

海洋二号卫星精密定轨方案设计及实现

蒋兴伟, 王晓慧, 彭海龙, 林明森

(国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

[摘要] 2011年8月16日发射的海洋环境动力(海洋二号)卫星是中国第一颗动力环境卫星,其中搭载的雷达高度计需要连续的厘米级海洋地形测量,轨道误差在雷达高度计整体误差预算中占主要部分,为实现海洋二号卫星精密定轨事后处理径向10 cm精度的研制总要求,海洋二号卫星搭载了多普勒地球轨道和无线电定位系统(DORIS)接收机、双频全球定位系统(GPS)接收机和激光反射棱镜阵列用于精密定轨。本文综述了海洋二号卫星精密定轨方案设计和关键技术,给出了在轨测试结果。

[关键词] 精密定轨;GPS;DORIS;激光测距

[中图分类号] V529 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)07-0019-06

1 前言

在高度计出现以前,对卫星轨道的精密程度要求不是很高。高度计的出现,由于轨道误差,使得高度计数据在应用上受到了限制,因此高度计数据的应用加速了精密定轨技术的进步。近三十年来,精密定轨技术取得了很大进步,尤其在Topex/Poseidon(T/P)卫星的发射,使卫星精密定轨获得惊人的提高。在1978年Seasat卫星发射时,卫星轨道径向均方差(这里轨道误差主要指的是径向误差)RMS约为5 m^[1];欧洲空间局1991年发射的ERS-1卫星和1995年发射的ERS-2卫星轨道径向精度分别为8~15 cm和7~8 cm^[2,3];1992年美国 and 法国联合发射了T/P卫星,星上载有一台美国NASA的Topex双频高度计和一台法国CNES的Poseidon高度计,预算发射时径向轨道精度为12.5 cm,精密的观测数据、动力学模型以及定轨策略的显著进步使得T/P轨道径向精度达到了2 cm水平,完全适合于卫星的业务应用^[4,5]。2000年欧洲空间局发射的ENVISAT卫星径向轨道精度达到了2~3 cm^[6],2001年美国发射的T/P后继星Jason-1以及2008年发射的Jason-2卫星径向精度接近1~2 cm的水平^[5]。

2011年8月16日发射的海洋环境动力(海洋二号)卫星是中国第一颗动力环境卫星,载有雷达高度计、雷达散射计、微波辐射计和校正辐射计,辅助设备有DORIS(多普勒地球轨道和无线电定位系统)接收机、双频GPS(全球定位系统)接收机和激光反射棱镜阵列,其中双频GPS接收机和激光反射棱镜阵列为国内自主研发,DORIS跟踪系统与法国合作,DORIS接收机由法国提供。本文介绍了海洋二号(HY-2A)卫星精密定轨方案设计并对解决的关键技术进行了分析。

2 海面高度测量对精密定轨精度的需求

为满足连续的、有效的海洋地形测量, HY-2A卫星载有的雷达高度计测高误差要求小于10 cm。高度计测高误差分配中除了仪器误差和传播路径误差外,最大的误差源来自于轨道误差,因此对卫星定轨精度具有严格的要求。结合我国实际情况, HY-2A卫星高度计测量误差如表1所示。

分配方案中的测高精度没有达到10 cm,主要是因为轨道精度的缘故。而这里的轨道精度是没有考虑利用高度计数据交叉点平差的办法可以消除的那部分轨道径向误差。通常情况下,利用交叉

[收稿日期] 2013-03-29

[基金项目] 海洋公益性行业科研专项(201105032)

[作者简介] 王晓慧(1968—),女,黑龙江绥化市人,博士,副研究员,主要研究方向为卫星精密定轨;E-mail:xhwang@mail.nsoas.gov.cn

表1 海洋二号卫星高度计测量误差分配表
Table 1 The error budget of altimeter measurements for HY-2A satellite

卫星	校正后误差/cm
仪器噪声	4~6
EM(电磁)偏差	2
Skewness 偏差	1
干对流层	1
湿对流层	1~2
电离层	~3
轨道径向误差	10
总均方根误差	12~14

点升弧和降弧交点的海面高之差来求解径向轨道误差,然后用改正后的海面高度进行研究,当然处理起来比较复杂。原理是上升弧段和下降弧段在交叉点位置所测得的海面高的差值是卫星径向轨道误差在测高观测值中的典型反映,通过交叉点平差可以极大地降低卫星轨道径向误差、海面时变残差所引起的误差以及部分系统误差等对测高数据的影响。通过交叉点平差能使测距精度提高2~3倍。由此可知,测高总误差可由原来的12~14 cm降低到5~8 cm。

