

# 利用非差观测量确定导航卫星精密轨道与钟差的方法研究<sup>\* 1</sup>

刘伟平 郝金明 于合理 田英国  
(信息工程大学导航与空天目标工程学院,郑州 450001)

**摘 要** 研究利用非差观测量确定导航卫星精密轨道和钟差的原理和实现方法,并结合 GPS 实测数据,对其精密定轨和钟差确定精度进行了分析讨论,结果表明:利用全球均匀分布的 30 余个测站一天的观测数据,通过非差数据处理,定轨精度 R、T、N 方向能够达到 0.032 m、0.084 m、0.078 m,钟差确定精度能够达到 0.18 ns。这一结果与传统的双差法定轨结果精度相当,但无需复杂的组差运算,解算中不损失观测信息,仅通过一步解算即可同时获得高精度的轨道和钟差产品,在导航卫星精密定轨中具有较好的应用前景。

**关键词** 导航卫星;精密定轨;钟差确定;精度分析;iGMAS

**中图分类号**:P207;P227 **文献标识码**:A

## A METHOD FOR DETERMINING PRECISE ORBIT AND CLOCK OFFSET OF NAVIGATION SATELLITES USING ZERO-DIFFERENCE OBSERVATION

Liu Weiping ,Hao Jinming ,Yu Heli and Tian Yingguo

(College of Navigation and Aerospace Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001)

**Abstract** A method for determining precise orbit and clock offset of navigation satellites using zero-difference observation was presented in the paper. Experimental results based on real GPS observation show that when one-day observation of 30 stations all over the world is used, the precision of radial, tangential and normal direction is 0.032 m, 0.084 m, and 0.078 m respectively, and clock offset is 0.18 ns. By comparison of the double-difference method, the method is easier to operate, and the condition needed is more simple (just one step). So the method has better application prospect in the navigation satellite precise orbit determination.

**Key words**: navigation satellites; precise orbit determination; clock error determination; precision analysis; iGMAS

## 1 引言

导航卫星精密定轨和钟差确定的研究起步于 20 世纪 70 年代,并随着 GPS 的建成运行,得到了持续的发展<sup>[1-3]</sup>。特别是 90 年代 IGS 成立以来,轨道和钟差的确定精度不断取得突破,目前,IGS 最终轨道精度优于 2.5 cm,最终钟差精度优于 0.075

ns<sup>[4,5]</sup>。进入 21 世纪以来,我国按照“三步走”战略,开始建立具有自主知识产权的北斗卫星导航系统(BDS)。系统从 2012 年底起正式提供亚太区域服务,目前正朝着全球组网的方向发展<sup>[6]</sup>。为了促进北斗的建设和推广应用,相关单位正在积极筹建全球连续监测评估系统(iGMAS, international GNSS Monitoring and Assessment),精密轨道与钟差确定是

\* 收稿日期:2013-05-09

基金项目:中国第二代卫星导航系统重大专项(GFZX0301040308);信息工程大学博士研究生学位论文创新基金(S201307)

作者简介:刘伟平,男,1986 年生,博士研究生,研究方向为卫星精密定轨定位。E-mail:lwpcxy@sina.com

其核心业务<sup>[7]</sup>。采用何种体制方法进行精密定轨和钟差估计,是值得研究的问题。

根据观测量组差方式不同,导航卫星精密定轨和钟差确定的方法可分为双差处理方法和非差处理方法。双差处理方法可消除或减弱大部分误差源的影响,并保持模糊度的整数特性,在一些大型 GNSS 数据处理软件(如 Bernese、GAMIT 等)中得到了广泛应用<sup>[8,9]</sup>,特别是在 GPS 系统建设初期相关误差模型还不甚完善时,发挥了重要作用。近些年来,随着误差模型的不断精化以及观测数据质量的不断改善,非差处理方法也逐渐引起了研究人员的重视,相比双差处理,非差处理不损失观测信息,观测量间的独立性较好,可规避复杂的相关权问题,能够同时估计轨道和钟差,在算法实现上更加简单明了,近几年发展起来的软件系统(如 EPOS、PANDA 等)大多采用了非差处理方法<sup>[10,11]</sup>。

为了进一步探讨非差数据处理技术在导航卫星精密定轨和钟差确定中的实际应用效果,为我国北斗卫星导航系统精密轨道与钟差确定的体制方法及软件系统研制提供参考,本文研究了利用非差观测量确定导航卫星精密轨道和钟差的方法,给出了数据处理的基本原理及具体实现策略,并结合 GPS 实测数据,对其处理精度进行了初步分析。

