

文章编号: 1001-1595(2011)S 0034-05

## GPS 天线相位中心校正对低轨卫星精密定轨的影响研究

胡志刚<sup>1,2</sup>, 赵齐乐<sup>2</sup>, 郭 靖<sup>1,2</sup>, 刘经南<sup>2</sup>

1. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉大学 卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉 430079

### Research on Impact of GPS Phase Center Variation on Precise Orbit Determination of Low Earth Orbit Satellite

HU Zhigang<sup>1,2</sup>, ZHAO Qile<sup>2</sup>, GUO Jing<sup>1,2</sup>, LIU Jingnan<sup>2</sup>

1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: All the LEO mission officials have published precision orbit determination results without phase center variation (PCV) information. In fact, PCV error is one of the main source of errors for precise orbit determination (POD). In this paper, the PCV error model is established and based on GRACE real data, the PCV is gained directly from estimated parameters. Finally, some evaluations are conducted with K-band ranging data and satellite laser ranging data.

Key words: phase center variation; precise orbit determination; low earth orbit satellites; antennas; GPS

摘 要: 执行各种低轨卫星任务的官方在公布定轨结果的同时并没有公布星载接收机的天线相位中心校正(PCV)信息, 而 PCV 误差是星载 GNSS 精密定轨必须考虑的主要误差源之一。以 GRACE 卫星任务为例研究 PCV 误差对低轨卫星精密定轨的影响, 利用 GPS 观测数据直接估计与相位误差有关的天线相位偏差(PCO)和 PCV 参数, 然后利用 K 波段测距系统和卫星激光测距仪数据进行定轨评定。

关键词: 天线相位中心校正; 精密定轨; 低轨卫星; 天线; GPS

中图分类号: P228

文献标识码: A

## 1 引 言

自美国成功研制 GPS 系统并投入运营以来, 该系统以其全天候、全球分布、高精度定位定轨等优点已经渗透入各个应用领域并取得了很好的效果。精密定轨方面已取得一系列成绩, 文献[1]利用 GPS 数据对 CHAMP 卫星进行精密定轨并获得了 5 cm 的定轨结果, 文献[2]利用 GPS 和 DORIS 系统得到 Jansorr 1 低轨卫星 1 cm 的高精度结果, 文献[3]对孪星 GRACE 进行了研究并获得径向 1 cm, 切向和法向 3 cm 的定轨结果。国内, 文献[4]利用自主研究的 PANDA 精密定轨软件对 CHAMP 卫星定轨也获得了径向切向法向 2~3 cm 定轨精度的可喜成果。高精度的定轨结果对于重力场的反演十分重要, 2009 年发射的 GOCE 卫星要求定轨结果为 1 cm, 这对精密定轨任务提出了更高的要求, 迫使人们进一步对影响星载 GNSS 定轨精度的各种误差源进行深入研究。其中, 对流层、电离层等可以通过模型或观测值组合较好地消除或削弱, 剩下的主要误差包括

观测噪声、天线相位中心变化(PCV)、多路径效应等。后两者误差很难通过观测值组合和作差的方式削弱, 在精密定轨中常常被忽视。然而, 文献[5-6]的研究表明 PCV 的对定轨精度有明显影响, 因此 PCV 是星载 GNSS 精密定轨必须考虑的主要误差源之一。遗憾的是搭载于低轨卫星上的 GPS 接收机不属于测地型接收机并且也没有这类天线的任何 PCV 改正信息。没有考虑 PCV 带来的误差影响必然会降低星载 GNSS 精密定轨的精度。因此, 本文就天线相位中心变化对低轨卫星精密定轨的精度影响进行了深入研究, 并使用参数估计的方法直接估算天线相位中心 PCV 值, 将 PCV 误差从观测模型误差中分离出来。

