

# 一种 GNSS 广播星历轨道实时改正方法

刘 路<sup>1,2</sup>, 郭金运<sup>1</sup>, 周茂盛<sup>1</sup>, 刘 新<sup>1</sup>, 纪 兵<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;

2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079;

3. 海军工程大学 导航工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘 要:**在最终及快速精密星历时延较长的前提下,提出利用广播星历及对应的超快速精密星历(观测部分)构建轨道误差序列,建立一种基于奇异谱分析(SSA)的全球卫星导航系统(GNSS)广播星历轨道实时改正方法,其目的是通过实时改正广播星历轨道,提高当前广播星历轨道的精度。以 GPS 卫星广播星历及其对应的超快速精密星历为例,对该方法的可行性进行了实验分析,结果表明:不同卫星、不同轨道方向的改善比是不同的;整体上看,径向、切向、法向轨道出现正改善比的卫星数占总卫星数的比率分别为 86.7%、90%、93.3%。实验结果表明本方法可以用来实时改正广播星历的轨道。

**关键词:**全球导航卫星系统;广播星历;精密星历;轨道误差;奇异谱分析

**中图分类号:**P228.4

**文献标志码:**A

## A real-time correction method of GNSS broadcast ephemeris orbit

LIU Lu<sup>1,2</sup>, GUO Jinyun<sup>1</sup>, ZHOU Maosheng<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>1</sup>, JI Bing<sup>3</sup>

(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,

Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China;

3. Department of Navigation Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

**Abstract:** On the premise of the long delay of the final and rapid precise ephemeris, a real-time correction method of global navigation satellite system(GNSS) broadcast ephemeris orbit based on singular spectrum analysis(SSA) was established by using orbit error sequences constructed by broadcast ephemeris and corresponding ultra-rapid precise ephemeris (observation part). Its purpose is to correct the broadcast ephemeris orbit in real time so as to improve the accuracy of the current broadcast ephemeris orbit. The feasibility of the method was experimentally verified by using the GPS satellite broadcast ephemeris as an example. The results show that the improvement ratios of orbits in different orbit directions are different for different satellites. On the whole, the number of satellites with positive improvement ratio in the radial, tangential, and normal directions accounted for 86.7%, 90%, and 93.3% of the total satellites respectively, indicating that the method can be used to correct the broadcast ephemeris orbit in real time.

**Key words:** global navigation satellite system(GNSS); broadcast ephemeris; precise ephemeris; orbit error; singular spectrum analysis(SSA)

收稿日期:2020-04-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41774001,41774021,41874091);国家测绘自主可控专项(816-517)

作者简介:刘 路(1992—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事 GNSS 数据处理研究。

郭金运(1969—),男,山东巨野人,教授,博士生导师,主要从事空间大地测量、海洋大地测量和物理大地测量研究,

本文通信作者.E-mail: jinyunguo1@126.com

全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)因可提供全天候服务、高精度点位信息等优势,被广泛应用在导航定位等领域<sup>[1-2]</sup>。在应用 GNSS 时,卫星星历不可或缺且卫星星历的误差会对定位与导航精度带来直接影响<sup>[3]</sup>。当前 GNSS 卫星星历主要可分为 2 种:广播星历和精密星历,前者因其实时性、易获取的特点被广泛应用在实时导航定位中<sup>[4]</sup>,但其精度低的特点限制了实时导航与定位精度的提高;后者虽然精度高,但有较大的滞后性,主要应用于事后科学研究。因此,如何进一步提高广播星历的精度成为 GNSS 导航定位系统在实时应用领域亟待解决的重要问题之一。

基于国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)组织的精密星历,国内外学者对 GNSS 广播星历的轨道和时钟做了许多精度评估方面的研究<sup>[3-17]</sup>。Warren 等<sup>[5]</sup>首次基于精密星历研究了全球定位系统(global positioning system, GPS)广播星历卫星轨道的精度演变;叶有龙等<sup>[6]</sup>对比研究了 GPS Block IIA 和 GPS Block IIF 卫星广播星历的精度,得到了 Block IIF 卫星广播星历精度明显优于 Block IIA 卫星广播星历精度的结论。伴随着国外其他系统的逐步建设,众多学者基于 IGS 精密星历对全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GLONASS)、伽利略卫星导航系统(Galileo satellite navigation system, Galileo)、北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)等系统的广播星历精度进行研究。郭际明等<sup>[7]</sup>研究了短期的 GLONASS 广播星历轨道误差和钟误差,得到当时该导航系统广播星历整体精度信息(优于 4.5 m)。韩德强等<sup>[8]</sup>分析了 30 d(年积日 330~359 d)的 Galileo 广播星历的空间信号测距误差,结果表明 Galileo 广播星历的精度优于 1.0 m,具备完全运行能力(full operational capability, FOC)卫星的广播星历精度与在轨验证(in orbit validation, IOV)卫星的广播星历精度相当。赵立都等<sup>[9]</sup>通过分析 2015 年 3 月 1 日—28 日 BDS 广播星历误差,给出当时 3 种北斗卫星的广播星历精度信息。此外,基于上述方法对各系统广播星历进行精度分析时发现轨道 3 个方向(径向、切向、法向)的误差存在周期规律<sup>[3-12]</sup>,其中最显著的周期是卫星轨道运行周期。这为基于数学方法分析其轨道误差序列的规律性、区分轨道误差序列的有用信息与噪声、建立相应的实时改正方法提供了可能性。

