

## 第二类无奇点根数的北斗历书参数设计

常志巧<sup>1,2</sup>, 胡小工<sup>1</sup>, 杜 兰<sup>3</sup>, 郭 睿<sup>2</sup>, 何 峰<sup>4</sup>, 李晓杰<sup>2</sup>, 王 琰<sup>3</sup>, 董恩强<sup>2</sup>

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 北京卫星导航中心, 北京 100094;  
3. 信息工程大学导航与空天目标工程学院, 郑州 450001; 4. 国防大学, 北京 100091)

**摘 要:** 为统一北斗三类卫星的历书拟合算法, 提出基于第二类无奇点根数进行历书参数设计的方法, 设计了以倾角向量变率作为摄动参数的历书参数模型, 并给出新的历书模型的用户使用算法。利用覆盖 2013 年全年的实际在轨卫星的数值轨道进行了历书拟合试验。结果表明, 地球静止轨道(GEO)和倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星的拟合位置误差为 2~4 km, 拟合用户距离误差(URE)约为 1 km, 中圆地球轨道(MEO)卫星的拟合位置误差为 1~2 km, 拟合 URE 约为 500 m。通过分析 6 个轨道根数和 2 个摄动参数全年的变化范围, 对新历书模型进行量化单位和占用比特位的通信接口设计, 定量分析量化单位对历书表达精度的影响。结果表明, 参数截断后对位置误差的影响小于 50 m, 对 URE 误差的影响小于 5 m。因此, 历书量化误差对信号捕获以及首次定位时间带来的影响可以忽略不计。

**关键词:** 北斗卫星导航系统; 历书拟合; 无奇点根数; 量化误差

中图分类号: P228 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2016)11-1298-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2016.11.003

## Almanac Designing with Second Class of Nonsingular Orbital Elements for BeiDou Navigation Satellite System

CHANG Zhi-qiao<sup>1,2</sup>, HU Xiao-gong<sup>1</sup>, DU Lan<sup>3</sup>, GUO Ri<sup>2</sup>, HE Feng<sup>4</sup>,  
LI Xiao-jie<sup>2</sup>, WANG Yan<sup>3</sup>, DONG En-qiang<sup>2</sup>

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;  
2. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China;  
3. College of Navigation & Aerospace Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;  
4. National Defense University, Beijing 100091, China)

**Abstract:** In order to unify the almanac fitting algorithm for three kinds of the satellites of the BeiDou navigation satellite system, the method of designing the almanac parameters based on the second class of nonsingular orbital elements is proposed. The rate of the inclination vector is designed for the perturbation parameters and the user algorithm of the new almanac model is provided. The almanac fitting test is carried out based on the numerical orbits of the BeiDou satellites in orbit throughout 2013. The results show that the fitting position error for geostationary Earth orbit (GEO) and inclined geosynchronous satellite orbit (IGSO) is from 2 to 4 km and the fitting user range error (URE) is about 1 km. The fitting position error for medium Earth orbit (MEO) is from 1 to 2 km and the fitting URE is about 0.5 km. Through the analysis for the 6 orbital elements parameter variation range, the interface about scale factor and effective range are designed. The quantitative error for the almanac expression is analyzed, and the results show that the position error caused by the truncation is less than 50 m, and the URE caused by the truncation is less than 5 m. Therefore, the influence of the almanac quantitative error on signal capture and TTFF (Time to first fix) can be ignored.