## 2 天线相位中心校正方法

### 2.1 相位中心校正模型

GNSS 相位观测值是通过测量卫星发射天线发射时刻相对于接收机接收时刻各自的瞬时相位中心得到<sup>[7-8]</sup>。然而其瞬时相位中心随着高度角、

方位角、卫星信号强度的变化而变化并且跟频率有关, 在实际数据处理中无法得到卫星和接收机的瞬时相位中心的具体位置, 因而引入一个平均相位中心来描述瞬时相位中心的平均值, 该值相对于接收机参考点的差距称为天线相位偏差 (PCO)。这样, 如果将单个观测值的瞬时相位中心与平均相位中心相比较得到的偏差值就称为天线相位中心变化 (PCV)。设 PCO 的矢量为  $a$ , 卫星-接收机间的矢量为  $r_0$ , 天线相位中心的改正模型由 PCO 和 PCV 两部分组成。

$$\Delta\Phi(\alpha, z) = \Delta\text{PCO} + \Delta\text{PCV} = ar_0 + \Delta\text{PCV}(\alpha, z, f_i), \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

式中,  $\alpha, z, f_i$  分别为方位角、天顶距或高度角, 信号频率;  $\Delta\text{PCV}(\alpha, z, f)$  为与方位角和高度角和频率有关的函数。

利用式(1)就实现了瞬时相位中心到天线参考点 (ARP) 的相位伪距近似改正。该式中的 PCO 矢量可以任意选取, 但与其对应的 PCV 必须是自洽的。

### 2.2 LEO PCV 估计方法

对于星载 GNSS 接收机, 首先建立天线参考系, 假设式(1)中的 PCO 相对于天线参考系是固定不变的, 则 PCO 的值可以通过参数估计得出。PCV 的计算方法一般都采用一个相对于天线参考系在水平方向和垂直方向都连续的周期函数来模拟与卫星方位角和高度角相关的 PCV。文献[9]使用球谐函数来模拟 PCV。

$$\Delta\text{PCV}(\alpha, z, f_i) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_{nm}(\cos 2z) (a_{nm} \cos m\alpha + b_{nm} \sin m\alpha) \quad (2)$$

式中,  $P_m(\cos 2z)$  为勒让德函数;  $m, n, a, b$  分别为次数、阶数和待估参数。

该方法的优点是它具有较好的物理意义, 但该方法所需要估计的系数较多, 计算量很大, 一般的计算机很难承受。一个比较简单并且容易实现的方法就是使用分段线性函数来描述与方位角和高度角有关的 PCV<sup>[6, 9]</sup>。其基本计算模型如下。

假设 PCV 模型由不同的网格点构成, 每个格网均由 4 个待求 PCV 点组成, 如图 1 所示, PCV 在格网待求点 A、B 具有相同的高度角和不同的方位角, 而 A、C 两点具有不同的高度角但具有相同的方位角。假设观测时刻的高度角和方位角位于 ABCD 的网格内, 则 P 点的 PCV 值采用线性内插得到

$$\text{PCVP} = (1 - \alpha)(1 - \beta)\text{PCVA} + \alpha(1 - \beta)\text{PCVB} + \alpha\beta\text{PCVC} + (1 - \alpha)\beta\text{PCVD} \quad (3)$$

式中,  $\alpha = (a - a_1)/(a_2 - a_1)$ ;  $\beta = (z - z_1)/(z_2 - z_1)$ 。

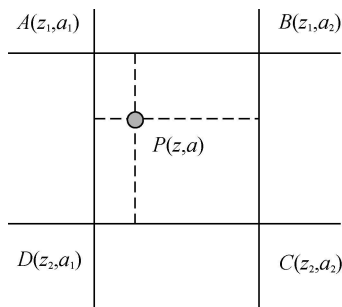


图 1 PCV 网格点线性插值示意图

Fig. 1 PCV grids linear interpolation

这两种方法所得到的 PCV 值差别不大, 但后一种方法更能方便地植入应用软件中, 本文将采取这种方法。

### 3 数据处理

#### 3.1 GNSS 精密定轨处理策略

GRACE 卫星搭载有高质量的 GNSS 星载接收机, 使用 GPS、SLR 系统和 K 波段测距系统进行跟踪观测, 并且所有这些观测值都能够免费获取, 因此借助武汉大学自主研制的 PANDA 软件平台, 以 GRACE 卫星作为研究载体来分析 PCV 对低轨卫星精密定轨的影响。

