



# 基于多项式附加周期项模型的 iGMAS 钟差产品综合方法

苗 伟, 王潜心, 程 彤, 李萌萌, 李 坤, 余志浩

(中国矿业大学, a. 环境与测绘学院; b. 国土环境与灾害监测国家测绘地理信息局重点实验室, 徐州 221116)

**摘 要:** 为考虑产品综合与服务中心(Integration and Service Center, ISC)采用的钟差综合方法中的 GNSS 4 系统卫星间的周期性差异, 提出了一种基于多项式附加周期项模型的钟差综合方法。该方法对钟差进行拟合, 求得拟合值与原始值的差值, 以拟合差值构造抗差估计, 对钟差进行动态加权综合, 得到钟差综合值。选择长安大学、中科院国家授时中心、武汉大学、西安测绘研究所 4 家分析中心提供的最终钟差产品进行了钟差综合实验, 对获得的钟差综合值与 ISC 提供的钟差以及 iGMAS 各分析中心提供的钟差进行精度与稳定性比较, 并采用 5 个 MGEX 测站数据进行北斗单系统静态精密单点定位(Precise point positioning, PPP)实验。结果表明: BDS 与 GLONASS 卫星的钟差综合值精度与 ISC 提供的钟差精度相比, 分别提高了 2.6、0.3 ns; 而 GPS 与 Galileo 卫星的钟差综合值精度略低于 ISC 提供的钟差精度。采用钟差综合值进行 PPP 时, 综合钟差定位精度基本稳定在 3 cm 左右。该方法可作为 ISC 钟差综合方法的一个补充。

**关键词:** iGMAS; 钟差综合; 多项式拟合; 抗差估计; 精密单点定位(PPP)

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2021)09-0649-08

## Research on combination method of iGMAS clock offset products based on polynomial additional periodic term model

MIAO Wei, WANG Qianxin, CHENG Tong, LI Mengmeng, LI Kun, YU Zhihao

(a. School of Environment Science and Spatial Informatics; b. The State Bureau of Surveying and Mapping Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring, China  
University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to consider the periodicity difference of GNSS 4 system satellite in the clock offset combination method adopted by the Integration and Service Center (ISC), a clock offset combination method based on polynomial additional periodic term model was proposed. In this method, the clock offset was fitted to obtain the difference between the fitted value and the original value. The fitting difference was used to construct the robust estimation, and the clock offset was dynamically weighted to obtain the comprehensive value of clock offset. In this paper, the final clock error products provided by Chang'an University, National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences, Wuhan University and Xi'an Institute of Surveying and Mapping were selected for clock offset combination experiment. The accuracy and stability of clock offset combination value, the clock offset provided by ISC and the clock offset provided by each analysis center of iGMAS were compared. Besides, static PPP (Precise Point Positioning)

收稿日期: 2021-01-08 网络出版日期: 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871493); 江苏省自然科学基金项目(BK20191342); 中国矿业大学军民融合重大项目培育专项(2019ZDPY-RH03)

作者简介: 苗 伟(1994—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事卫星导航与定位技术方面的研究。

通信作者: 王潜心, Email: wqx@cumt.edu.cn

experiment of Beidou single system was carried out by using the data of five MGEX stations. The results showed that the clock offset combination value precision of BDS and GLONASS increased by 2.6 ns and 0.3 respectively, compared with ISC. However, the clock offset combination value precision of GPS and Galileo was slightly lower than that provided by ISC. When the clock offset combination value was used for PPP, the positioning accuracy of comprehensive clock offset was stable at 3 cm. This method can be used as a supplement to ISC clock offset combination method.

**Key words:** iGMAS; clock offset combination; polynomial fitting; robust estimation; precise point positioning (PPP)

## 0 引言

北斗三号最后一颗组网星 C61 号卫星的发射,标志着中国北斗卫星导航系统的全面建成,全球卫星导航系统的服务性能得以极大增强。为进一步完善北斗卫星导航系统服务性能,中国于 2012 年正式启动建设国际 GNSS 监测评估系统(International GNSS Monitoring & Assessment System, iGMAS)。与国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)相比,该系统的优点是可提供全天候、实时的多 GNSS 产品,更加符合中国北斗运行状况。系统主要包含综合中心、分析中心、跟踪站等部分。其中产品综合与服务中心(Product Integration and Service Center, ISC)直接服务于全球用户,主要负责高精度产品的二次处理、综合以及发布。目前 iGMAS 已建成 24 个海内外跟踪站以及 13 家国内北斗数据处理与分析中心,二者可对 4 个卫星导航系统(BDS、GPS、GLONASS 和 Galileo)的卫星进行全天候跟踪以及数据分析,并生成包含 4 系统的站坐标、ERP、卫星轨道以及钟差等产品,传输给 ISC。由于各 iGMAS 分析中心采用的数据处理模型不同,导致其提交的产品之间存在外符合度较差以及精度差异等问题。为了获得精度高且一致性好的轨道及钟差产品,对分析中心轨道及钟差产品综合方法的研究显得尤为重要。

