

北斗 GEO 卫星用户算法的改进方法*

谢小刚,曾大治,龙腾,张磊

(北京理工大学信息与电子学院,北京 100081)

摘要:针对北斗 GEO 用户算法需要进行 5° 倾角的坐标旋转处理这一过程,提出了采用经典广播星历参数用户算法直接解算北斗 GEO 卫星位置的改进方法,并同时给出了相应的基于第二类无奇点根数的广播星历拟合算法。该算法采用第二类无奇点轨道根数代替经典轨道根数,解决了由 GEO 轨道的小倾角特性引起的经典广播星历参数拟合过程中法化矩阵奇异的问题。从而避免了北斗 GEO 用户算法中坐标旋转处理过程,减少了 GEO 用户算法的计算步骤。仿真表明,提出的改进方法在卫星轨道拟合过程中与原算法精度相当;在卫星轨道外推过程中与原算法相比略有精度损失,但仍满足用户导航定位精度的需求。采用实际北斗 GEO 星历解算的轨道数据验证了改进算法的有效性。

关键词:北斗卫星导航系统;GEO 卫星;广播星历拟合;第二类无奇点轨道根数

中图分类号: P228.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)01-082-06

An improved ephemeris algorithm of Beidou GEO satellite for user

XIE Xiaogang, ZENG Dazhi, LONG Teng, ZHANG Lei

(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The orbital inclination of 5° coordinate rotation is required in the GEO ephemeris algorithm for users. Aimed at this step, an improved method that the BeiDou GEO satellite position is calculated directly by using the classical broadcast ephemeris algorithm for user was presented, and meanwhile the corresponding broadcast ephemeris fitting algorithm based on the second class of non-singularity orbit elements was given. In this method, the classical orbit elements were replaced by the second class of non-singular orbit elements, which solves the problem that the coefficient matrix is non-positive in the process of the classical broadcast ephemeris fitting algorithm because of the small inclination angle. This avoids the orbital inclination of 5° coordinate rotation process, decreases the calculating steps time and enhances the GEO ephemeris algorithmic efficiency. The simulation results show that the accuracy of the improved method is as much as the original algorithm in the satellite orbit fitting process and is reduced slightly in the satellite orbit extrapolation process. But it can still meet the requirement of navigation and position for users. Finally, the validity of the improved algorithm is verified by using orbital data of the actual Beidou GEO broadcast ephemeris.

Key words: BeiDou satellite navigation system; GEO satellite; broadcast ephemeris fitting; the second class of non-singularity orbit elements

北斗卫星导航定位系统(BeiDou Navigation Satellite System,简称BDS)是中国自主研发开发、独立运行的全球卫星导航系统,是继美国的GPS系统、俄罗斯的GLONASS系统之后第三个较为成熟的卫星导航系统。截止到2012年底,北斗卫星导航系统在轨工作的有5颗地球静止轨道(GEO)卫星、4颗中圆地球轨道(MEO)卫星和5颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星,已具备独立自主的区域卫星导航定位能力^[1]。

北斗星座是由MEO+IGSO+GEO组成的混合星座,虽然这三种卫星的轨道特征存在众多差异,北斗系统仍然选用GPS卫星广播星历参数形

式作为其各导航卫星的广播星历参数^[1-2]。但是由于GEO卫星轨道倾角接近于 0° ,北斗系统对其广播星历参数用户算法进行了修正。将GEO卫星轨道进行了坐标旋转 5° 倾角处理^[1],从而在经典广播星历参数用户算法的基础上提高了GEO卫星轨道的拟合精度^[3-5]。本文通过对MEO、IGSO和GEO卫星广播星历参数拟合算法进行研究,针对北斗GEO用户算法需要进行 5° 倾角坐标旋转处理这一过程,提出了采用经典广播星历参数用户算法直接解算北斗GEO卫星位置的改进方法,并同时给出了与之相对应的广播星历参数拟合算法——基于第二类无奇点根数的广播星历

* 收稿日期:2013-04-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61001128)

