseudo-stochastic parameters. *J Geod*, 2006, 80(7): 353–372
- 10 Beutler G. *Methods of Celestial Mechanics*. Berlin: Springer, 2005
- 11 Hugentobler U, Dach R, Fridez P, et al. *Bernese GPS Software-Version 5.0*. Astronomical Institute, University of Bern: CODE Publication, 2005, 121–124
- 12 Dach R, Schaer S, Bock H, et al. CODE's new combined GPS/GLONASS clock product. In: *IGS Workshop, International GNSS Service*. Newcastle upon Tyne, England, 8 June-2 July, 2010. 71–74
- 13 Bock H, Dach R, Jäggi A, et al. High-rate GPS clock corrections from CODE: Support of 1 Hz applications. *J Geod*, 2009, 83(11): 1083–1094
- 14 Ou J K. A uniform expression of solutions of ill-posed problems in surveying adjustment and the fitting method by selection of the parameter weights (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2004, 33(4): 283–288 [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. *测绘学报*, 2004, 33(4): 283–288]

## Precise orbit determination of JASON-2 satellite: analysis of GPS, SLR and DORIS

SHENG ChuanZhen<sup>1,2\*</sup>, GAN WeiJun<sup>1</sup>, ZHAO ChunMei<sup>2</sup>, ZHANG XiaoQiang<sup>2</sup>,  
SUN BaoQi<sup>3</sup> & CHEN WeiTao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;*

<sup>2</sup> *Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China;*

<sup>3</sup> *National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Lintong 710600, China*

This paper studied the problem of precise orbit determination by using GPS, SLR and DORIS, and taken JASON-2 as example to discuss the determination strategy, orbit validating methods and orbit stacking of it. Experiment has been carried out by using the observational data from January 21st, 2009 to January 25th, 2009 and the results show that: the orbit determined by DORIS is the best among that determined by GPS, SLR and DORIS. Different orbit validating method came to a different conclusion on relative accuracy when comparing orbit determined by GPS and DORIS. When we combine the orbit determined by GPS, DORS and SLR respectively by using the weight based on result of SLR validating and orbit overlap, it shows that the combined orbit have similar accuracy. When comparing the combined orbit with JPL orbit, it shows that the radial orbit accuracy can reach to 2 centimeters.

**GPS, SLR, DORIS, JASON-2, precise orbit determination**

**PACS:** 05.40.Ca, 06.20.Dk, 06.30.Gv, 07.90.+c

**doi:** 10.1360/132012-553