关于产品综合技术,由于 iGMAS 成立较晚,早期主要借鉴 IGS 的综合方法,在其基础上进行改进,形成适合 iGMAS 以及 BDS 现状的产品综合策略。Kouba 等<sup>[1]</sup>与 Yao<sup>[2]</sup>详细介绍了 IGS 轨道与钟差综合方法。其主要思想是首先统一各类型产品的基准,然后对其进行加权平均,最后求得综合产品。但该方法未充分考虑综合产品之间内符合度问题。Springer 等<sup>[3]</sup>提出了一种采用卫星综合轨道坐标对不同分析中心提供的钟差产品进行一致性修正的方法,该方法在钟差产品综合之前对其进行钟差一致性修正,并选

择某一精度较高的分析中心钟差而非某一单颗卫星钟差作为参考基准,以此维持轨道、钟差、ERP 等综合产品内符合度以及可靠性。该方法一直被 IGS 延续至今。Chen 等<sup>[4]</sup>、Neilan 等<sup>[5]</sup>以及 Chen 等<sup>[6]</sup>提出了改进 IGS 轨道与钟差综合方法,这些方法主要通过改进轨道/钟差产品综合过程中的权值,从而提高综合轨道/钟差产品的精度,使得 IGS 产品综合方法逐渐完善。陈康慷等<sup>[7]</sup>阐述了 iGMAS 钟差综合方法,并提出了三步校准法。该方法在进行钟差综合时,可对不同分析中心的钟差基准进行校准,与逐历元校准法比较的结果表明,可有效消除钟差解算时带来的系统非线性偏差,提高钟差综合精度。

国内外学者提出的钟差综合方法均没有考虑 GPS、BDS、GLONASS 和 Galileo 这 4 个系统卫星之间存在的周期项差异,采用统一模型对其钟差进行综合,必然会因各系统卫星周期性差异而导致综合钟差精度较低。基于此,本文提出一种基于多项式附加周期项的模型,采用该模型对不同分析中心提供的钟差产品进行拟合,求取钟差拟合值与钟差原始值的差值,以拟合差值构造迭代函数,对 iGMAS 分析中心钟差进行动态加权综合,得到钟差综合值。该方法可有效估计不同系统卫星之间的周期性差异,提高钟差综合的精度。文中对获得的综合钟差进行了精度、稳定性以及内符合度分析,以验证方法的有效性。

## 1 卫星钟差综合原理

iGMAS 通过综合 13 家分析中心提交的产品,得到高精度卫星轨道、钟差以及测站坐标等综合产品。精密单点定位精度的提高依赖于高精度精密星历和精密钟差,钟差综合方法研究的发展得益于 GNSS 用户对精度更高、内符合度更好的钟差产品的需求。本文钟差综合的主要步骤包括:钟差产品一致性修正、统一卫星钟差参考基准、基于多项式附加周期项模型的钟差综合。

### 1.1 钟差产品一致性修正

综合产品之间内部符合程度直接影响 GNSS 的服务能力。由于不同分析中心在解算轨道、钟差等产品时,采用的软件以及模型略有差异,导致同一类型产品之间外符合度较差。然而,同一家分析中心的产品在解算时采用一套相同的模型和策略,其产品之间一致性良好。另外,由于原始钟差中会存在跳变、粗差等异常值,对钟差拟合以及综合带来不好的影响,因此在进行钟差产品综合前,需要对原始钟差进行异常值剔除以及钟差、轨道、站坐标产品一致性修正。本文通过设置阈值来剔除钟差异常值,剔除方法可用公式表示为:

$$\Delta T_i = \begin{cases} \Delta T_i, & \Delta T_i - \Delta T_{i-1} < \delta; \\ \frac{\Delta T_{i-1} + \Delta T_{i+1}}{2}, & \Delta T_i - \Delta T_{i-1} \geq \delta, \end{cases}$$

其中: $\Delta T_{i-1}$ 、 $\Delta T_i$ 、 $\Delta T_{i+1}$  分别表示某一卫星在第  $i-1$ 、 $i$ 、 $i+1$  历元的钟差相对偏差, $\delta$  表示设置的阈值。