笔者采取三种数据处理方案来分析天线相位中心变化对 GNSS 精密定轨的影响。不估计 PCO 和 PCV 而直接进行定轨 (方案 1); 直接精密定轨且仅考虑 PCO (方案 2); 先估计 PCO 值然后将其作为强约束再估计 PCV (方案 3)。分别对这三种方案精密定轨处理后, 然后与精度较高的激光测距系统 (SLR) 和 KBR 跟踪数据进行比较分析来验证 PCV 模型对精密定轨的精度影响大小。

#### 3.2 观测模型和动力模型的建立

本文采用分段线性函数建立 PCV 模型。为了能够较为准确地估计 PCV 值, 本文采用  $5^\circ \times 5^\circ$  网格点进行线性分段模拟, 共有 1 368 个参数需要估计, 因此必须保证足够数量的观测值并尽可能地覆盖整个天线零高度角以上的整个视场。首先采用 2007 年 3 月共 31 d 的数据采用最小二乘的方法获得 PCO 的估值, 然后将 PCO 作为已知值估计参数 PCV。

由于低轨卫星仍未摆脱大气阻力和电离层的影响,所以无法对单个频率上的 PCO 和 PCV 进行估计,只能采用相位 LC 组合来消除无电离层的影响;大气阻力通过参数估计的办法加以消除;为了精确确定 LEO 卫星的姿态,使用 GRACE 姿态数

据;太阳光压模型所需的电磁参数和太阳辐射流等。与其他低轨卫星动力学环境类似,GRACE 动力模型可参考低轨卫星 CHAMP 精密定轨处理策略<sup>[4]</sup>。其余部分参数设置如表 1 所示。

表 1 数据处理参数设置

Tab. 1 Data processing parameter setting

	方案 1	方案 2	方案 3
观测量	LCPC 组合	LCPC 组合	LCPC 组合
PCO/PCV	不估计 PCO 和 PCV	仅估计 PCO	先估计 PCO 然后估计 PCV
观测时段(年积日)	24 h(2007060-2007090)	24 h(2007060-2007090)	24 h(2007060-2007090)
LEO 轨道坐标和速度		作为未知数估计	
采用率		30 s	
GPS 精密星历和钟差		不估计,采用 CODE 分析中心产品	
经验力模型	按 90 min 分段估计 6 个周期性经验加速度参数,6 h 估计一个大气阻力系数		
重力场		EIGEN_GRACE02S 120×120 阶	

## 4 定轨结果分析

### 4.1 观测值覆盖情况

在估计 PCV 时,按高度角和方位角分割的网格越多所估计的参数就越多,为了避免法方程奇异,观测值应尽量覆盖所建立的 PCV 模型的整个区域,亦即各个网格点上都有观测数据。图 2 显示了 GRACE A 星观测时间为 24 h 的观测值覆盖情况(高度截止角为 0°)。

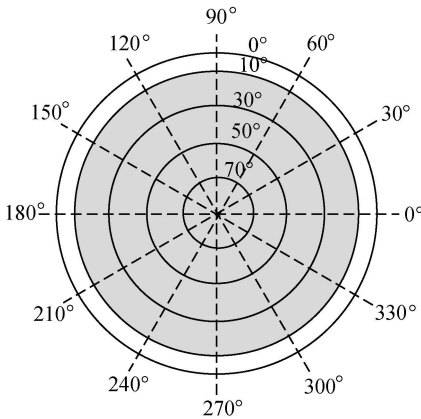


图 2 GRACE A 24 h 观测值覆盖情况(2007060)

Fig. 2 GRACE A 24 h observation distribution (2007060)

由图 2 可知,在连续观测 24 h 的观测值中,绝大部分观测值集中在高度角为 10° 以上,这部分观测值基本覆盖了 10° 以上的 PCV 模型的网格区域,但对于 5°×5° 网格点来说,仍有部分区域没有观测值而出现“空洞”需要通过多天的观测数据加以弥

补。由图 2, 10° 以下的观测值非常少,笔者对参与计算的连续观测 31 d 数据进行分析,发现各天的观测值分布很相似,10° 以下的观测值都非常少,这样少的观测数据对于 0~10° 之间的 PCV 参数的估计十分不利,为避免法方程出现奇异,对所估计的 PCV 参数进行了较松弛的约束。