奇异频谱分析(singular spectrum analysis, SSA)作为一种数字信号处理技术<sup>[18]</sup>,不仅能从时间序列中提取蕴含的非线性趋势,而且能够识别和强化周期信号<sup>[19-20]</sup>;结合加权相关分析(w-correlation)可以选择合适阶次对序列重构和外推<sup>[21]</sup>,非常适合对具有周期震荡的时间序列数据和对此类时间序列数据进行预测<sup>[22]</sup>。

因此,本研究从数学方法分析广播星历轨道误差序列(由广播星历及对应的精密星历构建的轨道误差序列)规律的角度出发,在最终与快速精密星历的时间延迟分别为 12~18 d 和 17~18 h、时延较长前提下,提出利用广播星历及对应的超快速精密星历(观测部分)构建轨道误差序列,建立一种基于 SSA 的 GNSS 广播星历轨道实时改正方法,以提高现阶段广播星历的轨道精度。

## 1 数据与处理方法

### 1.1 数据

本研究采用的 GNSS 广播星历及超快速精密星历均来自 IGS 全球数据中心之一的地壳动力学数据信息系统(crustal dynamics data information system, CDDIS)。其中广播星历是 RINEX 3.03 版本的 p 文件,这种格式的星历文件包含多个系统(如 GPS, GLONASS, BDS 等)的 GNSS 广播星历。需要注意的是,不同系统的广播星历的采样间隔及给出的轨道参数形式有所差别,如 GPS 广播星历给出的是间隔为 2 h 的开普勒轨道参数,而 GLONASS 广播星历给出的是间隔 15 min 的轨道位置和速度。超快速精密星历文件为 SP3 c 版本,当前只包含 GPS 卫星的星历,间隔为 15 min,时间总长度为 48 h(其中前 24 h 的星历是实测数据解算的,时延在 3~9 h,精度较高;后 24 h 的星历是预测的,相比于前 24 h 的数据精度低),每 6 h 更新一次。因此,本研究以 GPS 卫星为例进行实验验证分析。

### 1.2 方法

具体数据处理流程如图 1 所示。

首先,利用两种 GNSS 星历得到轨道误差序列,进行预处理;然后,利用 SSA 分解重构得到有用信息(趋势项、周期项、准周期项)和噪声信息;最后,利用 SSA 预测轨道误差序列的有用信息作为广播星历轨道的改正数实时改正广播星历轨道。

### 1.2.1 数据预处理

广播星历文件中的星历数据有时会出现错误与缺失的问题,所得到的轨道误差序列也难免存在粗差或缺失,需要进行数据预处理。本研究数据预处理包括对广播星历及精密星历数据质量的控制、轨道误差序列的粗差剔除和缺失数据的迭代插值。

具体处理方法如下:

1) 对于广播星历,剔除标记为不健康卫星的轨道参数;剔除同一颗卫星相邻两组轨道参数产生较大变化的轨道参数;

2) 对于精密星历,剔除精度指数为 0 和指数较大卫星全天的位置坐标;剔除卫星在某一历元下出现 0.000 000 的位置坐标;

3) 卫星轨道各个方向误差如果大于 10 m,则作为粗差剔除<sup>[12]</sup>;

4) 利用 SSA 迭代插值对因星历数据缺失,或粗差剔除造成的不完整轨道误差时间序列进行补全。SSA 迭代插值的具体方法将在 1.2.3 节中做详细介绍。

### 1.2.2 基于 SSA 的轨道误差序列分解与重构

使用 SSA 是为了把轨道误差时间序列分解成一系列独立序列,包括噪声、周期或准周期和趋势项。其步骤如下。

#### 1) 构建时滞矩阵

对于序列长度为  $N$  的轨道误差序列  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , 设窗口长度为整数  $M (1 < M < N/2)$ , 令  $K = N - M + 1$ , 构建  $M \times K$  阶的时滞矩阵