## 2 方法原理及实现

由于初始模糊度与钟差参数不可分离,如果仅利用相位观测数据,只能估计钟差相对于参考历元的变化值,本文通过联合使用伪距和相位数据来解决这一问题,为进一步提高处理精度,还对伪距进行了相位平滑,并在处理中,对相位和伪距进行了消电离层组合,基本观测方程为:

$$PC(t) = (f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2) / (f_1^2 - f_2^2) =$$

$$\rho(t) - cdt^s(t) + cdt_r(t) + d\rho_{\text{trop}}(t) + \varepsilon_p \quad (1)$$

$$LC(t) = (f_1^2 \Phi_1 - f_2^2 \Phi_2) / (f_1^2 - f_2^2) =$$

$$\rho(t) - cdt^s(t) + cdt_r(t) + d\rho_{\text{trop}}(t) + N \cdot \lambda_c + \varepsilon_\phi \quad (2)$$

式中, $t$  表示观测历元, $f_1, f_2$  表示双频观测量的两个频率, $P_1, P_2$  表示伪距观测量, $\Phi_1, \Phi_2$  表示相位观测量, $\rho(t)$  表示星地几何距离, $dt^s(t), dt_r(t)$  分别表示卫星钟差和接收机钟差, $d\rho_{\text{trop}}(t)$  表示对流层延迟, $N$  表示相位模糊度, $\lambda_c$  表示消电离层组合相位观测量的波长, $c$  表示光速, $\varepsilon_p, \varepsilon_\phi$  表示其他未模型化的误差。

对式(1)、(2)进行线性化,有

$$PC(t) = \rho(t, \mathbf{X}(t)) + \mathbf{H}\delta\mathbf{X}_0 - cdt^s(t) + cdt_r(t) + d\rho_{\text{trop}}(t) + \varepsilon_p \quad (3)$$

$$LC(t) = \rho(t, \mathbf{X}(t)) + \mathbf{H}\delta\mathbf{X}_0 - cdt^s(t) + cdt_r(t) + N \cdot \lambda_c + d\rho_{\text{trop}}(t) + \varepsilon_\phi \quad (4)$$

式中: $\mathbf{H} = \frac{\partial f(t, \mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}(t)} \boldsymbol{\Phi}(t, t_0)$ ,  $\boldsymbol{\Phi}(t, t_0)$  为状态转移矩阵,通过求解变分方程获得; $\mathbf{X}(t)$  为卫星在  $t$  时刻的状态,通过求解卫星运动微分方程获得; $\delta\mathbf{X}_0$  为参考时刻卫星状态改正量,包含力学参数(如光压参数);其他符号意义同上。其中,轨道参数  $\delta\mathbf{X}_0$ 、钟差参数  $dt^s(t), dt_r(t)$  和对流层参数  $d\rho_{\text{trop}}(t)$  为待估参数。需要说明的是,文中将对流层分成干、湿分量分别处理,前者利用模型进行改正,后者作为参数进行估计。

根据最小二乘批处理原理,利用线性化的观测方程即可进行轨道和钟差参数的估计。处理中,在整个时段上只估计一组轨道参数;钟差参数作为历元参数在每个观测历元都要进行估计;每 4 小时估计一组对流层天顶湿分量。为了提高处理效率,首先对大量的钟差历元参数进行预消除,待完成轨道估计之后,再回代求解钟差参数。整个数据处理流程见图 1。

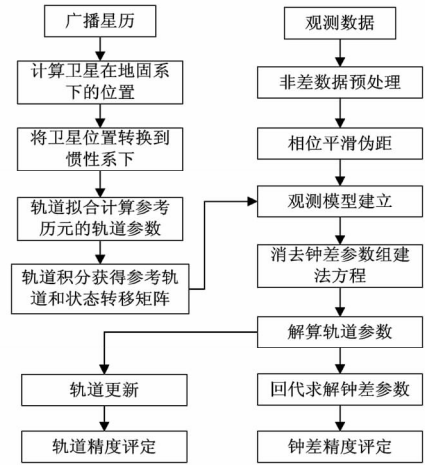


图1 数据处理流程图

Fig. 1 Flow chart of data processing

## 3 算例

为了验证该方法的实际处理效果,采用 2010 年 5 月 12 日全球均匀分布的 34 个跟踪站一天的 GPS 观测数据进行实验,原始采样为 30 s。测站分布见图 2,具体的处理策略见表 1。

解算的轨道与 IGS 最终星历进行对比,以均方根误差(RMS, Root Mean Square)为标准考察定轨精度;解算的钟差与 IGS 最终钟差进行对比,以确定钟差估计精度。为避免由于解算钟差与 IGS 最终钟差的参考钟选取方法不同而引入系统差,使用文献[12]所提出的“二次差比对”方法来评定钟差精度,