对钟差、轨道、站坐标产品进行一致性修正,可用公式表示为:

$$\Delta Z_{\text{SAT}} = \frac{(Y_{\text{AC}} - Y_{\text{ISC}} - D) \cdot Y_{\text{AC}}}{R_{\text{SAT}}} / c,$$

其中: $\Delta Z_{\text{SAT}}$  表示分析中心卫星钟差解的一致性修正; $Y_{\text{AC}}$  和  $Y_{\text{ISC}}$  分别表示分析中心和 ISC 综合的轨道坐标解; $R_{\text{SAT}}$  表示卫星位置的矢径; $c$  表示光速; $D$  表示地心运动改正值。经过一致性修正后的分析中心卫星钟差  $Z'_{\text{SAT}}$  可用下式计算:

$$Z'_{\text{SAT}} = Z_{\text{SAT}} + \Delta Z_{\text{SAT}},$$

其中: $Z_{\text{SAT}}$  表示分析中心原始卫星钟差。经过一致性修正后,可统一分析中心钟差的参考基准。

### 1.2 统一卫星钟差参考基准

卫星钟差和测站钟差是一种相对偏差,其实际数值会随着基准的改变而改变。iGMAS 北斗数据处理与分析中心在进行钟差产品解算时,参考基准的选择主要有两种方案<sup>[7]</sup>:一种是选择一观测历元齐全的测站钟或卫星钟作为钟差解算的参考基准。这种方法的缺点是若选择的测站钟或者卫星钟缺失部分历元观测值,在进行钟差改正值估计时,会由于缺少对应的参考基准而导致估计不准确。另外一种为零条件均值法,即选中一组测站钟差,寻找使其均值为零的条件。这种方法相对于第一种方法比较简单,对测站或者卫星钟也没有特殊要求。由于 iGMAS 分析中心在进行钟差产品解算时选择的参考钟可能不同,因此解算的钟差会存在参考不一致。因此,在进行钟差综合之前,需要对分析中心钟差参考基准进行统一。

目前,IGS 解算钟差产品时采用的模型、策略以及偏差改正产品均相同,故 IGS 不同分析中心解算的钟差产品之间具有很好的外符合度,差值序列呈现出一维线性变化。IGS 的钟差参考统一策略是通过将广播星历钟差作为参考基准,计算分析中心钟差基准相对于参考基准的转换参数(钟偏、钟漂),来进行钟差时间参考框架的统一。iGMAS 分析中心可提供多 GNSS 系统(BDS、GPS、Galileo 和 GLONASS)的精密轨道/钟差产品。分析中心解算产品时,不同于 IGS 分析中心,各分析中心采用的软件、模型以及策略均有差异。陈康慷<sup>[7]</sup>发现,iGMAS 不同分析中心提供的钟差产品差值符合非线性变化;通常采用三步校准法校准各分析中心的钟差基准,消除钟差产品之间的非线性系统偏差,具体如下:

第一步:消除共性偏差。同一家分析中心解算的钟差产品不同卫星相同历元做差可消除共性偏差;选择一高稳定性高精度的测站或者卫星钟差作为参考钟,在同一历元处,各卫星与参考钟钟差值相互作差。作差的具体形式可用公式表示为:

$$Z''_{\text{SAT}} = Z'_{\text{SAT}} - Z'_{\text{ref}},$$

其中: $Z''_{\text{SAT}}$  表示第  $i$  历元某一卫星做内部一次差后的差值, $Z'_{\text{SAT}}$  第  $i$  历元某一卫星经过一致性修正后的钟差值, $Z'_{\text{ref}}$  表示第  $i$  历元参考钟差值。

第二步:初次统一参考基准。以广播星历为参考基准,使用抗差最小二乘求解转换参数,对分析中心钟差进行参考基准校准,校准后的钟差记为  $Z'''_{\text{SAT}}$ <sup>[9]</sup>。校准模型用公式表示为:

$$Z'''_{\text{SAT}} = Z''_{\text{SAT}} + O_{\text{SAT}} + R_{\text{SAT}} \cdot t,$$

其中: $O_{\text{SAT}}$  表示钟偏参数, $R_{\text{SAT}}$  表示钟漂参数, $t$  表示时间。

第三步:精确统一参考基准。利用初次校准后的钟差计算初始均值,以初始均值为新的参考,将分析中心钟差重新校准到新的基准,方法与第一次校准相同,仅更换参考基准,经过第二次校准后的钟差记为  $Z''''_{\text{SAT}}$ ,作为钟差综合的起算数据。