作者简介:谢小刚(1983—),男,四川射洪人,博士研究生,E-mail:jasonxx@163.com;

曾大治(通信作者),男,副研究员,博士,E-mail:dazhi@bit.edu.cn

拟合算法。经过仿真分析,基于经典广播星历参数用户算法仍然适用北斗 GEO 卫星。

1 北斗 GEO 卫星用户算法的改进方法

北斗 GEO、MEO 和 IGSO 卫星的广播星历参数均是以 6 个开普勒轨道根数($a, i, e, \omega, M, \Omega$)为基础^[6],并加上星历参考时间 t_{oe} 、轨道摄动的调和系数($C_{uc}, C_{us}, C_{rc}, C_{rs}, C_{ic}, C_{is}$)以及随时间变化的摄动量($\Delta n, idot, \dot{\Omega}$)^[1],共 16 个参数组成。但北斗 GEO 卫星用户算法与 MEO、IGSO 卫星却不尽相同。GEO 卫星用户算法需要进行 5° 倾角的坐标转换,才能获取 GEO 卫星在实际地心地固系下的位置。主要原因是由于 GEO 卫星的轨道倾角接近于 0,导致地面主控站产生的经典广播星历参数在计算 GEO 卫星位置时存在较大的精度损失。经过众多学者的研究、仿真与分析^[7-9],最后针对采用经典 GPS 卫星用户算法直接应用于 GEO 卫星会导致精度损失的问题,提出了 5° 倾角坐标旋转法。该方法可以有效地提高 GEO 卫星用户算法的计算精度^[3,8],但同时也增加了计算步骤和复杂度。

基于避免 GEO 用户算法中 5° 倾角坐标转换过程的思想,对北斗 GEO 导航卫星用户算法进行了改进,即在 GEO 用户算法计算过程中不进行一系列的坐标旋转,仍然采用经典 GPS 导航卫星用户算法。与此同时,为了解决改进 GEO 用户算法的广播星历生成精度损失问题,引入了基于第二类无奇点根数的广播星历拟合算法对改进 GEO 用户算法的广播星历进行拟合生成,解决了由 GEO 轨道的小倾角特性引起的经典广播星历参数拟合过程中法化矩阵奇异的问题,达到改进 GEO 用户算法模型高精度广播星历拟合的目的。

2 基于第二类无奇点根数的广播星历拟合算法

基于第二类无奇点轨道根数的广播星历拟合算法是采用第二类无奇点变量 $\sqrt{a}, \xi, \eta, h, k, \lambda$ 来代替经典广播星历参数中的开普勒轨道根数 $\sqrt{a}, e, i, \Omega, \omega, M$ 参量^[10-11]。其转换关系定义^[6]如下:

$$\begin{cases} \xi = e \cos \tilde{\omega}, \eta = -e \sin \tilde{\omega} \\ h = \sin i \cos \Omega, k = -\sin i \sin \Omega \\ \lambda = M + \tilde{\omega}, \tilde{\omega} = \omega + \Omega \end{cases} \quad (1)$$

于是,基于第二类无奇点轨道根数的待估状态参量为:

$$\mathbf{X}_0 = (\sqrt{a}, \xi, \eta, h, k, \lambda, \Delta n, idot, \dot{\Omega}, C_{uc}, C_{us}, C_{rc}, C_{rs}, C_{ic}, C_{is}) \quad (2)$$

基于第二类无奇点轨道根数的广播星历拟合算法的相应状态方程和观测方程^[12]为:

$$\begin{cases} \mathbf{X} = \mathbf{X}(\mathbf{X}_0, t_0, t) \\ \mathbf{Y} = \mathbf{Y}(\mathbf{X}, t) = \mathbf{Y}(\mathbf{X}_0, t_0, t) \end{cases} \quad (3)$$

其中, \mathbf{X}_0 为参考历元 t_{oe} 时刻的无奇点星历参数; \mathbf{Y} 为含有 m ($m \geq 15$)个观测列向量,其中一个观测测量对应卫星的一个位置。由于上述根据广播星历参数用户算法建立起来的状态方程和观测方程均为非线性方程,因此广播星历参数拟合的过程为非线性系统的最小二乘估计问题。需要将非线性方程进行线性化和迭代求解^[12-13]。