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_{N-M+1} \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{N-M+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_M & x_{M+1} & \cdots & x_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中  $x_i (1 \leq i \leq N)$  代表原始轨道误差序列中的第  $i$  个元素。时滞矩阵  $\mathbf{X}$  的每一行、每一列都是原始轨道误差序列的子序列。

#### 2) 奇异值分解

令  $\mathbf{T}_x = \mathbf{X}\mathbf{X}^T$ , 得到滞后协方差阵

$$\mathbf{T}_x = \begin{bmatrix} t_0 & t_1 & \cdots & t_{M-1} \\ t_1 & t_0 & \cdots & t_{M-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{M-1} & t_{M-2} & \cdots & t_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $t_i (0 \leq i \leq M-1)$  为原始轨道误差序列迟后  $i$  的自协方差。计算滞后协方差阵  $\mathbf{T}_x$  的特征值并按从大到小排序为  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_M \geq 0$ , 对应的特征向量为  $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \dots, \mathbf{E}_M$ 。令  $\mathbf{V}_r = \mathbf{X}^T \mathbf{E}_r / \sqrt{\lambda_r} (r=1, 2, \dots, d)$ ,

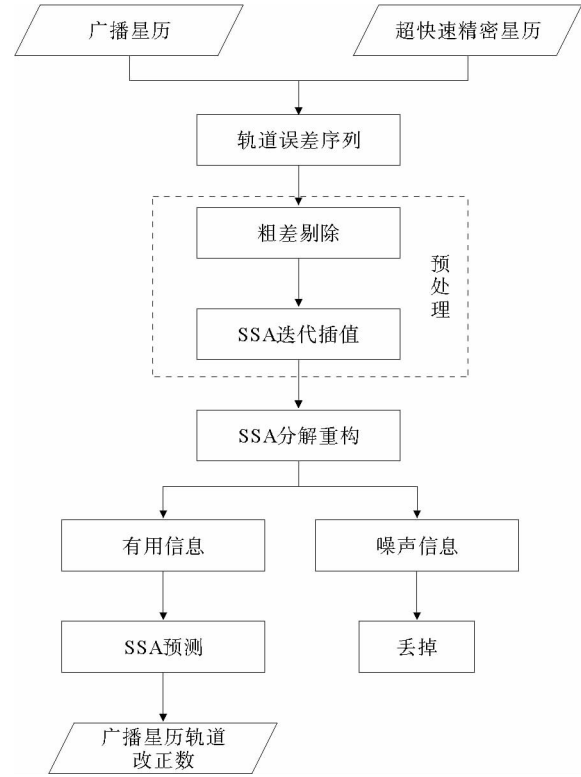


图 1 数据处理流程图

Fig. 1 Flow chart for data processing

其中  $d = \text{rank}(\mathbf{X})$ , 则可以将时滞矩阵  $\mathbf{X}$  表示为

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2 + \cdots + \mathbf{X}_d. \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{X}_r = \sqrt{\lambda_r} \mathbf{E}_k \mathbf{V}_k^T$  是初等矩阵,  $\sqrt{\lambda_r}$  ( $r=1, 2, \cdots, d$ ) 是  $\mathbf{X}_r$  的奇异值。  $C_j = \sum_{r=1}^j \lambda_r / \sum_{r=1}^k \lambda_r$  ( $0 \leq j \leq k$ ) 是前  $j$  个  $\mathbf{X}_i$  的贡献率, 贡献率可以作为各成分中识别主要成分项的一种参考。

### 3) 对角平均化

将初等矩阵  $\mathbf{X}_r$  通过对角平均化转换为长度为  $N$  的多个重建向量(reconstruction component, RC), 原始轨道误差序列为所有 RC 之和。令矩阵  $\mathbf{Z} = \mathbf{X}_r$ ,  $\mathbf{Z}$  通过对角平均化可得到时间序列  $z_1, z_2, \cdots, z_N$ 。对角平均化的具体公式为:

$$z_i = \begin{cases} \frac{1}{i} \sum_{m=1}^r z_{m, i-m+1}^*, & 1 \leq i < M^*; \\ \frac{1}{M^*} \sum_{m=1}^{L^*} z_{m, i-m+1}^*, & M^* \leq i \leq K^*; \\ \frac{1}{N-i+1} \sum_{m=i-K^*+1}^{N-K^*+1} z_{m, i-m+1}^*, & K^* < i \leq N. \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $M^* = \min(M, K)$ ,  $K^* = \max(M, K)$ 。