### 1.3 基于多项式附加周期项模型的钟差综合

卫星轨道和钟差高度相关,尤其是轨道径向的误差会被卫星钟差所吸收,因此在钟差数据中会有一些的周期特性<sup>[8-11]</sup>。由于不同卫星导航系统,卫星运行周期略有差异,中国北斗与欧盟的 Galileo 拥有 12 h 的主周期项,而美国 GPS 与俄罗斯 GLONASS 拥有 24 h 的主周期项<sup>[12]</sup>。钟差综合时,需考虑周期项差异这一因素,故本文选择多项式+周期项模型对不同分析中心钟差进行拟合。由于

钟差是时间频率数据,并且符合多项式模型,故本模型主要是在使用多项式对钟差数据进行拟合时,对多项式模型附加一定的周期,使模型更加符合钟差的特性,从而提高模型精度。采用该模型对不同分析中心钟差进行综合时,其特点:一是可提供统一的钟差模型对钟差进行综合,二是其模型的周期特性刚好符合不同类型卫星导航系统的周期特性。

图1中展示了多项式+不同周期项模型对武汉大学分析中心(WHU)提供的不同卫星导航系统卫星钟差拟合残差值。由图1可以看出:对于BDS、GPS以及GLONASS卫星钟差,其多项式+4个周期模型拟合残差最小,分别为0.05、0.01 ns以及0.04 ns;对于Galileo卫星钟差,其多项式+3个周期模型拟合残差最小,为0.02 ns。故本文针对不同卫星导航系统,采用的不同的钟差综合模型,如表1所示。

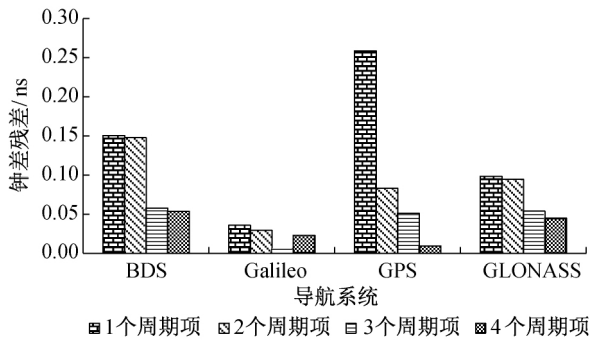


图1 BDS、GPS、Galileo、GLONASS 拟合残差

表1 BDS、GPS、Galileo、GLONASS 卫星  
导航系统钟差综合模型

卫星导航系统	钟差综合模型
BDS	二次多项式+4个周期项
GPS	二次多项式+4个周期项
GLONASS	二次多项式+4个周期项
Galileo	二次多项式+3个周期项

利用多项式+周期项模型对不同分析中心提供的卫星钟差进行拟合,将求得的拟合残差作为初始残差,利用初始残差求取分析中心钟差综合初始权  $W_{AC}$ 。利用初始权  $W_{AC}$  构造双淘汰组合抗差估计法,使得精度较差的分析中心钟差对钟差综合影响较小<sup>[13-14]</sup>。淘汰函数可以表示为:

$$\bar{p}_i = \begin{cases} p_i, & |v'_i| \leq k_0; \\ 0, & |v'_i| > k_0, \end{cases}$$

其中:  $v'_i$  表示初始残差  $v_i$  的标准化,  $v'_i = \frac{v_i}{\sigma_0}$  表示中误差,  $k_0$  表示中误差的倍数。由于在钟差综合之前已经对钟差数据进行异常值剔除,故此处可放

宽淘汰函数限差,本文中  $k_0$  取 3.00,即大于 3 倍限差的数据将被舍弃。

由测量误差理论可知,当残差大于 2.50 倍限差时,这部分数据将不再被认为是有效数据,IGG-III 权因子的形式则满足本文需求,构造迭代函数可表示为<sup>[9]</sup>:

$$\bar{p}_i^k = \begin{cases} \bar{p}_i, & |v'_i| \leq k_0; \\ \bar{p}_i \frac{k_0}{|v'_i|} \left( \frac{k_1 - |v'_i|}{k_1 - k_0} \right)^2, & k_0 < |v'_i| \leq k_1; \\ 0, & |v'_i| > k_1. \end{cases}$$

由于在此之前,已经利用淘汰函数对分析中心钟差进行了遴选,故此处可放宽限差要求,这里  $k_0$  取 2.50,  $k_1$  取 6.00 较为合适。  $k_1$  与  $k_0$  同义,均表示中误差的倍数。迭代完成后得到的等价权,记为  $W'_{AC}$ 。