同时,根据(1)式的转换关系,卫星的位置和速度向量可表示^[6,14]为:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_k = r_k (\cos u_k^* \mathbf{P}_k + \sin u_k^* \mathbf{Q}_k) \\ \dot{\mathbf{r}}_k = \frac{1}{\sqrt{p_k}} ((-\sin u_k^* + \eta_k) \mathbf{P}_k + (\cos u_k^* + \xi_k) \mathbf{Q}_k) \end{cases} \quad (4)$$

下标 k 对应不同的时间历元(下同)。其中,

$$\begin{aligned} r_k &= \frac{a(1 - \xi_k^2 - \eta_k^2)}{1 + \xi_k \cos u_k^* - \eta_k \sin u_k^*} \\ u_k^* &= \tilde{\omega}_k + f_k, p_k = a_k(1 - e_k^2) \\ \mathbf{P}_k &= \begin{pmatrix} 1 - \frac{k_k^2}{1 + \cos i_k} \\ -\frac{h_k k_k}{1 + \cos i_k} \\ k_k \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Q}_k = \begin{pmatrix} \frac{-h_k k_k}{1 + \cos i_k} \\ 1 - \frac{h_k^2}{1 + \cos i_k} \\ h_k \end{pmatrix} \end{aligned}$$

下面给出观测矩阵和测量矩阵的主要偏导数计算公式。其他偏导数计算可参见文献[12]。

观测矩阵偏导数 $\partial \mathbf{Y} / \partial \mathbf{X}$ 公式^[6,15]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \sqrt{a}} = \frac{2}{\sqrt{a_k}} \mathbf{r}_k \\ \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \lambda} = \frac{1}{n_k} \dot{\mathbf{r}}_k \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi} = \xi_{1,k} \mathbf{r}_k + \xi_{2,k} \dot{\mathbf{r}}_k \\ \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \eta} = \eta_{1,k} \mathbf{r}_k + \eta_{2,k} \dot{\mathbf{r}}_k \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial h} = r_k \left(\cos u_k^* \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial h} + \sin u_k^* \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial h} \right) \\ \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial k} = r_k \left(\cos u_k^* \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial k} + \sin u_k^* \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial k} \right) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial C_{us}} = r_k \sin 2u_k (-\sin u_k^* \mathbf{P}_k + \cos u_k^* \mathbf{Q}_k) \\ \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial C_{uc}} = r_k \cos 2u_k (-\sin u_k^* \mathbf{P}_k + \cos u_k^* \mathbf{Q}_k) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial C_{rs}} = \sin 2u_k (\cos u_k^* \mathbf{P}_k + \sin u_k^* \mathbf{Q}_k) \\ \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial C_{rc}} = \cos 2u_k (\cos u_k^* \mathbf{P}_k + \sin u_k^* \mathbf{Q}_k) \end{cases} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{aligned} \xi_{1,k} &= \frac{1}{p_k} \left[-a_k (\cos u_k^* + \xi_k) - \frac{r_k}{1-e_k^2} (\sin u_k^* - \eta_k) \right. \\ &\quad \left. \times (\xi_k \sin u_k^* + \eta_k \cos u_k^*) \right] \\ \xi_{2,k} &= \frac{r_k}{\sqrt{\mu p_k}} \left[a_k (\sin u_k^* - \frac{a_k \sqrt{1-e_k^2}}{r_k} \eta_k) + \frac{r_k}{1-e_k^2} \right. \\ &\quad \left. \times (\sin u_k^* - \eta_k) \right] \\ \eta_{1,k} &= \frac{1}{p_k} \left[a_k (\sin u_k^* - \eta_k) - \frac{r_k}{1-e_k^2} (\cos u_k^* - \xi_k) \times \right. \\ &\quad \left. (\xi_k \sin u_k^* + \eta_k \cos u_k^*) \right] \\ \eta_{2,k} &= \frac{r_k}{\sqrt{\mu p_k}} \left[a_k (\cos u_k^* + \frac{a_k \sqrt{1-e_k^2}}{r_k} \xi_k) \right. \\ &\quad \left. + \frac{r_k}{1-e_k^2} \times (\cos u_k^* + \xi_k) \right] \end{aligned}$$