各 RC 之间的相关性可利用 w-correlation 方法进行分析, 作为将具有相同信号的 RC 分成 1 组的依据, 其主要目的是区分各成分信号, 即区分趋势项、周期项、准周期项及噪声项。令 RC 为  $\mathbf{Y}_k (y_1^k, y_2^k, \cdots, y_N^k)$ , 则任意 2 个重建向量之间的相关系数可以表示为:

$$\rho_{i,j}^w = \frac{(\mathbf{Y}^{(i)}, \mathbf{Y}^{(j)})}{\|\mathbf{Y}^{(i)}\|_w \|\mathbf{Y}^{(j)}\|_w}, \quad 1 \leq i, j \leq N. \quad (5)$$

其中,  $\|\mathbf{Y}^{(i)}\|_w = \sqrt{(\mathbf{Y}^{(i)}, \mathbf{Y}^{(i)})}$ ,  $(\mathbf{Y}^{(i)}, \mathbf{Y}^{(j)}) = \sum_{k=1}^N w_k y_k^i y_k^j$ ,  $w_k = \min(k, M, N-k)$ 。2 个 RC 的相关系数越趋近于 1, 说明 2 个 RC 之间相关性越强, 则这 2 个 RC 极大可能代表同一种信号。

### 1.2.3 轨道误差序列有用信息 SSA 预测

利用 SSA 迭代插值<sup>[23-24]</sup>预测时间序列的具体过程如下:

1) 假设原始轨道误差序列的长度为  $N$ , 设置轨道误差序列的预测长度为  $l$ , 预测部分先用 0 值填充, 则可以得到长度为  $N+l$  轨道误差序列, 对此轨道误差序列进行中心化处理;

2) SSA 分解中心化处理后的轨道误差序列, SSA 分解后轨道误差序列预测位置的数据用第 1 个 RC (记为  $\mathbf{RC}_1$ ) 中的最后  $l$  个数据替代, 之后再进行 SSA 分解, 循环此过程, 直到 2 次预测数据差值的均方根 (root mean square, RMS) 小于 0.001 m;

3) 添加  $\mathbf{RC}_2$  预测数据,  $\mathbf{RC}_1$  和  $\mathbf{RC}_2$  线性叠加, 重复步骤 2), 构建新的轨道误差预测数据;

4) 根据各 RC 的贡献率和 w-correlation 对 RC 进行相关性分析, 选择适量的 RC 重复上述过程, 直至得到较为理想的预测结果。

## 2 实验与分析

### 2.1 SSA 预测窗口及有用信息阶次的确定

使用 SSA 对广播星历轨道误差序列进行预测, 首先需要确定窗口长度  $M$  和有用信息阶次。为说明如何解决这 2 个问题, 采用 2018 年 1 月 20 日—30 日 GPS 广播星历及其对应超快速精密星历 (观测部分) 首先得到 32 颗在轨运行卫星中的 30 颗卫星的原始轨道误差序列 (G04 卫星没有数据, G18 卫星数据缺失严重); 然后预处理原始轨道误差序列, 得到 15 min 间隔的完整轨道误差序列。

对于窗口的选取, 一般取  $1 < M < N/2$ , 且为周期的公倍数<sup>[21]</sup>。本研究取窗口长度  $M=96$ , 这是因为 GPS 广播星历轨道误差序列整体上有半天周期的规律, 且轨道误差序列的时间间隔为 15 min, 时间长度取

1 d,刚好对应于 96 个轨道误差数据。

有用信息阶次可以通过 w-correlation 对 SSA 分离出的 RC 进行相关性分析和各 RC 贡献率来确定,其中相关性分析能够判断各 RC 分离结果的好坏。对 30 颗卫星轨道误差序列进行 SSA 分解,计算前 12 阶 RC 的相关系数。图 2 给出 G01 卫星轨道误差序列 SSA 分解的前 12 阶 RC 的相关系数,以说明如何确定有用信息的阶次。