**Key words:** BeiDou navigation satellite system; Almanac fitting; Non-singular orbital elements; Quantitative error

## 0 引言

北斗卫星导航系统提供广播星历和历书参数两种类型的卫星轨道参数<sup>[1]</sup>,广播星历参数通常用于导航定位解算,历书参数通常用于辅助信号捕获<sup>[2]</sup>。高质量的历书数据能给出高精度的卫星运动状态信息,减小接收机对初始码相位预估值和载波多普勒频移的不确定度,缩减信号的搜索范围<sup>[3]</sup>。北斗卫星的历书参数包括钟差参数和计算卫星位置和速度的轨道参数,本文仅讨论历书参数中的轨道参数。历书参数的设计可以在星历模型的基础上简化而来。北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)的星历参数采用了物理意义明确、外推能力强、数据量小、用户计算量适中的类 GPS 开普勒根数广播星历<sup>[4]</sup>,包括一个参考时刻  $t_{oe}$ , 6 个参考时刻的开普勒根数  $(\sqrt{a}, e, i_0, \Omega_0, \omega, M)$ , 6 个短周期调和改正项振幅  $(C_{rs}, C_{rc}, C_{us}, C_{uc}, C_{is}, C_{ic})$ , 3 个长期项改正数  $(\Delta n, \dot{\Omega}, \dot{i})$  共 16 个参数<sup>[1,5]</sup>。描述卫星轨道的历书参数为 8 个,包括参考时刻  $t_{oa}$ , 6 个参考时刻的开普勒根数  $(\sqrt{a}, e, i_0, \Omega_0, \omega, M)$ , 1 个长期项改正数  $\dot{\Omega}$ <sup>[1,5]</sup>, 相关计算分析表明,7 天弧长条件下,历书参数的拟合精度在千米量级。

北斗卫星导航系统采用包含地球静止轨道(Geostationary Earth orbit, GEO)、倾斜地球同步轨道(Inclined geosynchronous satellite orbit, IGSO)、中圆地球轨道(Medium Earth orbit, MEO)三类卫星的混合星座,其中 GEO 卫星同时具有小偏心率和小倾角的特点,采用基于开普勒轨道根数的常规的星历拟合方法会造成参数超限、拟合不稳定甚至拟合失败的现象。文献[6]研究了广播星历参数的物理意义以及各参数之间的相关性,指出相对于 MEO 卫星, GEO 卫星广播星历拟合过程中  $\Delta n$  与表征轨道面定向的参数之间相关性增大,导致拟合过程中  $\Delta n$  变化幅度偏大和部分情况下拟合发散。已有的广播星历相关研究成果较多,提出了一系列解决拟合奇点问题的方法,通过坐标面旋转法解决了 GEO 卫星小倾角奇点问题<sup>[7-8]</sup>,采用第一类无奇点根数解决了小偏心率奇点问题<sup>[9-10]</sup>。目前 BDS 的 GEO 卫星的星历拟合采用人为旋转  $5^\circ$  倾角的策略,用户计算卫星位置时还需要反向旋转  $5^\circ$  倾角以恢复 GEO 轨道的正确定向<sup>[1,7]</sup>。因此从完整流程来看, GEO 的

星历模型与 IGSO 和 MEO 并非完全一致,为了统一 3 类导航卫星的用户算法,有学者提出采用基于第二类无奇点根数的广播星历拟合算法,设计了相应 16 参数和 18 参数的星历模型,达到了毫米至厘米的拟合精度<sup>[11-12]</sup>。

基于第二类无奇点根数的广播星历模型,能够同时消除 GEO 导航卫星的小倾角和小偏心率奇异问题,统一北斗三类卫星的星历拟合和用户使用算法,具有显著的优势。为了使新的星历模型能够应用于导航系统,需要设计相应基于第二类无奇点根数的历书模型,国内外还未有相关研究。本文基于第二类无奇点根数对北斗导航卫星进行了历书参数设计,并利用在轨三类卫星实际轨道进行了全年的历书拟合试验,完善了基于第二类无奇点根数的星历和历书设计理论,为导航系统优化设计提供了重要的技术参考。

## 1 基于第二类无奇点根数的历书参数设计和拟合

### 1.1 历书参数设计

历书参数的设计原则是利用尽量少的参数实现尽量高精度的卫星位置拟合,达到减少通信资源,同时缩短用户接收机的首次定位时间。通常千米量级的拟合精度能满足信号捕获的需求,因此历书参数设计时考虑主要的摄动力,对于导航卫星,由于其轨道高度较高,地球的非球型引力  $J_2$  项和月球引力是导航卫星的主要摄动力。在主要摄动力的影响下,存在长期变化和长周期变化的轨道根数具有如下规律<sup>[8]</sup>:

1) 轨道倾角  $i$  存在一阶长周期项,最大项为日月引力摄动,由于 GEO 卫星和 IGSO 卫星轨道高度较高,在第三体引力摄动作用下其轨道倾角的长周期变化更为显著。