状态转移矩阵偏导 $\partial \mathbf{X} / \partial \mathbf{X}_0$ 公式^[12]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \xi}{\partial \dot{\Omega}} = -e_k \sin(\omega_k + \Omega_k) t_k \\ \frac{\partial \eta}{\partial \dot{\Omega}} = -e_k \cos(\omega_k + \Omega_k) t_k \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \lambda}{\partial \sqrt{a}} = -3 \sqrt{\mu} a_k^{-2} t_k \\ \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta n} = \frac{\partial \lambda}{\partial \dot{\Omega}} = t_k \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial C_{is}} = \cos i_k \cos \Omega_k \sin(2u_k) \\ \frac{\partial h}{\partial C_{ic}} = \cos i_k \cos \Omega_k \cos(2u_k) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial \dot{\Omega}} = -\sin i_k \sin \Omega_k t_k \\ \frac{\partial k}{\partial \dot{\Omega}} = -\sin i_k \cos \Omega_k t_k \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial \dot{\Omega}} = \cos i_k \cos \Omega_k t_k \\ \frac{\partial k}{\partial \dot{\Omega}} = -\cos i_k \sin \Omega_k t_k \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial k}{\partial C_{is}} = -\cos i_k \sin \Omega_k \sin(2u_k) \\ \frac{\partial k}{\partial C_{ic}} = -\cos i_k \sin \Omega_k \cos(2u_k) \end{cases} \quad (15)$$

在广播星历拟合过程中,每次迭代都需要将无奇点参数转换为广播星历参数,其转换关系如下^[6,13]:

$$\begin{cases} e = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}, \Omega = \arctan \frac{-k}{h}, \\ i = \arcsin \sqrt{h^2 + k^2} \\ \omega = \arctan \frac{-\eta}{\xi}, M = \lambda - \omega - \Omega \end{cases} \quad (16)$$

然后,将转换后的 e, i, ω, Ω, M 代替式(2)中的无奇点参数并将其作为最终的广播星历参数。

3 算例与分析

本节根据两种不同的 GEO 用户算法(北斗 ICD 中的 GEO 用户算法;本文改进后的 GEO 用户算法)分别进行广播星历参数拟合建模,并分别拟合生成两组 GEO 广播星历参数。然后由这两组广播星历参数分别反算 GEO 卫星在地心地固系下的位置和速度,并与卫星精密轨道数据进行对比,实现对 GEO 卫星新的用户算法的性能分析。用于拟合星历参数的卫星精密轨道数据分别来源于 STK (Satellite Tool Kit, 9.2.4 版本)软件和实际北斗 GEO 卫星广播星历预报轨道。

3.1 基于 STK 数据的仿真分析

STK 软件的初始历元时刻设定为 1 Jan 2010 00:00:00.000 UTCTG;摄动因素主要考虑 21×21 阶地球非球形引力摄动、基于 JPL 星历的日月第三体摄动、太阳光压摄动、固体潮摄动、大气阻力摄动^[16-17]等。GEO 卫星的初始开普勒轨道根数如表 1 所示。

表 1 GEO 卫星的初始轨道根数

Tab.1 The initial orbit elements of GEO

参数	$a(m)$	e	$i(^{\circ})$	$\Omega(^{\circ})$	$\omega(^{\circ})$	$M(^{\circ})$
GEO	42164100.0	0.001	0.0	120.5	0.0	0.0