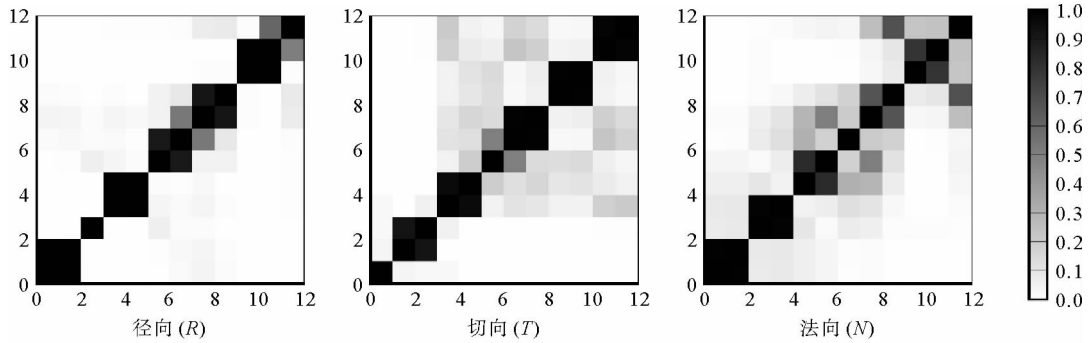


图 2 G01 卫星轨道误差 SSA 分解的前 12 阶 RC 相关系数

Fig. 2 Correlation coefficient of the first 12-order RC of G01 satellite orbit errors decomposed with SSA

如图 2 所示,G01 卫星径向、切向轨道误差序列的前 5 阶 RC 分离较好,利用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)对各 RC 分析后发现,其中轨道径向误差的  $RC_1 + RC_2$  代表半天周期信号, $RC_3$  代表非线性趋势项, $RC_4 + RC_5$  代表 1 d 的周期信号;切向误差  $RC_1$  代表非线性趋势项, $RC_2 + RC_3$  代表半天周期信号, $RC_4 + RC_5$  代表 1 d 周期信号。而法向误差的前 4 阶 RC 分离的较好, $RC_1 + RC_2$ 、 $RC_3 + RC_4$  分别代表半天和 1 d 周期信号,不含趋势项,可见趋势项对法向误差的影响比较小。同时考虑到各 RC 的贡献率 ( $C_j > 0.95$ ) 和相关性 ( $\rho_{i,j}^w > 0.9$ ) 准则,确定 G01 号卫星广播星历轨道径向、切向误差的有用信息为前 5 阶,法向误差的有用信息为前 4 阶。

采用相同的方法确定其他 29 颗卫星广播星历轨道误差序列的有用信息阶次,结果如表 1 所示。

表 1 每颗卫星轨道径向、切向、法向误差的有用信息的阶次

Tab. 1 Orders of useful information of orbit errors for each satellite in radial, tangential and normal directions

PRN	阶次			PRN	阶次		
	R	T	N		R	T	N
G01	5	5	4	G02	6	6	2
G03	4	3	2	G05	6	4	2
G06	6	6	4	G07	3	6	4
G08	4	2	4	G09	2	4	2
G10	4	3	4	G11	4	4	3
G12	2	3	2	G13	4	2	6
G14	2	2	3	G15	4	3	2
G16	5	4	4	G17	6	2	2
G19	2	4	2	G20	6	6	2
G21	3	2	4	G22	2	2	2
G23	3	2	2	G24	3	6	2
G25	4	4	3	G26	2	2	2
G27	2	2	2	G28	4	2	2
G29	7	7	2	G30	3	4	3
G31	2	2	2	G32	2	2	3

## 2.2 最佳原始序列长度的确定

预测结果好坏与原始序列长度有一定关系。为了确定最佳广播星历轨道误差序列长度,考虑到超快速精密星历的时延为3~9 h和每6 h更新一次的条件,使用2.1节的数据,确定窗口长度及有用信息的阶次,设计了利用SSA预测相同6 h(2018年1月31日前6 h)的30颗GPS轨道误差序列,时间间隔1 d,共10组实验。为了衡量整体预测结果的好坏,引入整体三维轨道误差

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_T^2 + \sigma_N^2} \quad (6)$$

式中 $\sigma_i$  ( $i=R, T, N$ )为 $i$ 方向所有卫星改正后的广播星历轨道减去对应的超快速广播星历轨道差值的均方根。其结果如图3所示。

由图3可知,对于广播星历轨道误差预测,原始序列长度并不是越长越好,当原始广播星历轨道误差序列长度为3 d时,对应整体三维轨道的误差值最小,即整体预测结果最好。因此,选取3 d为最佳原始序列的长度。

## 2.3 基于SSA的轨道误差预测可行性验证

为评定该方法的可行性,以2018年1月28日—30日3 d的广播星历轨道误差序列为原始序列, $M=96$ 为窗口长度,对表1确定的每颗卫星轨道误差的有用信息阶次利用SSA进行预测,预测长度为6 h(2018年1月31日前6 h),预测结果作为广播星历轨道改正数。将经过预测值改正前后的广播星历轨道分别与对应的超快速精密星历的轨道作差,统计得到每颗卫星改正前后的轨道误差均方根,通过比较改正前后轨道误差均方根的大小来验证该方法的可行性。表2给出了SSA预测值改正前后每颗卫星广播星历轨道的精度及其改善比。