最后,对 1.2 节中统一参考基准后的钟差  $Z'''_{SAT}$ ,采用加权平均的方式进行分析中心钟差综合:

$$Z_{COM} = \frac{\sum_{AC}^{N_{AC}} W'_{AC} \cdot Z'''_{SAT}}{\sum_{AC}^{N_{AC}} W'_{AC}},$$

其中:  $N_{AC}$  表示参与钟差综合的分析中心个数;  $Z_{COM}$  为钟差综合值。计算  $Z'''_{SAT}$  相对于  $Z_{COM}$  的均方根误差  $R_{MS}$  可表示为:

$$R_{MS} = \sqrt{\frac{\sum_1^{NS_{AC}} \sum_i^{NZ_{AC}^{SAT}} (Z_{COM} - Z'''_{SAT})_i^2}{\sum_1^{NS_{AC}} NZ_{AC}^{SAT} - 2}},$$

其中:  $NS_{AC}$  表示参与钟差综合的分析中心钟差产品包含的卫星总数,  $NZ_{AC}^{SAT}$  表示某一分析中心相应卫星的总历元数。

## 2 实验分析

本文首先采用多项式附加周期项拟合的方法计算 2020 年年积日 232—249 的钟差综合产品,记为 COM,并以 MGEX 分析中心 GFZ 的最终产品为参考评价综合产品的精度<sup>[15-16]</sup>来验证方法的有效性;然后,对综合钟差进行稳定性分析,进一步验证方法的有效性;最后,利用 BDS 单系统进行静态 PPP 实验,评估综合产品的精度和内符合度。

### 2.1 数据来源

iGMAS 各分析中心可提供 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 4 个系统的钟差产品。本文根据实验期间各分析中心提供的钟差产品连续性以及卫星缺失情况,选择长安大学(CHD)、中科院国家授时中心(NTS)、武汉大学(WHU)、西安测绘研究所(XRS)4 家分析中心提供的 2020 年年积日 232—

249 最终钟差产品作为钟差综合的实验数据。

## 2.2 综合产品精度分析

基于 2.1 节选择的实验数据, 本文分别计算 COM、ISC、NTS、XRS 4 种钟差产品相对于 GBM

钟差产品的差值, 选择 C05、C37、E31、G21、R12、R20 为代表, 画出钟差差值序列变化图, 如图 2 所示。

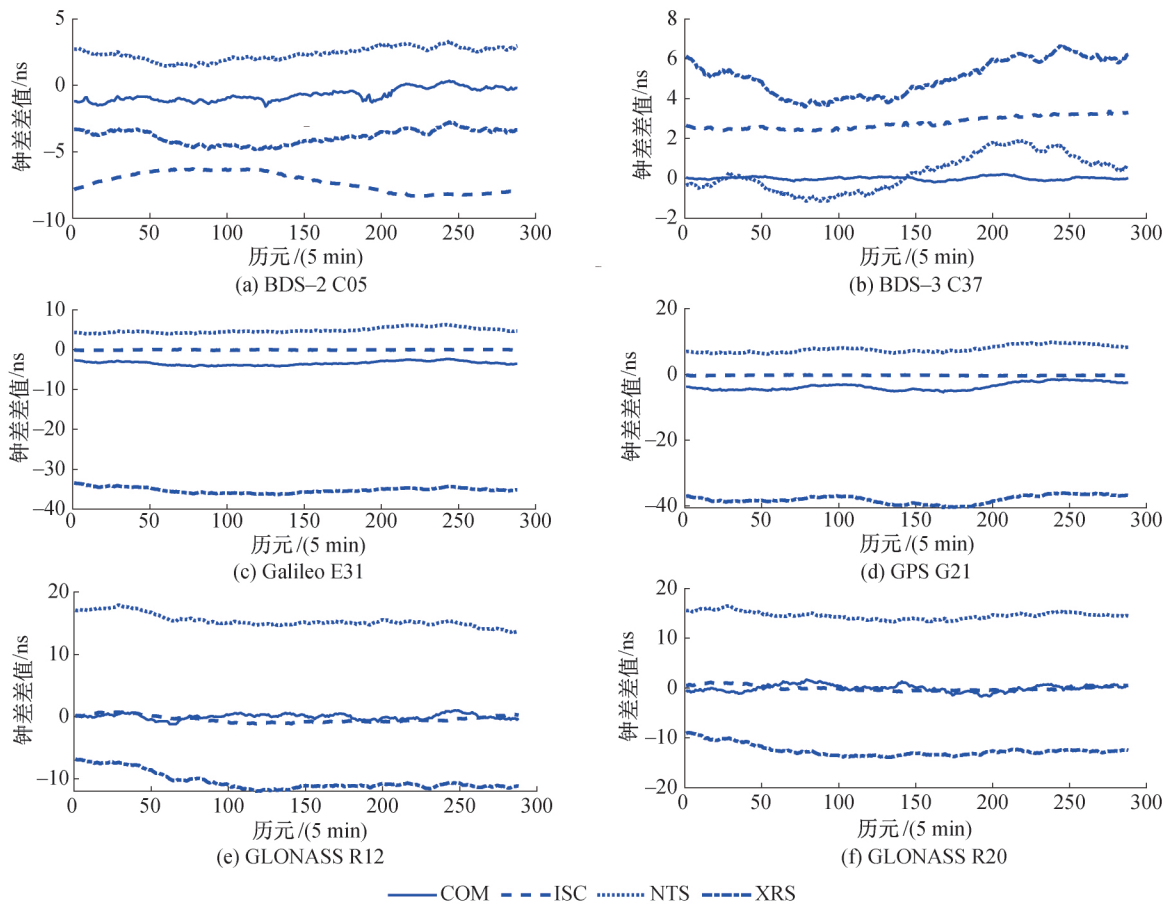
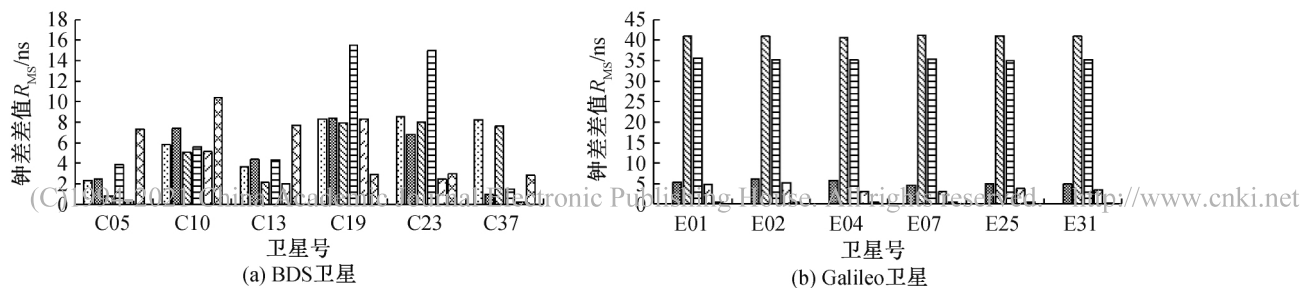