### 4.2 观测值残差分析

观测值残差包含模型化误差和未被模型化的误差。因此观测残差的均方差计算结果的内符合精度检验主要方法之一<sup>[4]</sup>。当 GNSS 精密定轨采用的观测模型和力模型与实际情况十分吻合时,观测残差接近噪声水平<sup>[10]</sup>。根据式(1),对于所建立的 PCV 模型,有

$$\Delta PCV(r_0) = PCV_i(r_0) - PCV_m(r_0) \quad (4)$$

式中,  $PCV_i$ 、 $PCV_m$  表示实际 PCV 值和 PCV 模型值。这两者的差值将直接反映在线性化后的观测残差中

$$\Delta(\Phi_{obs} - \Phi_m) = \Delta PCV(r_0) \quad (5)$$

未被模型化的  $\Delta PCV(r_0)$  值将会部分残留在事后处理的观测值残差中,该值随高度角和方位角变化关系在简化动力学定轨的观测值残差中尤为明显<sup>[11]</sup>。因此有学者直接从观测残差中拟合提取 PCV 值<sup>[5]</sup>,该方法计算简单,非常容易编程实现,但实际上反映在残差中的误差并非只有未被模型化的 PCV 值,所以该方法得到的 PCV 值不一定与实际 PCV 值相符。本文按上述三种方案进行了精密定轨处理,根据图 3 所示,采用 CODE 分析中心的精密钟差和精密星历进行

GRACE 精密定轨, 直接采用 GRACE 观测文件给出的 ENU 值并进行改正后, 将 GRACE 卫星轨道和钟差等参数作为参数并不估计 PCO 和 PCV 时, 相位观测残差平均为 8.5 mm, 这说明模型化不太理想, 可能原因是比较大的误差项未考虑或者观测值文件中给出的 ENU 值与 CODE 分析中心的精密钟差和星历不一致。当把 GRACE 卫星的 PCO 作为未知数估计后的相位残差 RMS 值约为 4.7 mm, 减少了 45%; 再将 PCV 作为参数估计后其残差进一步减小约 0.5 mm。因此正如所期望的, 以上三个方案进一步证实了式(5)分析的正确性。同时还说明 PCO 和 PCV 值以系统性误差的形式存在于观测值中, 图中清晰看出方案 1 和方案 2 的残差 RMS 存在约为 4 mm 的系统误差。另一方面, 相位残差均方差达到 4 mm 的水平也说明考虑相位误差校正后的观测模型和力模型与实际情况吻合得较好, 未被模型化的误差进一步减小。

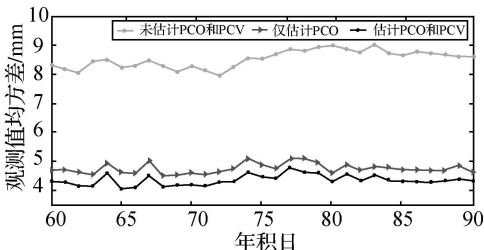


图 3 观测值残差 RMS 统计

Fig. 3 Observation residual RMS statistics

### 4.3 精密定轨结果评价与分析

#### 4.3.1 与 JPL 精密轨道比较

对精密定轨结果的评价除了观测残差分析外, 另一个内符合精度方法是跟其他机构的定轨结果进行比较。JPL 发布了官方的 GRACE 精密定轨结果, 其轨道精度在 2~ 3 cm 量级并经过了广泛的验证<sup>[10]</sup>, 因此本文的定轨结果与 JPL 进行了比较。

以 GRACE A 星为例分析对象, GRACE B 星也有类似结果。与 JPL 的精密轨道相比, 当未估计 PCO 和 PCV 值时, 径向误差和法向误差很大, 分别达到 32 mm 和 25 mm。这主要是因为未模型化的相位误差在 GPS-GRACE 视线方向的影响较大, 而切向方向较弱的几何约束使得很容易被较大的模型误差影响。法向 RMS 最小, 仅为 15 mm, 似乎受模型化误差的影响不大, 这也可以从另外两个方案的比较结果得到证实。估计相位误差 PCO 和 PCV 后, 定轨精度得到明显提高,