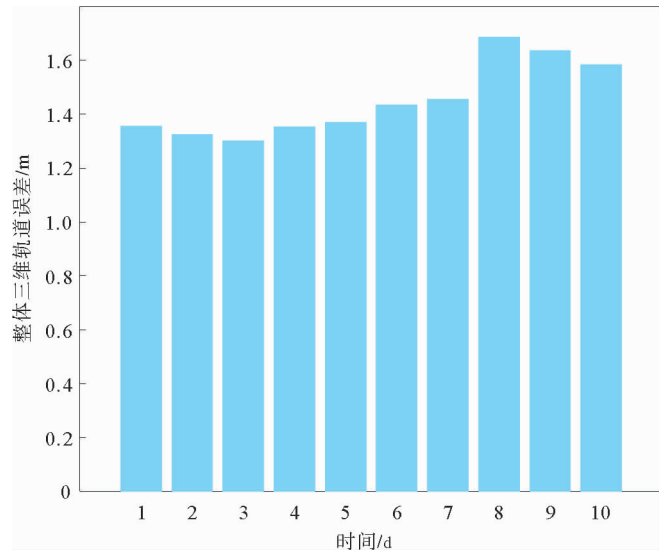


图3 不同原始序列长度对应的整体三维轨道误差

Fig. 3 Overall 3D orbit error corresponding to different original sequence lengths

表2 SSA预测值改正前后每颗卫星广播星历轨道的精度及其改善比

Tab. 2 Accuracy and improvement ratio of each satellite broadcast ephemeris orbit before and after correction with SSA predictions

PRN	径向 R/m			切向 T/m			法向 N/m		
	前	后	改善比/%	前	后	改善比/%	前	后	改善比/%
G01	0.197	0.100	49.2	0.933	0.171	81.7	0.241	0.093	61.4
G02	0.240	0.178	25.8	0.853	0.440	48.4	0.333	0.133	60.1
G03	0.165	0.067	59.4	0.313	0.174	44.4	0.533	0.058	89.1
G05	0.065	0.039	40.0	0.324	0.173	46.7	0.125	0.124	0.8
G06	0.185	0.103	44.3	1.748	0.641	63.3	0.133	0.045	66.2
G07	0.146	0.047	67.8	0.597	0.250	58.1	0.377	0.066	82.5
G08	0.080	0.045	43.8	0.766	0.582	24.0	0.268	0.223	16.8
G09	0.128	0.019	85.2	0.411	0.158	61.6	0.337	0.077	77.2
G10	0.227	0.054	76.2	1.536	0.282	81.6	0.304	0.035	88.5

续表 2

PRN	径向 $R/\text{m}$			切向 $T/\text{m}$			法向 $N/\text{m}$		
	前	后	改善比/%	前	后	改善比/%	前	后	改善比/%
G11	0.075	0.049	34.7	0.403	0.191	52.6	0.166	0.092	44.6
G12	0.133	0.126	5.3	0.419	0.362	13.6	0.214	0.108	49.5
G13	0.147	0.057	61.2	1.166	0.350	70.0	0.603	0.126	79.1
G14	0.261	0.080	69.3	1.364	0.246	82.0	0.694	0.091	86.9
G15	0.036	0.051	-41.7	0.252	0.182	27.8	0.388	0.218	43.8
G16	0.225	0.114	49.3	0.848	0.343	59.6	0.213	0.112	47.4
G17	0.109	0.059	45.9	0.786	0.398	49.4	0.186	0.112	39.8
G19	0.083	0.068	18.1	0.302	0.178	41.1	0.278	0.098	64.8
G20	0.142	0.065	54.2	0.321	0.250	22.1	1.019	0.186	81.8
G21	0.162	0.177	-9.3	0.500	0.451	9.8	0.473	0.278	41.2
G22	0.167	0.157	6.0	0.860	0.377	56.2	0.184	0.105	42.9
G23	0.093	0.118	-26.9	0.296	0.310	-4.7	0.525	0.460	12.4
G24	0.131	0.071	45.8	1.765	0.138	92.2	0.064	0.067	-4.7
G25	0.198	0.098	50.5	2.057	0.547	73.4	0.285	0.173	39.3
G26	0.137	0.133	3.0	0.314	0.427	-36.0	0.086	0.133	-54.7
G27	0.112	0.082	26.8	0.233	0.409	-75.5	0.265	0.159	40.0
G28	0.147	0.094	36.1	0.682	0.418	38.7	0.094	0.091	3.2
G29	0.133	0.084	36.8	0.947	0.329	65.3	0.384	0.135	64.8
G30	0.138	0.068	50.7	0.247	0.220	10.9	0.151	0.053	64.9
G31	0.157	0.125	20.4	0.773	0.640	17.2	0.595	0.176	70.4
G32	0.094	0.098	-4.3	0.280	0.140	50.0	0.192	0.057	70.3