图 2 COM、ISC、NTS、XRS 钟差相对于 GBM 钟差差值序列

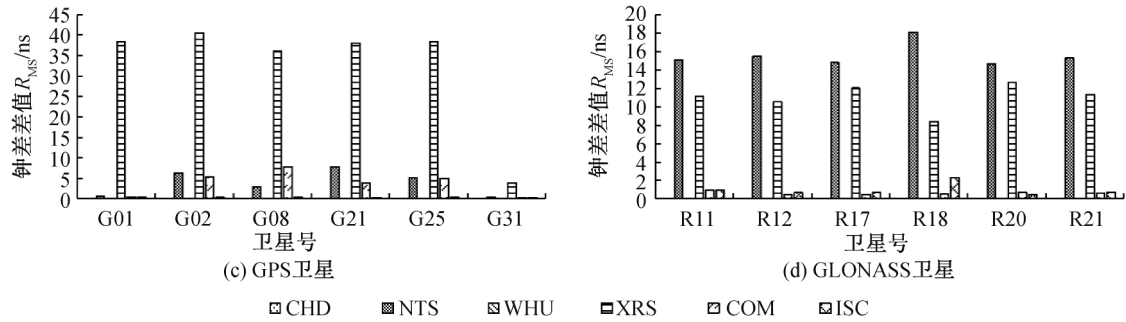
由图 2 可知, BDS 卫星综合钟差 COM 精度明显高于 ISC、NTS、XRS 钟差精度; Galileo 和 GPS 卫星综合钟差 COM 精度明显高于 NTS、XRS 钟差精度, 但比 ISC 钟差精度低; GLONASS 卫星综合钟差 COM 精度与 ISC 相当, 但好于 NTS、XRS 钟差精度。以上说明本文提出的钟差综合方法基本适用于 iGMAS 分析中心钟差综合, 但更适用于 BDS 和 GLONASS 卫星钟差的综合。由图 2 中还可以

看出, 当所选择的分析中心钟差精度越高, 得到的组合钟差精度也就越好, 从侧面反映出组合钟差的精度在一定程度上依赖于选择的分析中心钟差的精度。

为了更加全面地阐述本文提出的钟差综合方法的有效性, 本文求取了钟差差值的  $R_{MS}$  序列, 并取每颗卫星一天  $R_{MS}$  序列的中位数进行对比分析, 结果如图 3 所示。