其方法为:首先选择同一个参考卫星,将解算钟差与 IGS 最终钟差分别与各自的参考卫星钟差作差,消除基准钟不同对钟差结果的影响,而后再在各自消除基准钟影响的计算结果之间作差,所得的“二次差”能够较好地反应钟差参数的估计效果。此外,由于钟差系统差部分对精密定位的影响可以被模糊度参数吸收,因此考察钟差解算结果的波动情况更具实际意义。这里采用“二次差”的标准差 (STD, Standard Deviation) 作为考察钟差解算效果的标准。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i \Delta_i}{n}}$$

(5)

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})(\Delta_i - \bar{\Delta})}{n}}$$

(6)

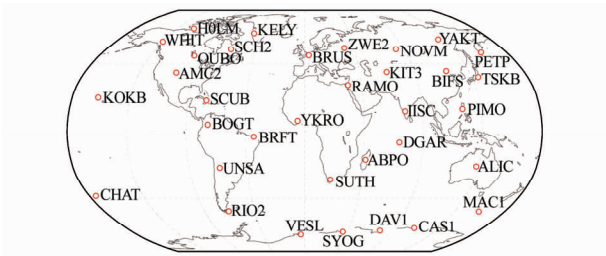


图 2 测站分布图  
Fig. 2 Distribution of Stations

表 1 数据处理策略

Tab. 1 Strategy of data processing	
类别	模型与参数
观测量	非差消电离层组合 相位和伪距观测量
卫星高度截止角	3°
数据处理采样率	180 s
地球重力场	JGM3 10 × 10 阶
N 体引力	JPL DE200(日、月)
固体潮	TIDE2000
海潮	CSR30
相对论效应	IERS 2003
太阳光压	ECOM 模型
测站坐标	IGS05, 固定
对流层误差改正	SAAS + GMF 干分量改正; 每 4 h 估计一组天顶湿分量
电离层误差改正	消除
相对论改正	广义相对论效应
潮汐改正	IERS2003
地球自转形变	IERS2003
相位中心	IGS05 模型
接收机钟差	历元参数估计
卫星钟差	历元参数估计
模糊度参数	浮点解
轨道动力学参数	6 个卫星状态参数 + 9 个光压参数

式中,  $\Delta_i$  表示第  $i$  历元的误差;  $\bar{\Delta}$  表示所有误差的均值;  $n$  表示历元总数。

图 3 给出了各卫星 R、T、N 方向的定轨均方根误差 (RMS); 图 4 给出了 G02 星 R、T、N 方向的定轨误差变化情况, 表 2 对 G02 星 R、T、N 方向的定轨误差进行了统计, 其他卫星的情况与 G02 星类似, 不再逐一给出。

由图 3 可见, R 方向的定轨精度普遍高于 T、N 方向, 这是由于 GNSS 观测量对 R 方向轨道运动更为敏感所致, 经计算, 所有卫星 R、T、N 方向的平均 RMS 为 0.032 m、0.084 m、0.078 m。由图 4 的结果可见, 卫星定轨误差具有周期性, 这一周期性与卫星运行周期是一致的, 不同卫星的定轨精度存在一定差异, 可能与各个卫星的观测数据质量有关; 由表 2 对 G02 星定轨结果的统计可见, G02 星轨道精度在厘米量级, 定轨结果良好。

选择 G02 星的星钟作为参考钟, 图 5 给出了各

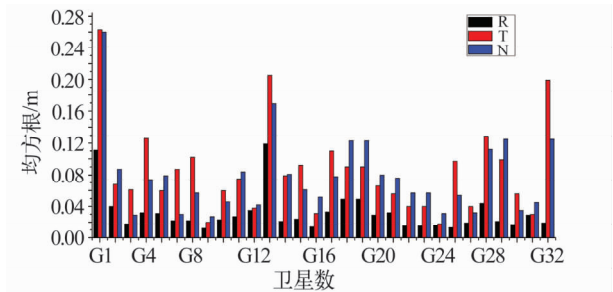


图 3 精密定轨结果  
Fig. 3 Results of precise orbit determination

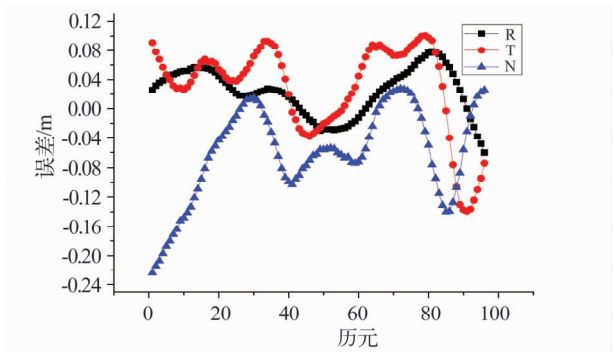


图 4 G02 星定轨结果  
Fig. 4 Results of orbit determination for G02

表 2 G02 星定轨结果统计表 (单位: m)