采用 2h 的卫星精密轨道数据,根据各自的星历模型拟合生成两组广播星历参数^[12],如表 2 所示。其中,对各参数进行了有效位数的截取处理。

图 1 和图 2 分别给出了两种 GEO 卫星用户算法 7h 弧段长度的广播星历位置和速度的拟合精度与外推精度。北斗 GEO 用户算法模型和改进的 GEO 卫星用户算法模型在前 2h 的拟合弧段内,位置拟合误差均方差分别 0.0028m 和 0.0025m;速度拟合误差均方差分别为 $3.9973e-005m/s$ 和 $4.0246e-005m/s$ 。由此可见,改进的 GEO 卫星用户算法模型可以满足卫星导航定位的精度要求。北斗 GEO 用户算法模型外推 5h 后,其外推位置误差最大在 30m 左右,外推速度误差最大在

6mm/s 左右,而且在整个外推过程中误差变化较为平缓。而改进的 GEO 用户算法模型外推 5h 后,Z 轴的位置误差最大,可达 70m;Z 轴的速度误差最大可达到 17mm/s。总的来说,改进的 GEO 用户算法模型在轨道外推时间小于 3h 时,

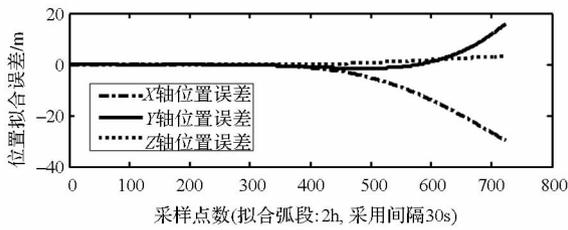
其外推精度与北斗 GEO 用户算法模型精度相当。但当轨道外推时间大于 3h 时,改进的 GEO 用户算法模型的位置、速度、外推精度均成指数形式迅速增加。可见,改进的 GEO 用户算法模型不适合做长时间的外推。

表 2 GEO 广播星历参数

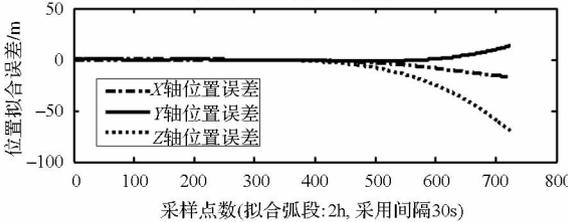
Tab.2 The broadcast ephemeris of GEO

参数	定义	用户算法一	用户算法二
t_{oe}	星历参考时间(s)	3600.00	3600.00
\sqrt{A}	长半轴的平方根($m^{1/2}$)	6493.19660918	6493.19862477
e	偏心率	0.00092098863	0.00092183658
ω	近地点幅角(rad)	-3.0149683122	-2.5922599342
Δn	卫星平均运动速率与计算值之差(rad/s)	-1.7052536e-9	2.79452187e-9
M_0	参考时间的平近点角(rad)	0.22881769373	0.22860760599
Ω_0	按参考时间计算的升交点赤经(rad)	-2.8838311706	2.97687414098
$\dot{\Omega}$	升交点赤经变化率(rad/s)	2.75442723e-9	-1.78476629e-9
i_0	参考时间的轨道倾角(rad)	0.08817964922	0.001006296955
idot	轨道倾角变化率(rad/s)	-1.21182260e-9	-1.474235622e-9
C_{uc}	纬度幅角的余弦调和改正项的振幅(rad)	1.578483307e-5	-1.280534985e-5
C_{us}	纬度幅角的正弦调和改正项的振幅(rad)	3.148020531e-5	3.2678218398e-5
C_{rc}	轨道半径的余弦调和改正项的振幅(m)	-964.148304863	-1002.008674537
C_{rs}	轨道半径的正弦调和改正项的振幅(m)	484.8300894976	-388.8408719661
C_{ic}	轨道倾角的余弦调和改正项的振幅(rad)	-1.678474797e-7	-4.0446565111e-7
C_{is}	轨道倾角的正弦调和改正项的振幅(rad)	-2.828008661e-7	4.08741268738e-7