从表 2 可以看出,用 SSA 对广播星历轨道误差有用信息的预测值去改正广播星历轨道,卫星在轨道径向上的最大正改善比为 85.2%,最小正改善比为 3%,4 颗卫星(G15、G21、G23、G32)出现负改善比,占卫星总数的 13.3%;卫星在轨道切向上的最大正改善比为 92.2%,最小正改善比为 9.8%,3 颗卫星(G23、G26、G27)出现负改善比,占卫星总数的 10%;卫星在轨道法向上最大正改善比为 89.1%,最小正改善比为 0.8%,2 颗卫星(G24、G26)出现负改善比,占卫星总数的 6.7%,且轨道法向整体改善效果最好。因此,从整体改善效果证明该方法是可行的。

少数卫星轨道的某些方向精度出现负改善比的原因是:一是个别在该时间段内广播星历轨道误差本身较小的卫星(如 G15 径向误差为厘米级),利用 SSA 预测只用了有限阶次,这会引入少许误差,所造成的负改善比仅仅是引入较小的轨道误差,但这对整体改善效果影响较小;二是卫星出现轨道机动等事件时,会破坏轨道误差原本的周期性,导致利用 SSA 并不能很好地分解重构有用信息项并进行正确预测,这是卫星本身出现的事件所致,并不是方法缺陷。

3 结论

本研究利用广播星历及对应的超快速精密星历(观测部分)构建轨道误差序列,建立一种基于 SSA 的 GNSS 广播星历轨道实时改正方法。以 GPS 为例,实验探讨了轨道误差 SSA 预测窗口大小、有用信息的阶次选取及最佳原始序列长度确定等问题;最后实验验证了利用该方法可以改善 GNSS 广播星历轨道,提高 GNSS 广播星历的轨道精度。

## 参考文献:

- [1] 杨晓明,王胜利,王海霞,等.基于EKF的GNSS/SINS组合导航系统应用[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(6):114-122.  
YANG Xiaoming, WANG Shengli, WANG Haixia, et al. Application of GNSS/SINS integrated navigation system based on EKF[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2019, 38(6): 114-122.
- [2] 侯睿,郭金运,周茂盛,等.北斗二号系统非核心区域定位精度影响因素分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2021,40(1):8-16.  
HOU Rui, GUO Jinyun, ZHOU Maosheng, et al. Analysis of influencing factors of positioning precision in non-core area of BeiDou II system[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2021, 40(1): 8-16.
- [3] 李征航,丁文武,李昭.GPS广播星历的轨道误差分析[J].大地测量与地球动力学,2008,28(1):50-54.  
LI Zhenghang, DING Wenwu, LI Zhao. Error analysis of orbit determined by GPS broadcast ephemeris[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(1): 50-54.
- [4] 郭斐,张小红,李星星,等.GPS系列卫星广播星历轨道和钟的精度分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2009,34(5):589-592.  
GUO Fei, ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, et al. Precision analysis on orbit and clock of GPS satellites broadcast ephemeris[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(5): 589-592.
- [5] WARREN D L M, RAQUET J F. Broadcast vs. precise GPS ephemerides: A historical perspective[J]. GPS Solutions, 2003, 7(3): 151-156.
- [6] 叶有龙,刘长建.GPS新型卫星Block II F广播星历误差分析[J].大地测量与地球动力学,2016,36(1):11-15.  
YE Youlong, LIU Changjian. Error analysis of GPS broadcast ephemeris: A Block IIF satellite perspective[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(1): 11-15.
- [7] 郭际明,孟祥广,李宗华,等.GLONASS卫星广播星历精度分析[J].大地测量与地球动力学,2011,31(1):68-71.  
GUO Jiming, MENG Xiangguang, LI Zonghua, et al. Accuracy analysis of GLONASS satellites broadcast ephemeris[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(1): 68-71.
- [8] 韩德强,党亚民,庞辉,等.Galileo广播星历评估及其对定位精度的影响[J].大地测量与地球动力学,2018,38(11):1165-1169.  
HAN Deqiang, DANG Yamin, PANG Hui, et al. Evaluation Galileo broadcast ephemeris and its influence on positioning accuracy[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(11): 1165-1169.
- [9] 赵立都,张双成,范丽红.北斗卫星导航系统广播星历精度分析[J].测绘科学,2017,42(9):158-162.  
ZHAO Lidu, ZHANG Shuangcheng, FAN Lihong. Error analysis of BeiDou navigation satellite system broadcast ephemeris[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(9): 158-162.
- [10] KIM M, KIM J. A long-term analysis of the GPS broadcast orbit and clock error variations [J]. Procedia Engineering, 2015, 99: 654-658.
- [11] 孟祥广,孙越强,白伟华,等.北斗卫星广播星历精度分析[J].大地测量与地球动力学,2016,36(10):870-873.  
MENG Xiangguang, SUN Yueqiang, BAI Weihua, et al. Precise analysis of Beidou satellites' broadcast ephemeris[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(10): 870-873.
- [12] 刘星,石明旺,游扬声,等.GPS/GLONASS/BDS广播星历轨道误差分析[J].测绘科学,2017,42(11):1-7.  
LIU Xing, SHI Mingwang, YOU Yangsheng, et al. Error analysis of orbit determined by GPS/GLONASS/BDS broadcast ephemeris[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(11): 1-7.
- [13] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, HAUSCHILD A. Broadcast versus precise ephemerides: A multi-GNSS perspective[J]. GPS Solutions, 2015, 19(2): 321-333.
- [14] STARR M S B, POWE M D, OWEN J I R. A long-term statistical analysis of the accuracy of GPS and GLONASS broadcast orbit and clock models[C]// Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004), Long Beach, CA, 2004: 2095-2103.