图3 COM、ISC、CHD、NTS、WHU、XRS 钟差相对于 GBM 钟差差值  $R_{MS}$ 

在武汉大学分析中心提供的实验期间内的钟差数据中,由于部分天数缺少 GPS 和 GLONASS 卫星的钟差值,故图 3 中 GPS 和 GLONASS 部分未涉及 WHU 的  $R_{MS}$  序列。由图 3 可以看出 BDS 卫星中除了少量卫星(C19)外,COM 精度基本上均高于图中其他钟差的精度;而 GPS 系统和 GALILEO 系统卫星钟差的精度,ISC 最高,COM 次之;GLONASS 卫星钟差精度,ISC 与 COM 相当,CHD、NTS、XRS 较低。

### 2.3 综合钟差稳定性分析

稳定度作为频率源的一个基本技术指标,与频率源的时间间隔长短有关,通常用来检测频率源随时间波动的情况<sup>[17-18]</sup>。对卫星钟进行稳定性分析时,所选卫星钟差数据质量的好坏,会在一定程度上影响分析结果。故本文为了进一步验证所提钟差综合方法的有效性,分别选择 COM 与 ISC 两种卫星钟差数据进行频率稳定性分析,结果如图 4 和图 5 所示。

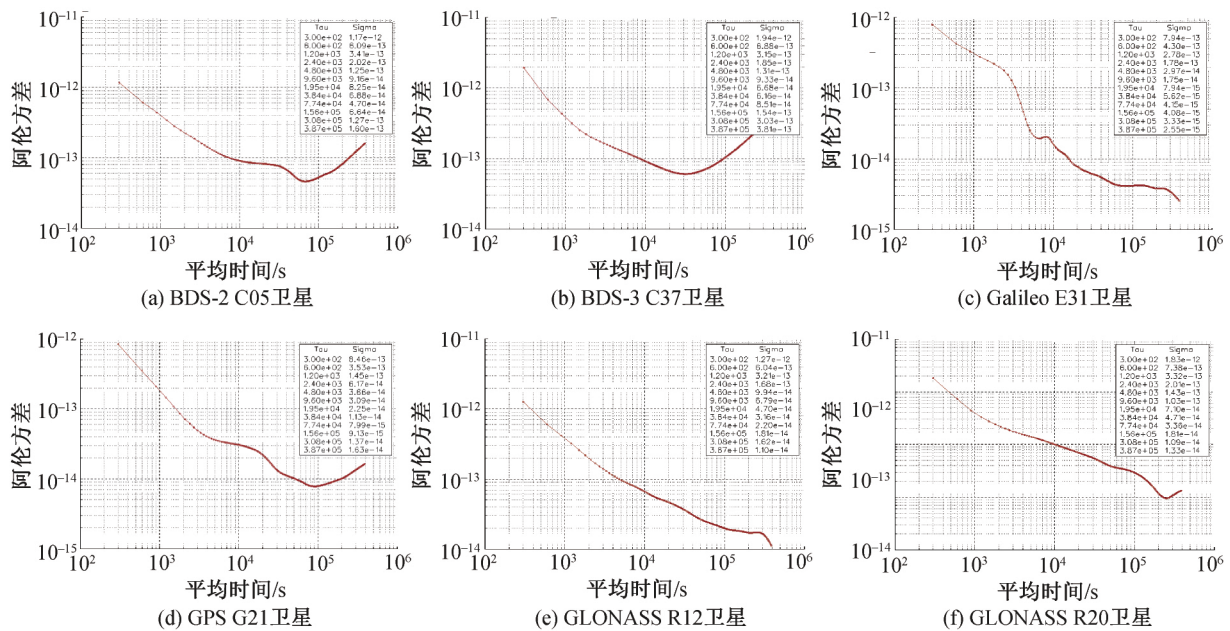
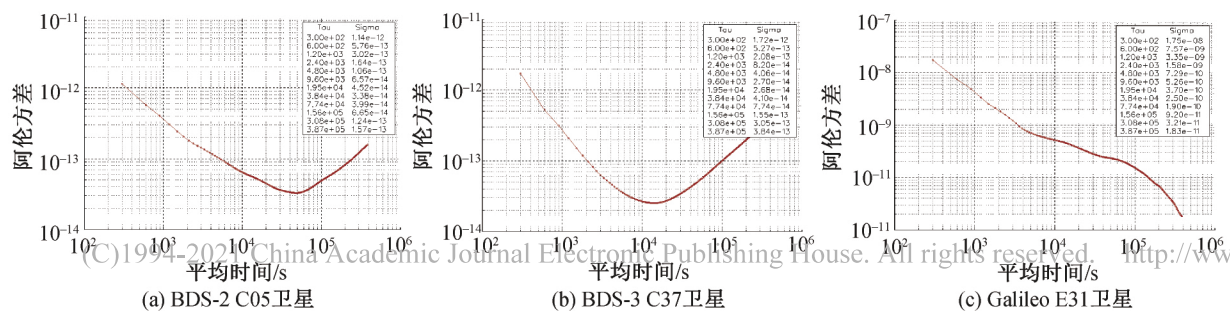