①为北斗 ICD 中的 GEO 卫星用户算法,②为改进的 GEO 卫星用户算法



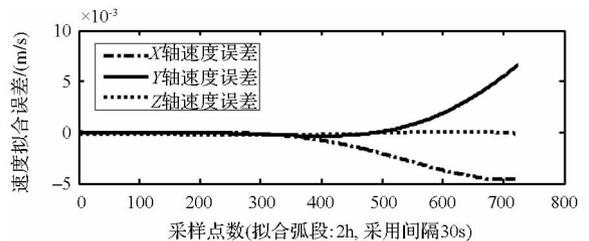
(a) 北斗GEO用户算法模型



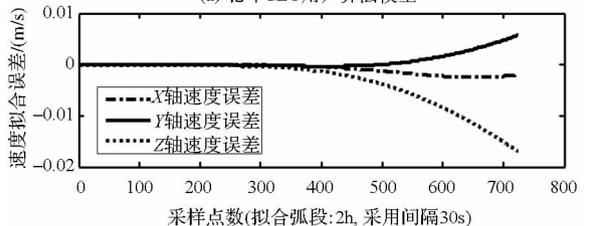
(b) 改进的GEO用户算法模型

图1 位置拟合与外推精度曲线

Fig.1 The fitting and extrapolation accuracy curve of satellite position



(a) 北斗GEO用户算法模型



(b) 改进的GEO用户算法模型

图2 速度拟合与外推精度曲线

Fig.2 The fitting and extrapolation accuracy curve of satellite velocity

3.2 基于北斗 GEO 广播星历预报轨道数据的仿真分析

采用北斗接收机对北斗 2 号 GEO 卫星的广播星历进行长时间收集。收集的时间段为:2013-8-28 12:00:00 UTC 到 2013-9-1 1:00:00 UTC,共收集 82 组星历。以该接收的星历解算的卫星位置作为参考理论数据对改进的 GEO 用户算法进行性能分析。

表 3 基于北斗 GEO 数据的位置和速度拟合精度

Tab.3 The fitting accuracy of BeiDou GEO satellite position and velocity

	URE	X 轴	Y 轴	Z 轴
位置的绝对值均值 (m)	1.179e-004	2.77e-005	1.70e-005	8.410e-004
速度的绝对值均值 (m/s)	-	6.10e-008	4.30e-008	2.257e-006

表 3 给出了上述广播星历时间段内,改进的 GEO 用户算法模型的平均拟合精度^[19]。该拟合算法模型对北斗 GEO 卫星位置的平均拟合精度均小于 1mm,速度平均拟合精度均小于 3.0e-06 m/s。由此可见,改进的 GEO 用户算法模型对 GEO 卫星位置和速度的拟合精度均较高。这主要是由于参考理论数据由 GEO 广播星历参数用户算法模型计算所得,数据较为平滑且容易拟合;其次,改进的 GEO 用户算法模型与北斗 GEO 用户算法模型较为相似且基本轨道根数间具有严格的转换关系。

图 3 和图 4 分别给出了改进的 GEO 用户算法模型对北斗 2 号 GEO 卫星位置和速度的长时间拟合精度变化曲线。改进的 GEO 用户算法模型在对上述 82 组数据的拟合过程中位置和速度的拟合精度均较高。其中,X 轴、Y 轴的位置和速度拟合误差明显低于 Z 轴,且均保持在 ±0.2mm 范围内,速度拟合误差也均保持在 ±5e-07m/s 范围内;而 Z 轴的位置和速度拟合误差变化较为剧烈,Z 轴位置和速度的拟合误差分别保持在 ±5mm 和 ±1e-05m/s 范围内。但在星历更新的边缘点卫星位置和速度的拟合误差均存在较为明显的跳变,其中 Z 轴位置的最大跳变值达到 2.5cm,Z 轴速度的最大跳变值达到 0.1mm/s。虽然这种情况可以通过增加 GEO 卫星的广播星历有效期来减缓这种位置跳变的现象,但是这也说明了改进后的 GEO 用户算法模型在精度上相对于北斗 GEO 卫星用户算法模型要稍差。