尤其是径向和切向, 提高了 5 mm~ 10 mm, 这显然是估计 PCO 和 PCV 后相位误差被大大削弱的结果。是否估计 PCV 得到的定轨结果影响不大, 估计 PCV 后定轨结果与 JPL 相比反而有所变差。可能的原因是 JPL 处理 GRACE 数据时没有 PCV 的影响, 而使得其定轨结果仍包含 PCV 误差的影响或者在估计 PCV 时引入过多的参数而使得解不够稳定导致的。

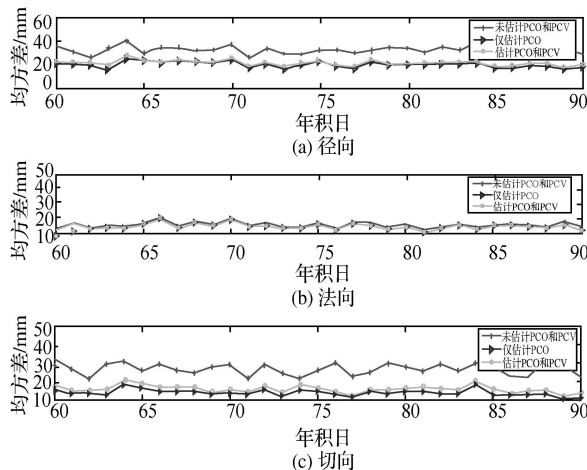


图 4 定轨结果与 JPL 轨道比较

Fig. 4 Comparison between POD and JPL results

#### 4.3.2 与 K 波段测距比较

GRACE 卫星配备了高精度的 K 波段测距系统(KBR), 虽然该系统只能测得 GRACE 双星的相对距离但其观测精度达到  $10^{-6}$  量级, 故 KBR 是检验定轨精度的重要方法之一。如图 5 所示, 三种定轨结果与 KBR 做差的标准差 STD 分别为 2.95 mm、1.80 mm 和 1.46 mm。估计 CPO 后, 轨道相对距离精度提高 1.15 mm; 考虑 PCV 估值后精度进一步提高 0.4 mm。结果说明考虑 PCO 和 PCV 对 GRACE 基线的精度有所提高。

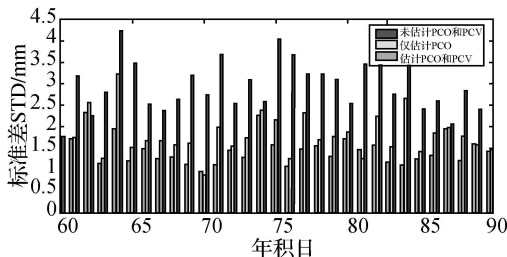


图 5 KBR 残差 STD 统计

Fig. 5 KBR residual STD statistics

#### 4.3.3 与激光测距比较

GPS 内符合精度并不能全面反映定轨结果的准确度, 因此借助外部更加精密的测量手段来

评价定轨精度显得更为客观。使用激光测距 (SLR) 数据来评价本文的定轨结果。SLR 是独立于 GPS 的精密测距系统, 其测距精度很高, 是目前卫星定轨主要的外部检核手段。

利用全球 SLR 站处理 31 d 的定轨数据得到的均方差值分布情况如图 6。当估计 PCO 和 PCV 时定轨精度明显高于不估计 PCO 和 PCV (约为 2.7 cm); 而仅估计 PCO 和估计 PCO、PCV 两种方案的结果十分接近, 分别为 2.10 cm 和 2.0 cm。SLR 残差结果说明前面分析的 JPL 和 KBR 的结果基本与实际情况相吻合。