2) 升交点赤经  $\Omega$ , 近点角距  $\omega$ , 平近点角  $M$  存在长期变化,其中影响最大的是  $J_2$  项,见式(1)<sup>[13]</sup>。其次为日月引力摄动,同时这三个轨道根数具有一阶长周期变化,最大项为日月引力摄动。

$$\begin{cases} (f_{1c})_{\Omega} = -\frac{3J_2}{2p^2}ncos i \\ (f_{1c})_{\omega} = \frac{3J_2}{2p^2}n\left(2 - \frac{5}{2}\sin^2 i\right) \\ (f_{1c})_M = \frac{3J_2}{2p^2}n\left(1 - \frac{3}{2}\sin^2 i\right)\sqrt{1-e^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $(f_{1c})_{\Omega}$ 、 $(f_{1c})_{\omega}$ 、 $(f_{1c})_M$  分别为  $J_2$  项引起的升交点赤经  $\Omega$ 、近点角距  $\omega$  和平近点角  $M$  的长期变化率,  $n$  为平均角速度,  $i$  为轨道倾角值,  $e$  为轨道偏心率值,  $p = a(1 - e^2)$ ,  $J_2 = 1.08263 \times 10^{-3}$ 。

由于平近点角  $M$  与平均角速度  $n$  具有线性关系, 由开普勒第三定律  $n^2 a^3 = \mu$  可知,  $n$  与半长径  $a$  具有解析关系, 因此平近点角  $M$  的长期变化可以被半长径  $a$  吸收。在偏心率较小的情况下, 卫星纬度幅角近似为近点角距  $\omega$  和平近点角  $M$  之和, 同样近点角距  $\omega$  的长期变化可以被  $a$  吸收。在历书参数拟合弧长内(如 7 天), 可将长周期项等效为长期项。因此在开普勒轨道根数条件下, 历书参数可以选为  $(a, e, i, \Omega, \omega, M, \dot{i}, \dot{\Omega})$ 。

令第二类无奇点根数表示为  $(a, e, i, M^*)$ , 其与经典开普勒根数的关系为<sup>[11-12]</sup>:

$$\begin{cases} \mathbf{e} = [e_x \ e_y]^T = [e \cos \tilde{\omega} \ e \sin \tilde{\omega}]^T \\ \mathbf{i} = [i_x \ i_y]^T = [\sin i \cos \Omega \ \sin i \sin \Omega]^T \\ M^* = \Omega + \omega + M \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\tilde{\omega} = \Omega + \omega$ ,  $\mathbf{e}$  和  $\mathbf{i}$  分别称为偏心率向量和倾角向量;  $e_x$ 、 $e_y$  和  $i_x$ 、 $i_y$  分别称为偏心率向量的二维分量;  $M^*$  为平经度, 从春分点开始起算, 由于用户通常需要计算卫星在地固系下的位置, 因此选择  $M^*$  的参考点为  $t_{oa}$  时刻的格林尼治子午圈, 式(2)以及下文中的  $\Omega$  则重新定义为  $t_{oa}$  时刻的升交点经度。

由上述分析可知, 导航卫星在主要摄动力影响下, 轨道倾角和升交点赤经的长周期变化或长期变化是历书参数需要考虑的主要因素, 基于第二类无奇点根数的历书参数可以设计为  $(t_{oa}, \sqrt{A}, e_x, e_y, i_{x0}, i_{y0}, M_0^*, \dot{i}_x, \dot{i}_y)$ 。 $t_{oa}$  为星历参数的参考点,  $\sqrt{A}$  为参考时刻卫星长半轴的平方根,  $e_x$ 、 $e_y$  为偏心率向量的二维分量,  $i_{x0}$ 、 $i_{y0}$  为  $t_{oa}$  时刻的倾角向量的二维分量,  $M_0^*$  为  $t_{oa}$  时刻的平经度,  $\dot{i}_x$ 、 $\dot{i}_y$  为倾角向量二维分量的变率。

## 1.2 历书拟合算法

利用历书计算卫星位置的方法与利用第二类无奇点根数星历计算卫星位置的过程基本相同, 主要差异在于减少部分摄动参数。其算法如下:

1) 计算卫星的平经度

$$\begin{cases} A = (\sqrt{A})^2 \\ n = \sqrt{\frac{\mu}{A^3}} \\ M^* = M_0^* + n(t - t_{oa}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mu$  为地球引力常数。

2) 计算卫星的偏经度( $E^* = \Omega + \omega + E$ )

$$E^* - e_x \sin E^* + e_y \cos E^* = M^* \quad (4)$$

3) 计算卫星矢径  $r_0$

$$r_0 = a(1 - e_x \cos E^* - e_y \sin E^*) \quad (5)$$

4) 计算卫星的真经度( $f^* = \Omega + \omega + f$ )

$$\begin{cases} \sin f^* = \frac{a}{r_0} \left[ \sin E^* - e_y + \frac{e_x}{1 + \sqrt{1 - e^2}} \cdot (-e_x \sin E^* + e_y \cos E^*) \right] \\ \cos f^* = \frac{a}{r_0} \left[ \cos E^* - e_x - \frac{e_y}{1 + \sqrt{1 - e^2}} \cdot (-e_x \sin E^* + e_y \cos E^*) \right] \end{cases} \quad (6)$$

5) 计算卫星在轨道平面坐标系的坐标

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_0 \cos f^* \\ r_0 \sin f^* \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

6) 计算卫星在地固坐标下的坐标

将  $t_{oa}$  时刻的地固系作为准惯性系, 通过旋转矩阵  $\mathbf{M}$  将轨道平面系下的向量旋转至准惯性系, 然后通过绕  $z$  轴旋转地球自转角  $\Theta$ , 将准惯性系旋转至地固系。

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\Theta) \mathbf{M} \mathbf{r} \quad (8)$$

式中: 旋转角度  $\Theta$  的表达式见式(10), 旋转矩阵  $\mathbf{M}$  的表达式见式(11)。

$$\Theta = \omega_e(t - t_{oa}) \quad (9)$$

式中:  $\omega_e$  为地球自转角速度。

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}_z(-\Omega) \mathbf{R}_x(-i) \mathbf{R}_z(\Omega) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{i_y^2}{1 + \cos i} & \frac{i_x i_y}{1 + \cos i} & i_y \\ \frac{i_x i_y}{1 + \cos i} & 1 - \frac{i_x^2}{1 + \cos i} & -i_x \\ -i_y & i_x & \cos i \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $i_x = i_{x0} + \dot{i}_x(t - t_{oa})$

$$i_y = i_{y0} + \dot{i}_y(t - t_{oa})$$

$$\cos i = \sqrt{1 - i_x^2 - i_y^2}$$

对式(8)求 8 个历书参数的一阶偏导数, 可得线性化的观测方程为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_0 + \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \sqrt{A}} \delta \sqrt{A} + \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial e_x} \delta e_x + \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial e_y} \delta e_y + \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial i_x} \delta i_x + \dots + \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial i_y} \delta i_y \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{R}$  为观测历元  $t$  时刻地固坐标系下的卫星位置向量,  $\mathbf{R}_0$  为利用式(8)计算的卫星位置向量近似值,  $\delta \sqrt{A}$ ,  $\delta e_x$ ,  $\dots$ ,  $\delta i_y$  分别为相应历书参数的改正值,  $\partial \mathbf{R} / \partial \sqrt{A}$ ,  $\partial \mathbf{R} / \partial e_x$ ,  $\dots$ ,  $\partial \mathbf{R} / \partial i_y$  分别为位置向量对历书参数的偏导数向量。对于  $k$  个历元的离散轨道, 可得如下误差方程:

$$\mathbf{V} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{L} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{V}$  为  $3k$  维残差矩阵,  $\mathbf{H}$  为  $3k \times 8$  维系数矩阵,  $\mathbf{X}$  为  $8 \times 1$  维历书参数矩阵,  $\mathbf{L}$  为  $3k$  维观测矩阵, 当满足  $3k \geq 8$  时, 即可由最小二乘估计原理计算出历书参数的修正值。