4 结论

本文从卫星用户算法简洁高效的角度出发,针对北斗卫星导航系统 GEO 卫星用户算法需要

首先,将每组广播星历在其参考时刻按 60s 间隔向前向后各外推 1h。然后,将每组星历外推得到的 241 个卫星状态数据作为参考理论数据,采用第 2 节所述的星历拟合方法对该组广播星历进行重新拟合。最后,根据拟合的广播星历,采用改进的 GEO 用户算法对卫星位置进行反解并与参考理论数据进行对比。

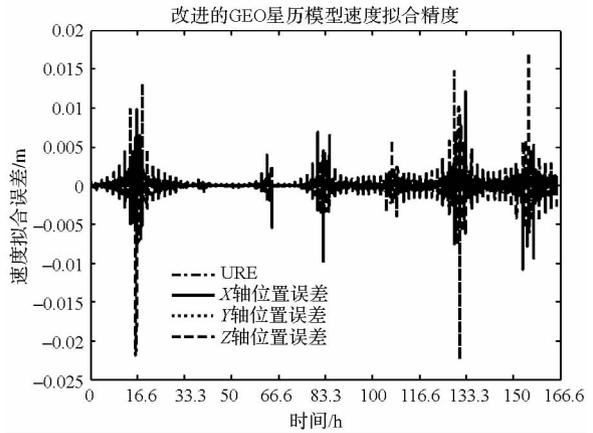


图 3 基于北斗 GEO 数据的位置拟合精度曲线
Fig.3 The fitting accuracy curve of BeiDou GEO satellite position

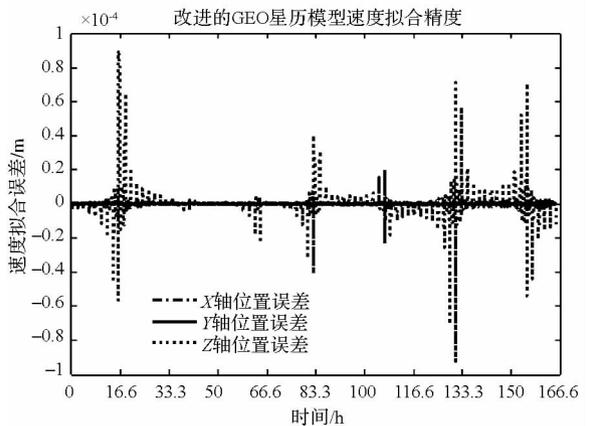


图 4 基于北斗 GEO 数据的速度拟合精度曲线
Fig.4 The fitting accuracy curve of BeiDou GEO satellite velocity

进行一系列坐标旋转的这一过程,提出了一种直接采用经典 GPS 用户算法解算北斗 GEO 卫星位置的用户算法并同时给出了相应的 GEO 广播星历拟合算法。针对这一改进的用户算法,本文采

用 STK 软件产生的高精度精密轨道数据和实际北斗 GEO 广播星历预报轨道数据,分别从两种 GEO 卫星用户算法对卫星位置、速度的预报和外推精度角度,对本文提出的改进方法进行连续长时间的仿真与分析。结论表明,改进的 GEO 用户算法模型避免了目前北斗 GEO 用户算法模型中一系列坐标旋转的问题;在一定程度上简化了 GEO 卫星用户算法的计算过程,提高了 GEO 卫星用户的计算效率。该改进的算法虽然在卫星位置、速度的预报和外推过程中略有精度损失,但仍满足用户导航定位的需求。并且,经过对 GEO 卫星用户算法进行改进后,北斗三种类型的轨道卫星(MEO, IGSO 和 GEO)可统一采用同一种卫星用户算法。

参考文献 (References)