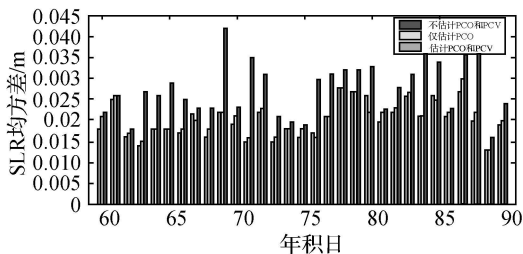


图 6 SLR 残差 RMS 统计图

Fig. 6 SLR residual RMS statistics

## 5 结论

本文首先阐述了估计天线相位中心的基本模型, 然后利用 31 d 的 GRACE 实测数据计算 PCO 和 PCV, 结果表明估计 PCO 对 GRACE 定轨结果有明显的改进。内符合精度方面, 观测残差降低 40%; 与 JPL 公布的精密星历相比, 估计 PCO 对法向精度影响不大而对径向和切向有明显的改善, 当估计 PCO 后三个方向的精度基本一致。外符合精度方面, 高精度的 KBR 数据残差结果表明估计 PCO 和 PCV 后 GRACE 双星基线结果有较为明显的改进, 达到 1.46 mm; 最后通过激光测卫数据对定轨结果进行了比较, 进一步验证了估计相位误差能够改进定轨结果。

## 参考文献:

- [1] KUANG D, BARSEVER Y, BERTIGER W, et al. Precise Orbit Determination for CHAMP Using GPS Data from BlackJack Receiver [EB/OL]. [2011-01-03]. <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/12198/1/01-0133.pdf>.
- [2] HAINES B, BERTIGER W, DESAI S, et al. Initial Orbit Determination Results for Jason 1: towards a 1-cm Orbit [C] // Proceedings of ION GPS 2002. Oregon: [s. n.], 2002.
- [3] KANG Z, TAPLEY B, BETTADPUR S, et al. Precise

Orbit Determination for the GRACE Mission Using Only GPS Data [J]. *Journal of Geodesy*, 2006, 80(6): 322-331.

- [4] ZHAO Qile, LIU Jingnan, GE Maorong, et al. Precision Orbit Determination of CHAMP Satellite with cm-level Accuracy [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(10): 879-882. (赵齐乐, 刘经南, 葛茂荣, 等. CHAMP 卫星 cm 级精密定轨 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2006, 31(10): 879-882.)
- [5] MONTENBRUCK O, GARCIA-FERNANDEZ M, YOON Y, et al. Antenna Phase Center Calibration for Precise Positioning of LEO Satellites [J]. *GPS Solutions*, 2009, 13(1): 23-34.
- [6] JÄGGI A, DACH R, MONTENBRUCK O, et al. Phase Center Modeling for LEO GPS Receiver Antennas and Its Impact on Precise Orbit Determination [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(12): 1145-1162.
- [7] LI Zhenghang, HUANG Jinsong. GPS Surveying and Data Processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005. (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.)
- [8] CHENG Pengfei, CAI Yanhui, WEN hanjiang, et al. GNSS Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo and More [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2007. (程鹏飞, 蔡艳辉, 文汉江, 等. 全球卫星导航系统 GPS, GLONASS, Galileo 及其他系统 [M]. 北京: 测绘出版社, 2007.)
- [9] ROTHACHER M, SCHAER S, MERVART L S, et al. Determination of Antenna Phase Center Variations Using GPS Data [C] // Proceedings of the IGS Workshop. Potsdam: IGS, 1995.
- [10] ZHOU Xiaoqing, HU Zhigang, ZHANG Xinyuan. Discussion on POD Accuracy Evaluation for Satellite-borne LEO Satellite [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(11): 1342-1345. (周小青, 胡志刚, 张新远. 低轨卫星星载 GNSS 精密定轨的精度检核方法 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2010, 35(11): 1342-1345.)
- [11] JÄGGI A, HUGENTOBLE U, BOCK H, et al. Precise Orbit Determination for GRACE Using Undifferenced or Doubly Differenced GPS Data [J]. *Advances in Space Research*, 2007, 39(10): 1612-1619.

(责任编辑: 雷秀丽)

收稿日期: 2011-01-10

修回日期: 2011-03-22

第一作者简介: 胡志刚(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向是星载 GNSS 低轨卫星精密定轨。

First author: HU Zhigang (1982—), male, PhD candidate, majors in precise orbit determination for space borne GNSS low earth orbiting satellites.

E-mail: zhigang.hu@whu.edu.cn