参数收敛条件设置为:

$$\frac{|\sigma_{i+1} - \sigma_i|}{\sigma_i} < 10^{-3} \quad (13)$$

式中:  $\sigma_i$  是第  $i$  次迭代的单位权中误差。

## 2 历书拟合结果分析

### 2.1 拟合精度分析

利用国内区域监测网 2013 年全年的伪距相位数据进行多星多站联合精密定轨, 同时解算所

有卫星轨道参数(初轨、光压及经验加速度), 接收机模糊度参数、大气天顶延迟和各历元卫星与接收机钟差参数。定轨弧长为 3 天, 预报弧长为 8 天(数值轨道弧长为 11 天), 采用 1h 的滑动窗口、7 天的拟合弧长, 选取弧长初始时刻为参考时刻, 对在轨 13 颗卫星进行了全年的历书参数拟合。由于每个数值轨道的弧长为 11 天, 历书拟合弧长为 7 天, 因此只需每 4 天进行一次精密定轨, 共计进行 90 次精密定轨, 数值轨道覆盖即可覆盖 2013 年全年。忽略数值轨道自身的定轨和预报误差, 以数值轨道的历书拟合内符合残差为统计对象, 表 1 列出了所有在轨卫星历书拟合位置误差和用户距离误差(User range error, URE), 其中卫星 01~05 为 GEO 卫星, 06~10 为 IGSO 卫星, 11~14 为 MEO 卫星。GEO 和 IGSO 卫星全年平均拟合位置误差为 2~4 km, URE 为 1 km, MEO 卫星全年平均的拟合位置误差为 1~2 km, URE 为 500 m。各类卫星的历书拟合误差细节图如图 1 所示。由于 GEO 和 IGSO 卫星的轨道高度高于 MEO 卫星, 前者轨道周期约为后者的 2 倍, 相同时段 MEO 卫星的轨道弧长比 IGSO 和 GEO 卫星要大一倍; 因此, MEO 卫星的观测几何构型更佳, 拟合精度高。

表 1 历书拟合 URE 2013 年全年平均值统计/m

Tab 1 The average value of almanac fitting URE throughout 2013/m

卫星号	位置误差	拟合 URE	卫星号	位置误差	拟合 URE	卫星号	位置误差	拟合 URE
01	2528	1008	06	3694	1059	11	1229	504
02	1786	895	07	2507	938	12	1229	504
03	3111	1075	08	3431	1066	14	1260	490
04	1725	894	09	3604	1037			
05	2254	959	10	2252	900			
平均	2281	966	平均	3098	1000	平均	1239	499

### 2.2 接口设计

图 2 列出了所有在轨卫星历元时刻 6 个轨道根数的全年变化范围, 图 3 列出了所有在轨卫星 2 个轨道摄动参数的全年变化范围。

根据拟合参数全年变化范围的统计, 进行了基于第二类无奇点根数的历书接口设计, 如表 2 所示, 共计 9 个历书参数, 占用 153 比特, 文献[1]中北斗现行历书参数个数为 8 个, 占用 154 位。虽然参数个数比北斗区域导航系统多 1 个, 但通过优化接口设计, 占用比特位反而比区域系统少 1 位。

表 2 基于第二类无奇点根数的历书接口设计

Tab 2 Almanac interface designing based on second class of nonsingular orbital elements

参数	位数	量化单位	适用范围	量纲
$t_{ou}$	8	$2^{12}$	1048576	s
$\sqrt{A}$	14	$2^{-1}$	8192	$\sqrt{m}$
$e_x$	$20^1$	$2^{-25}$	$\pm 0.015625$	无
$e_y$	$20^1$	$2^{-25}$	$\pm 0.015625$	无
$i_{x0}$	$26^1$	$2^{-25}$	$\pm 1$	无
$i_{y0}$	$26^1$	$2^{-25}$	$\pm 1$	无
$M_0^*$	$21^1$	$2^{-15}$	$\pm 1$	$\pi$
$\dot{i}_x$	$9^1$	$2^{-25}$	$\pm 7.6294 \times 10^{-06}$	$s^{-1}$
$\dot{i}_y$	$9^1$	$2^{-25}$	$\pm 7.6294 \times 10^{-06}$	$s^{-1}$

注: 标有上标 1 的参数是二进制补码, 最高有效位是符号位。

表 3 参数截断后历书拟合 URE 2013 年全年平均值统计/m

Tab 3 The average value of almanac fitting URE after parameter truncation throughout 2013/m