- [1] 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件[S]. 北京, 2012.
Beidou navigation satellite system signal in space interface control document [S]. Beijing, 2012. (in Chinese)
- [2] Global position system wing (GPSW) systems engineering & integration interface specification: IS-GPS-200 (version E) [S]. 2010.
- [3] 毛家俊. 卫星导航系统导航电文设计技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012.
MAO Jiajun. Study of navigation message design technology in satellite navigation system[D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [4] 高玉东, 郗晓宁, 王威. GEO 导航星广播星历拟合改进算法设计[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(5): 18-22.
GAO Yudong, XI Xiaoning, WANG Wei. An improved fitting algorithm design of broad-cast ephemeris for GEO satellite[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(5): 18-22. (in Chinese)
- [5] 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: 145-150.
RUAN Rengui, JIA Xiaolin, WU Xianbing, et al. Broadcast ephemeris parameters fitting for GEO satellite based on coordinate transformation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica. 2011, 40: 145-150. (in Chinese)
- [6] 何峰, 王刚, 刘利, 等. 地球静止轨道卫星广播星历参数拟合与试验分析[J]. 测绘学报, 2011, 40: 52-58.
HE Feng, WANG Gang, LIU Li, et al. Ephemeris fitting and experiments analysis of GEO satellite[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40: 52-58. (in Chinese)
- [7] 刘林. 航天器轨道理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 414-445.
LIU Lin. Orbit Theory of spacecraft[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 414-445. (in Chinese)
- [8] 崔先强, 杨元喜, 吴显兵. 轨道面旋转对 GEO 卫星广播星历参数拟合的影响[J]. 宇航学报, 2012, 33(5): 590-596.
CUI Xianqiang, YANG Yuanxi, WU Xianbing. Influence of the orbital plane rotation angle on GEO satellite broadcast ephemeris parameter fitting[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(5): 590-596. (in Chinese)
- [9] 刘光明, 廖瑛, 文援兰. 导航卫星广播星历参数拟合算法研究[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(3): 100-104.
LIU Guangming, LIAO Ying, WEN Yuanlan. Research on the fitting algorithm of broadcast ephemeris parameters[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(3): 100-104. (in Chinese)
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] 陈忠贵, 刘光明, 廖瑛, 等. 广播星历参数星上自主拟合算法[J]. 国防科技大学学报. 2011, 33(3): 1-4.
CHEN Zhonggui, LIU Guangming, LIAO Ying, et al. Autonomously updated broadcast ephemeris algorithm [J]. Journal of National University of Defense Technology. 2011, 33(3): 1-4. (in Chinese)
- [12] 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 Xingyuan, XIANG Kaiheng, WANG Haihong. Research on broadcast ephemeris parameters fitting algorithm based on the first class of no singularity variables [J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(4): 54-59. (in Chinese)
- [13] 文援兰. 卫星导航系统分析与仿真技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 242-260.
WEN Yuanlan. Satellite navigation system analysis and simulation technology [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2009: 242-260. (in Chinese)
- [14] 黄勇, 胡小工, 王小亚. 中高轨卫星广播星历精度分析[J]. 天文学进展, 2006, 24(1): 81-88.
HUANG Yong, HU Xiaogong, WANG Xiaoya. Precision analysis of broadcast ephemeris for medium and high orbit satellites[J]. Progress in Astronomy, 2006, 24(1): 81-88. (in Chinese)
- [15] 杜兰, 张中凯, 刘利, 等. GEO 卫星广播星历的拟合参数设计[J]. 中国空间科学技术. 2013, (3): 46-51.
DU Lan, ZHANG Zhongkai, LIU Li, et al. Fitting parameters design for GEO broadcast ephemeris[J]. Chinese Space Science and Technology, 2013, (3): 46-51. (in Chinese)
- [16] 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 Yuanlan, LIU Guangming, ZHANG Zhi. Research on the fitting algorithm of broadcast ephemeris parameters based on non-singular transformation [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(12): 2479-2481. (in Chinese)
- [17] Xu G C. GPS theory, algorithms and applications [M]. Springer, 2007: 21-35.
- [18] Curtic H D. Orbital mechanics for engineering students[M]. America: Embry-Riddle Aeronautical University, 2005: 159-164.
- [19] Ananda M P, Berstein H, Cunningham K E, et al. Global positioning system (GPS) autonomous navigation [C]//Proc of 4th ESA International Conference on Spacecraft Guidance, Navigation Control System, ESTEC, Netherlands, 1991: 18-21.