3 海洋二号卫星精密定轨方案设计

3.1 精密定轨跟踪技术

近三十年来,尤其在T/P发射后,卫星精密定轨获得惊人的提高。轨道精度的进步除了轨道动力学模型的改进之外,跟踪技术的提高是至关重要的。激光测距(SLR)精度由20世纪60年代的几百米量级提高到现在的毫米级;定轨途径也在发生着变化,早期高度计卫星定轨主要采用TRANET/OPNET和SLR跟踪技术^[7],欧洲ERS1/2的发射出现了PRARE跟踪技术^[8],自从T/P的发射,出现了GPS和DORIS跟踪系统,由于密集分布的跟踪网和高精度的测量数据使得定轨精度有了显著提高^[9,10]。随后的ENVISAT卫星、Jason-1和Jason-2卫星都采用了GPS、DORIS和SLR跟踪系统^[11,12]。

3.1.1 SLR跟踪系统

SLR跟踪技术成为主要地测跟踪系统已经超过30年了。SLR跟踪系统测量的是地面发射器发射的脉冲到卫星上激光反射器,再由激光反射器反射到地面跟踪站接收系统的双程的时间。许多现代系统使用的几个光子或者是单光子的水平,从跟踪精度上看SLR代表最先进的跟踪系统,精度达到

几个毫米,绝对精度对于最好的仪器可以达到1 cm。对于所有的陆地跟踪数据,中性大气延迟可以计算,与无线电波相比,激光所在的波段不受电离层的影响,而且水汽的影响也比无线电波小。

SLR观测量提供精确的、不模糊的从跟踪站到卫星的距离观测量,这些观测量通过与轨道运动模型融合,在一段延长的时间范围内能够给出高分辨率的卫星位置三维分量。这一点对于轨道误差估计是非常重要的。另外跟踪站的位置和速度能够得到很好的确定,SLR数据在陆地参考系下能够获得精确的确定,在轨道Z轴方向SLR数据给出了严格约束。

SLR跟踪系统卫星上只需要安放激光反射阵列,最复杂的部分主要在地面,因此,系统的可靠性高;但由于SLR跟踪站稀疏的地理分布和测距局限在晴朗天气的条件,在轨道后处理过程中,SLR数据一般用作其他方法的检核标准,并在其他方法无法胜任时作为定轨的手段。

3.1.2 DORIS系统

DORIS系统是单程地面到卫星的多普勒系统,它是由一系列地面信标站连续的、全方向的播放频率2 036.25 MHz和401.25 MHz的信号。此系统是由法国太空总署(CNES)、法国国家地理研究院(IGN)和法国空间大地测量研究组(GRGS)开发作为低轨卫星轨道确定的系统。

DORIS跟踪系统作为试验研究阶段是在SPOT2卫星上使用,随后作为T/P卫星精密定轨跟踪系统主要手段之一,由于其密集分布的跟踪网和高精度的测量数据使得DORIS跟踪系统在T/P上定轨精度达到0.5 mm/s水平。随后在Jason-1、Envisat、SPOT3和SPOT4卫星上均采用了DORIS跟踪系统,并在接收机质量、体积和消耗等性能做了改进,更加微型化,使得DORIS跟踪系统成为更加广泛应用的精密定轨技术之一。

3.1.3 GPS跟踪系统

GPS是美国国防部批准的由海陆空联合研制的以空间为基础的无线电导航系统。GPS空间系统是由24颗卫星组成,这种卫星群设计隐含着在地球表面任何一个GPS用户总是能同时观测到6~11颗GPS卫星。

传统的利用GPS卫星定位方法采用伪距定位法,由于测距码的码元长度较大不能满足高精度测距需求,精密的位置确定的关键是来自L波段的载波。当双频载波相位和伪距一起处理时,就能实现

GPS全部潜在的价值,伪距精度远低于载波相位的精度,提供的伪距可以作为绝对距离的补充。虽然载波信号在开始测量时存在整周数不确定的问题,尽管如此,载波相位测量由于其高精度和连续的特性使其具有相当重要的价值。对于大多数先进的无码GPS接收机伪距的精度在1 m以下,伪距可以用来为载波相位测量整周数的估计作为约束限制。反过来载波相位可以用来平滑伪距和作为伪距的限制条件。