卫星号	位置误差	拟合 URE	卫星号	位置误差	拟合 URE	卫星号	位置误差	拟合 URE
01	2548	1010	06	3726	1064	11	1264	506
02	1815	897	07	2552	943	12	1264	505
03	3127	1077	08	3467	1070	14	1294	491
04	1755	896	09	3636	1042			
05	2277	961	10	2301	905			
平均	2304	968	平均	3136	1005	平均	1274	501

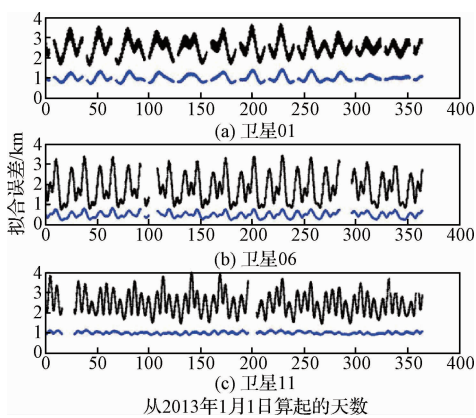


图 1 三类卫星历书拟合误差曲线图(上面曲线表示位置误差,下面曲线表示 URE 误差)

Fig. 1 The almanac fitting error curve of three kinds of satellites (the top curve denoting position error, the bottom curve denoting URE error)

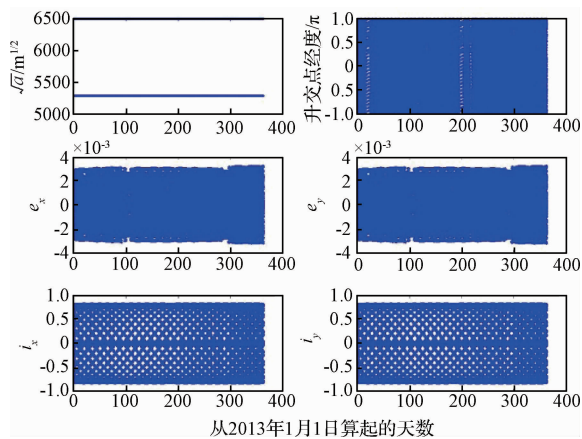


图 2 6 个轨道根数的变化范围

Fig. 2 The variation range of 6 orbit element parameter

为了分析量化精度对历书表达精度的影响,利用截断后的历书参数进行位置误差和拟合 URE 分析。采用 2013 年全年所有在轨卫星的实测数据进行验证,将 GEO/ISGO/MEO 三类卫星分别进行统

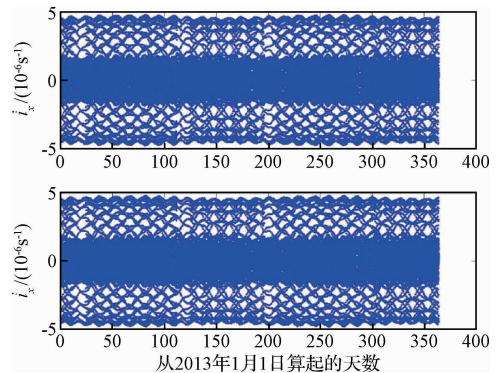


图 3 2 个轨道摄动参数的变化范围

Fig. 3 The variation range of 2 orbit perturbation parameters

计,得到的位置误差和拟合 URE 如表 3 所示。

对比表 3 和表 1,经过量化单位转化后,三类卫星的历书拟合误差均增大,但增大量级有限,对位置误差的影响小于 50 m,对 URE 误差的影响小于 5 m。由于卫星运动速度较快,从用户应用角度来看,参数截断后,历书误差对信号捕获以及首次定位时间带来的影响可以忽略不计。

### 3 结论

本文提出基于第二类无奇点根数进行历书参数设计的方法。通过对导航卫星主要摄动力及其对轨道根数的长期项和长周期项的影响分析,设计了倾角向量变率作为摄动参数的历书参数模型。该模型统一了北斗 GEO/ISGO/MEO 三类卫星的历书拟合算法,完善了基于第二类无奇点根数的星历和历书设计理论。