Tab. 2 Statistics of orbit determination for G02 (unit: m)			
	R	T	N
最大值	0.079	0.101	0.028
最小值	-0.060	-0.139	-0.224
平均值	0.023	0.029	-0.060
均方根	0.040	0.068	0.087

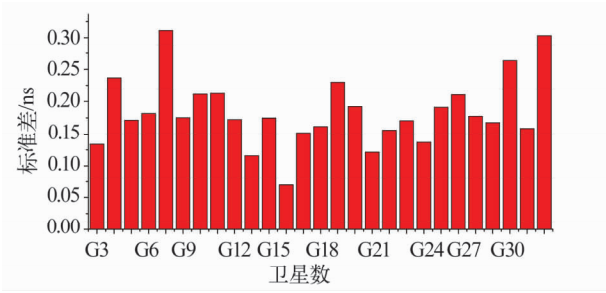


图 5 钟差确定结果

Fig. 5 Results of clock offset determination

卫星钟差“二次差”的标准差( STD)。由图 5 可见, 各卫星钟差确定结果精度比较均匀, 所有卫星钟差“二次差”的平均 STD 为 0.18 ns。

4 结论

利用全球均匀分布的 30 余个测站一天的观测数据, 通过非差数据处理, 定轨精度 R、T、N 方向分别达到 0.032 m、0.084 m、0.078 m, 钟差确定精度达到 0.18 ns。需要说明的是, 本文结果与 IGS 最终精密产品的精度还有一定差距, 主要原因是本文使用的测站数量较少且定轨弧段较短, 后续仍需进一步研究增加测站数目及多天轨道合成的相关处理方法。

致谢 感谢全球连续监测评估系统(iGMAS)信息工程大学分析中心对本文工作的帮助和支持!

参 考 文 献

1 Yunck T P, Wu S C and Wu J T. Strategies for sub-decimeter satellite tracking with GPS[ A ]. Proceedings of IEEE position, location and navigation symposium 1986[ C ]. Nevada: 1986.

2 Beutler G, et al. Extended orbit modeling techniques at the

CODE processing center of the international GPS service for geodynamic( IGS ): theory and initial results[ J ]. Manuscripta Geodaetica, 1994, ( 19 ): 367 – 386.

3 葛茂荣. GPS 卫星精密定轨理论及软件研究[ D ]. 武汉测绘科技大学, 1995. ( Ge Maorong. Study on theory and software of precise orbit determination for GPS satellite [ D ]. Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1995 )

4 IGS. International GNSS Service [ ED/OL ]. <http://igsch.jpl.nasa.gov>. Date accessed: 20/10/2011.

5 Jone M, Neilan R E and Rizos C. The International GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite system[ J ]. Journal of Geodesy, 2009, 83: 191 – 198.

6 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[ J ]. 测绘学报, 2010, 39( 1 ): 1 – 6. ( Yang Yuanxi. Progress, contribution and challenges of Compass/Beidou satellite navigation system [ J ]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39( 1 ): 1 – 6 )

7 焦文海. iGMAS 体系架构及其进展[ R ]. 广州: 2012. ( Jiao Wenhai. Structure and current development of iGMAS [ R ]. Guangzhou: 2012 )

8 Dach R, et al. Bernese GPS software version 5. 0 [ M ]. Berne: University of Berne, 2007.

9 Herring T A, King R W and McClusky S C. GAMIT reference manual[ M ]. San Diego: MIT, 2006.

10 Ge M, Chen J and Gendt G. EPOS-RT: Software for real-time GNSS data processing[ R ]. Vienna: EGU General Assembly, 19th – 24th Apr, 2008.

11 李敏, 赵齐乐, 施闯. Panda 软件用户操作手册[ M ]. 武汉: 武汉大学, 2011. ( Li Min, Zhao Qile and Shi Chuang. User manual of panda [ M ]. Wuhan: Wuhan University, 2011 )

12 楼益栋. 导航卫星实时精密轨道与钟差确定[ D ]. 武汉大学, 2008. ( Lou Yidong. Research on real-time precise GPS orbit and clock offset determination [ D ]. Wuhan University, 2008 )