影响GPS跟踪系统精密厘米级定位精度的另外一个因素是GPS时钟和广播星历实际引起的和故意造成的误差,目前国际GPS组织(IGS)提供GPS星历和时钟产品,精度分别优于10 cm和1 ns。IGS产品根据多种参与机构的计算结果进行加权综合,产品适合大多数科学应用的要求,其中包括精密定轨。

为了充分发挥GPS系统显著的潜能,利用GPS系统本身来精密确定卫星轨道的概念开始出现,GPS信号光束可以延伸到地球边缘上空3 000 km,一个在低轨的GPS用户接收机与地面GPS基准用户接收到GPS卫星的能力几乎相同,这种丰富的观测几何结构可以不以动力模型为基础就能够确定低轨卫星的三维位置,GPS这种强大的能力是与其他跟踪系统的重要区别。

目前对于大多数商用和政府卫星现在都载有GPS接收机,仅仅根据星上接收机确定卫星位置精度10~30 cm就足够了。高度计卫星明确要求较高的定轨精度,对于这样的发射任务,GPS跟踪系统作为提供厘米级精度的手段之一,这项技术建立在卫星接收机和全球地面接收机基准网之间的差分载波相位测量事后处理的基础上,目前这项技术已经得到相当可观的发展,尤其GPS跟踪系统在T/P上的应用,使得GPS精密轨道确定精度达到接近顶峰(将近2 cm)。

3.2 精密定轨方法

所谓卫星定轨,简言之就是指在某一历元(即通常所说的时刻)获取卫星在某一选定的坐标参考框架中的状态(即位矢和速度矢)。定轨首先需要用一定的技术手段获得与卫星运动状态有关的独立观测值。如果选定卫星在某一历元的初始状态,并建立卫星的力学模型,那么通过轨道积分就可以以一定的时间间隔给出卫星的参考轨道,由于对轨道初始状态的估计存在误差,同时描述作用在卫星上的力的数学模型也存在不足,而且,这些力模型

中的参数也不精确,因而整个参考轨道是不精确的;利用获得的观测值对这些力模型和初始状态参数进行改正就可以逐步提高参考轨道的精度,反复进行这一步骤,则可以求出在某种最优意义下的最优解。这一过程的困难除了数据处理过程非常复杂外,更主要的一点在于非常难于对卫星的受力情况进行很好的建模,可以说,采用动力定轨方法(dynamic strategy),建立好卫星的受力模型是实现精密定轨的基本前提。

在定轨过程中使用卡尔曼滤波器会发现一些传统的动力学定轨方法有趣的差别。特别是它让我们在某种程度上,从精密定轨过程中总是要考虑的卫星运动力模型这一复杂工作中解放出来。这种方法,称之为简化动力学方法(reduced-dynamic strategy),具体实现上,是通过将没有建模或模型不准确的加速度当作为平稳的随机过程,以此来解释观测的卫星轨道与预计的卫星轨道之间的偏离。GPS系统的特点是可以全天候获得高精度的卫星星历,而其他的数据组合,如DORIS/SLR,可以支持简化动力学定轨方法的变化。一般来讲,简化的动力学定轨方法寻求的是将局部的几何观测值改正到动态确定的、收敛的轨道解上去,从而最大限度地利用可观性。

3.3 精密定轨方案确定

根据HY-2A卫星测高精度对精密定轨精度需求,精密定轨精度能否达到指标要求,已成为卫星发射任务成败的关键。为了保证HY-2A卫星的精密定轨,考虑到任务成本的情况下,采用多种跟踪系统,一方面保证跟踪系统的可靠性;另一方面使用多种跟踪系统可以充分发挥各自的优势,获得高精度定轨结果。

针对GPS、SLR和DORIS跟踪技术的精度及覆盖密集程度,HY-2A卫星精密定轨采用两种定轨方案,一是利用GPS和SLR精密定轨技术综合定轨,以GPS技术为主要定轨技术,以SLR作为检验标准;另一个是利用DORIS和SLR定轨技术综合定轨,以DORIS技术为主要定轨技术,SLR技术为检验标准。