利用覆盖 2013 年全年的所有在轨卫星的实际数值轨道,对北斗三类卫星进行了历书拟合试验和精度分析,并进行了关于量化单位和占用比特位的接口设计。结果表明,本文提出的新历书模型拟合精度高,占用通信资源少,具有较强的实用价值,对我国卫星

导航系统历书参数设计具有重要参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号(2.0版), 2013. [China Satellite Navigation Office. Beidou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal (version 2.0), 2013.]
- [2] Van Dierendonk A J. 导航星全球定位系统[M]. 北京:测绘出版社, 1994:64-87.
- [3] 王陆潇, 黄智刚, 赵响. 多类型历书对首次定位性能的影响研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(2):140-143. [Wang Lu-xiao, Huang Zhi-gang, Zhao Yun. Two sets of GPS almanac on time to first fix influence [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(2):140-143.]
- [4] 阮仁桂, 贾小林, 吴显兵, 等. 关于坐标旋转法进行地球静止轨道导航卫星广播星历拟合的探讨[J]. 测绘学报, 2011, 40(增刊):145-150. [Ruan Ren-gui, Jia Xiao-lin, Wu Xian-bing, et al. Broadcast ephemeris parameters fitting for GEO satellites based on coordinate transformation [J]. Journal of Mapping and Surveying, 2011, 40(Supplement):145-150.]
- [5] 刘利, 时鑫, 栗靖, 等. 北斗基本导航电文定义与使用方法[J]. 中国科学:物理学力学天文学, 2015, 45(7):079509. [Liu Li, Shi Xin, Li Jing, et al. The definition and using method of the COMPASS basic navigation message]. Sci. Sin.-Phys. Mech. Astron., 2015, 45(7):079509.]
- [6] 黄华, 何峰, 刘林. 广播星历参数物理意义分析与相关性研究[J]. 宇航学报, 2014, 35(2):171-176. [Huang Hua, He Feng, Liu Lin. Research on physical meaning and correlation of broadcast ephemeris parameters [J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(2):171-176.]
- [7] 黄勇, 胡小工, 王小亚, 等. 中高轨卫星广播星历精度分析[J]. 天文学进展, 2006, 24(1):81-87. [Huang Yong, Hu Xiao-gong, Wang Xiao-ya, et al. Precision analysis of broadcast ephemeris for medium and high orbit satellite [J]. Process in Astronomy, 2006, 24(1):81-87.]
- [8] 黄华. 导航卫星广播星历参数模型及拟合算法研究[D]. 南京:南京大学, 2012. [Huang Hua. Research on the broadcast ephemeris parameters model and its fitting algorithm [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.]
- [9] 文援兰, 刘光明, 张志. 基于无奇异变换的卫星广播星历拟合算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(12):2478-2483. [Wen Yuan-lan, Liu Guang-ming, Zhang Zhi. Research on the fitting algorithm of broadcast ephemeris parameters based on non-singular transformation [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(12):2478-2483.]
- [10] 韩星远, 向开恒, 王海红. 第一类无奇点变量的广播星历参数拟合算法[J]. 航天器工程, 2011, 20(4):54-59. [Han Xing-yuan, Xiang Kai-heng, Wang Hai-hong. Research on broadcast ephemeris parameters fitting algorithm based on the first class of no singularity variables [J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(4):54-59.]
- [11] 张中凯, 杜兰, 刘利, 等. GEO广播星历参数设计的无奇点根数法[J]. 测绘学报, 2014, 43(5):452-457. [Zhang Zhong-kai, Du Lan, Liu Li, et al. Parameter design of GEO broadcast ephemeris based on the nonsingular orbital elements [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(5):452-457.]
- [12] Du L, Zhang Z K, Zhang J, et al. An 18-element GEO broadcast ephemeris based on non-singular elements [J]. GPS Solutions, 2015, 19(1):49-59.
- [13] 刘林. 航天器轨道理论[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.

作者简介:

常志巧(1981-), 女, 博士, 主要从事 GNSS 数据处理理论和研究方法研究。

通信地址:北京 5128 信箱(100094)

电话:(010)66308259

E-mail:zhizhaochang@163.com

(编辑:牛苗苗)