- [15] 刘朝英, 陈国, 胡志刚. Galileo 空间信号误差和标准定位性能初步分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(4): 308-312.  
LIU Zhaoying, CHEN Guo, HU Zhigang. Preliminary analysis of Galileo signal in space error and standard positioning performance[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(4): 308-312.
- [16] 于超, 陈俊平, 陈倩, 等. 北斗系统长期空间信号测距精度评估及精度提升分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(6): 1064-1071.  
YU Chao, CHEN Junping, CHEN Qian, et al. Assessment of long term BDS signal in space range error and its improvement [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2019, 49(6): 1064-1071.
- [17] 马下平, 鲁尚强, 李秦政, 等. 北斗卫星导航系统的空间信号精度评估[J]. 测绘科学, 2019, 44(1): 90-97.  
MA Xiaping, LU Shangqiang, LI Qinzheng, et al. Evaluation of signal in space accuracy for Beidou navigation satellite system[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(1): 90-97.
- [18] VAUTARD R, YIOU P, GHIL M. Singular-spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals[J]. Physica D: Non-linear Phenomena, 1992, 58(1/2/3/4): 95-126.
- [19] GUO J Y, LI W D, CHANG X T, et al. Terrestrial water storage changes over Xinjiang extracted by combining Gaussian filter and multichannel singular spectrum analysis from GRACE[J]. Geophysical Journal International, 2018, 213(1): 397-407.
- [20] 周茂盛, 郭金运, 沈毅, 等. 基于多通道奇异谱分析的 GNSS 坐标时间序列共模误差的提取[J]. 地球物理学报, 2018, 61(11): 4383-4395.  
ZHOU Maosheng, GUO Jinyun, SHEN Yi, et al. Extraction of common mode errors of GNSS coordinate time series based on multi-channel singular spectrum analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(11): 4383-4395.
- [21] HASSANI H. Singular spectrum analysis: Methodology and comparison[J]. Journal of Data Science, 2007, 5(2): 239-257.
- [22] 郭金运, 高文宗, 于红娟, 等. 基于奇异谱分析的静态相对重力观测重力固体潮提取[J]. 地球物理学报, 2018, 61(10): 3889-3902.  
GUO Jinyun, GAO Wenzong, YU Hongjuan, et al. Gravity tides extracted from relative gravimetric data with singular spectrum analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(10): 3889-3902.
- [23] KONDRASHOV D, GHIL M. Spatio-temporal filling of missing points in geophysical data sets[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2006, 13(60): 151-159.
- [24] KONDRASHOV D, SHPRITS Y, GHIL M. Gap filling of solar wind data by singular spectrum analysis[J/OL]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(15): L15101, doi:10.1029/2010GL044138.

(责任编辑:高丽华)