4 解决的关键技术

4.1 各种误差源对精密定轨精度影响

精密定轨采用的DORIS、GPS和SLR三种精密定轨技术基本上是由星上设备和处理软件、地面跟

踪站、测量数据处理软件以及精密定轨软件四部分构成。影响轨道精度的主要各种误差源有：

1) 星上设备和地面跟踪站设备引起的测量误差。

2) 数据测量过程中的传播介质引起的误差,包括对流层、电离层、接收机钟差、接收机天线相位偏差等。

3) 卫星动力学数学模型对定轨精度的影响,主要指地球引力场模型、太阳辐射压力、地球辐射压、大气阻尼、固体潮、洋潮、相对论效应等模型不精确引起的误差和基本参数误差。

4) 计算算法对定轨精度的影响。

其中数据的测量误差主要受跟踪技术以及相应的跟踪设备的影响,对于DORIS和GPS由于全球密集的跟踪网以及精密的跟踪手段,测量精度能到几厘米量级,SLR虽然全球分布不是很密集并受天气的影响,但其测量精度最高,测量精度能到几个毫米量级。但是由于我国没有高度计卫星技术经验,星载GPS设备和激光设备是自主研制的,因此星载GPS接收机的测量技术需要研究和攻关。

由于我国是第一次发射高度计卫星,为了满足精密定轨指标,这四种主要误差源将分别予以攻关和研究。

4.2 动力学模型研究

根据卫星不同高度计算的各种摄动力数量级如图1所示,其中计算大气阻尼时考虑的是对低轨卫星的影响,暴露的温度为500~2000K。对于恒定的径向加速度 10^{-11} km/s²能使静止卫星的半长轴改变大约1m。这里考虑各种摄动力,包括加速度量级在 10^{-15} ~ 10^{-12} km/s²水平的太阳辐射压、地球辐射压(Albedo)、相对论效应以及固体潮。从中可以看到对于卫星轨道高度为900km时,卫星各种摄动力最大的就是地球引力二体作用力,其次为非球形引力的 J_2 项、 $J_{2,2}$ 等带谐项系数引起的摄动力,从量级上其他摄动力依次为日月引力、太阳辐射压、地球反照辐射压、相对论和火星引力,由于这里计算的是大气阻尼计算低轨卫星,实际上对于高度为900km的大气阻尼量级为 1.0×10^{-7} ,仅次于太阳引力。HY-2A卫星受到的各种摄动力量级如表2所示。

从表2中可以看出对HY-2A卫星精密定轨精度影响最大的还是卫星所受各种摄动力模型的不精确引起的,卫星所受到的摄动力影响最大的就是地球引力的不确定度,主要是因为地球重力场模型

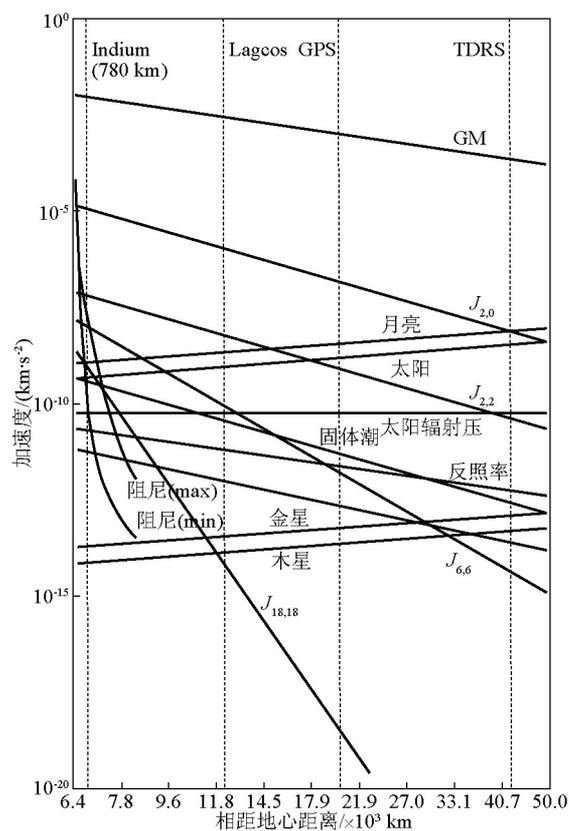


图1 卫星各种摄动力数量级大小

Fig.1 Order of magnitude of various perturbations of a satellite orbit

表2 HY-2A卫星主要摄动力量值大小

Table 2 Order of magnitude of various perturbations of HY-2A satellite orbit

力学因素	加速度/(m·s ⁻²)
中心引力	7.40
重力场 J_2 项	8×10^{-3}
重力场其他系数	6×10^{-5}
月球引力	1.4×10^{-7}
太阳引力	6.0×10^{-8}
火星引力	1.0×10^{-10}
大气阻力	1.0×10^{-7}
太阳光压	7.0×10^{-8}
地球反照辐射压	1.0×10^{-9}
广义相对论	5.0×10^{-9}
热辐射	1.5×10^{-9}
固体潮	3.0×10^{-7}
洋潮	3.0×10^{-8}

的不精确;其次就是大气阻尼和辐射压模型的不精确引起的误差;对于日月和行星引力摄动的误差源

来自GM(地心引力常数)误差;还有潮汐模型引起的误差;而其他因素影响较小。

通过分析和研究国外卫星摄动力模型发展状

况,结合我国定轨软件实际情况,设计了符合海洋二号卫星的各种动力学模型和观测模型,如表3所示。

表3 海洋二号卫星GPS/DORIS/SLR精密定轨策略
Table 3 GPS/DORIS/SLR solution for POD of HY-2A satellite

动力学模型		测量模型		主要待估参数	
重力场	EIGEN_GL04S-gins(150×150阶); GGM02C模型(150×150阶); GGM02(120×120阶)	DORIS RINEX3.0	由CNES提供,选取其中以10s开始的相位观测数据	初始轨道	位置和速度
N体摄动	JPL DE405	对流层延迟	Saastamoinen/Niell	大气阻力因子	1个/6h
大气阻力	大气密度模型DTM94	电离层延迟	双频改正	T、N方向经验摄动力	常数经验力、1天估计 1套周期性经验力
太阳光压和地球反照辐射	宏表面力模型	DORIS测站位置、速度 潮汐改正	ITRF2005 IERS2003	频偏参数及对流层折射校正因子	每站每圈解算1个
广义相对论	Schwarzschild	地球旋转参数	IERS Bulletin B		
固体潮	IERS2003	其他修正	质心偏差、天线安装位置偏差、 天线相位中心偏差		
海潮	GOT00				
积分器	Gauss-Jackson积分器				

4.3 计算方法分析

在卫星的精密定轨中,积分器的设计是一项基础工作。通过对卫星的运动方程进行积分就可以获得卫星的运动状态(位置和速度向量);同时积分器要完成变分方程的积分,获得卫星状态对轨道参数和力模型参数的偏导数用于轨道改进。定轨程序运行的大量时间是在积分过程,因此定轨计算中需要高精度的积分器, HY-2A卫星精密定轨积分器所采用的比较成熟的算法有: Runge-Kutta算法, Adams算法, Cowell算法, Krogh-Shampine-Gordon(KSG)算法。

4.4 数学模型和算法

GPS、DORIS和SLR三种跟踪技术都需要建立相应的观测模型和修正模型。对于GPS跟踪技术,需要对测距码和载波相位融合才能发挥其高精度优势, GPS预处理不仅需要根据GPS观测信号建立观测方程,根据选定的初始卫星状态向量和力模型进行轨道积分并获得状态转移矩阵,从而获得各种量的具体表达形式,同时还需要解决载波相位整周模糊度和周跳问题,这两个问题对于定轨精度影响很大; DOIRS观测系统需要建立平均距离变化率表达式和建立多普勒效应和位置基本关系; SLR跟踪

系统需要考虑观测站与卫星之间测量几何的解析表达式、测站坐标和建立对观测数系统误差进行修正的数学模型。

对于GPS、DORIS和SLR跟踪技术,其信号传播过程的介质必须予以考虑。SLR观测数据修正模型需要考虑由于潮汐摄动和板块运动引起的站心偏移,另外瞬时激光测距需要进行对流层、相对论效应、跟踪站站址偏置、劳伦兹效应、天线偏置的修正;对于GPS和DORIS系统需要进行钟差、电离层和天线偏置等修正。

4.5 双频载波相位GPS接收机

利用星载GPS数据进行精密定轨所处理的数据主要为载波相位观测值,因为定轨过程中要估计整周模糊度,算法复杂,因此,精密定轨同时要求有性能稳定的星载GPS接收机以获得稳定的双频观测值。对于星载GPS接收机关键技术包括以下几个方面:

- 1)星载GPS接收机时钟精度分析。
- 2)星载GPS接收机周跳及粗差性能分析。
- 3)星载GPS接收机的通道数、采样率、存储量和传输速率分析。

利用大量的模拟分析,得到适用于我国HY-2A

卫星精密定轨的双频 GPS 接收机主要性能指标如表 4 所示。

表 4 海洋二号卫星精密定轨的双频 GPS 接收机
主要性能指标

Table 4 The main performance of GPS receiver for
POD of HY-2A satellite

参数	指标
定时精度	1 ms
接收机频率稳定度(100 s 短稳)	10-10
L1 频率	±600 内 优于±7 mm ±650 内 优于±7 mm
L2 频率	±600 内 优于±7 mm ±650 内 优于±10 mm
天线相位中心稳定度	≤7 mm
L1-伪距	40 cm(1σ)
L2-伪距	40 cm(1σ)
L1 载波相位	2~5 mm(1σ)
L2 载波相位	3~8 mm(1σ)
1 个轨道圈内连续无周跳时间	不小于 15 min

5 在轨测试情况

HY-2A 卫星精密定轨在轨测试采用重叠弧段比较、独立轨道比较和 SLR 检核三种方法对卫星轨道进行验证,精密定轨两套定轨方案中等轨道星历(MOE)径向精度均优于 5 cm,远远满足径向 10 cm 设计指标要求;综合三种验证方法,GPS 结合激光测距精密定轨 MOE 径向精度在 3 cm 左右;DORIS 结合激光测距精密定轨 MOE 径向精度在 3~5 cm 左右。

6 结语

本文介绍了海面高度测量对精密定轨精度的

需求和精密定轨技术方案的设计,描述了 HY-2A 精密定轨方案关键技术,经过在轨测试,HY-2A 卫星精密定轨方案远远满足设计要求。

参考文献

- [1] Lerch F J, Marsh J G, Klosko, et al. Gravity model improvement for SEASAT[J]. Journal of Geophysical Research, 1982, 87:3281-3296.
- [2] Smith A J E, Visser P N A M, Ambrosius B A C, et al. Dynamic and non-dynamic ERS-1 radial orbit improvement from ERS-1/Topex dual-satellite altimetry[J]. Advances in Space Research, 1995, 16(12): 123-130.
- [3] Anderson P H, Aksnes K, Skonnoord H. Precise ERS-2 orbit determination using SLR, PRARE, and RA observations [J]. Journal of Geodesy, 1998, 72(7-8): 421-429.
- [4] Schutz B E, Tapley B D, Abusali, et al. Dynamic orbit determination using GPS measurements from Topex/Poseidon[J]. Geophysical Research Letters, 1994, 21:2179-2182.
- [5] Luthcke S B, Zelensky N P, Rowlands D D, et al. The 1-centimeter orbit: Jason-1 precision orbit determination using GPS, SLR, DORIS, and altimeter data [J]. Marine Geodesy, 2003, 26: 399-421.
- [6] Zelensky N P, Bertias J P, Lemoine F G. DORIS time bias estimated using Jason-1, Topex/Poseidon, and ENVISAT orbits[J]. Journal of Geodesy, 2006, 80(8-11):497-506.
- [7] Shum C K, Zhang B H, Schuz B Z, et al. Precise orbit determination for the Geosat exact repeat mission[J]. Journal of Geophysical Research, 1990b, 95:2887-2898.
- [8] Massmann F H, Neumayer K H, Raimondo J C, et al. Quality of the D-PAF ERS Orbits Before and After Inclusion of PRARE Data[C]//Proc.3rd ERS Scientific Symposium, ESA SP-414 Florence, Italy, 1997.
- [9] Kuijper D C, Ambrosius B A C, Wakker K F. Spot-2 and Topex/Poseidon precise orbit determination from DORIS Doppler tracking[J]. Advances in Space Research. 1995, 6:45-50.
- [10] Tapley B D, Ries J C, Davis G W, et al. Precise orbit determination for Topex/Poseidon[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99:24,384-24,404.
- [11] Cerri L, Bertias J P, Bertiger W I, et al. Precision orbit determination standards for the Jason series of altimeter missions[J]. Marine Geodesy, 2010, 33(S1):379-418.
- [12] Willy Bertiger, Shailen D D, Angie Dorsey, et al. Sub-centimeter precision orbit determination with GPS for ocean altimetry [J]. Marine Geodesy, 2010, 33(S1):363-378.

(下转 43 页)