图4 ISC 卫星钟差的阿伦方差



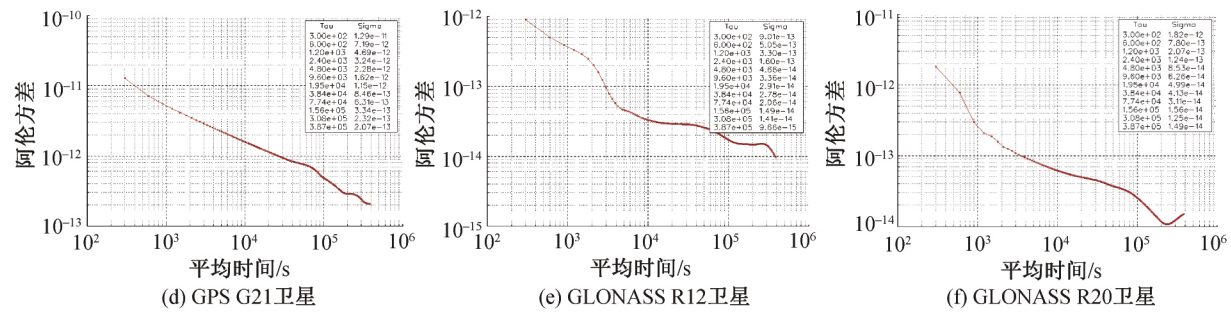


图 5 COM 卫星钟差的阿伦方差

比较图 4 与图 5 可知,使用 COM 与 ISC 钟差数据对 BDS 与 GLONASS 卫星钟进行稳定性分析的结果基本一致,甚至使用 COM 钟差数据稳定性分析的结果更加精确,这在一定方面说明 COM 的 BDS 与 GLONASS 卫星钟差的精度要比 ISC 精度略好;但 GPS 与 Galileo 卫星的稳定性分析结果显示 ISC 明显优于 COM,也在一定方面说明 COM 的 GPS 与 Galileo 卫星钟差的精度要比 ISC 精度差,这与 2.2 节实验现象相符合。为了更加精确地说明图 4 与图 5 的内容,将各卫星的阿伦方差值进行总结,结果见表 2。

表 2 基于 ISC 与 COM 钟差数据分析的卫星阿伦方差值

卫星 编号	千秒稳		万秒稳	
	COM	ISC	COM	ISC
C05	$3.00 \times 10^{-13}$	$3.40 \times 10^{-13}$	$4.50 \times 10^{-14}$	$8.30 \times 10^{-14}$
C37	$2.10 \times 10^{-13}$	$3.20 \times 10^{-13}$	$2.70 \times 10^{-14}$	$6.70 \times 10^{-14}$
E31	$3.30 \times 10^{-9}$	$2.80 \times 10^{-13}$	$3.70 \times 10^{-10}$	$7.90 \times 10^{-15}$
G21	$4.70 \times 10^{-12}$	$1.50 \times 10^{-13}$	$1.10 \times 10^{-12}$	$2.30 \times 10^{-14}$
R12	$3.30 \times 10^{-13}$	$3.20 \times 10^{-13}$	$2.90 \times 10^{-14}$	$4.70 \times 10^{-14}$
R20	$2.10 \times 10^{-13}$	$3.30 \times 10^{-13}$	$4.90 \times 10^{-14}$	$7.10 \times 10^{-14}$

表 3 北斗单系统静态精密单点定位精度

钟差 来源	CRO1			DYNG			FALK			FFMJ			GMSD		
	N	E	U	N	E	U	N	E	U	N	E	U	N	E	U
COM	0.45	1.36	1.66	1.06	2.29	2.78	1.57	1.88	3.17	1.02	8.38	8.51	1.06	5.11	5.37
ISC	0.56	1.64	2.45	1.51	1.65	2.54	1.07	1.01	2.21	1.16	2.16	2.67	1.06	1.75	2.61

3 结 语

为解决目前 iGMAS 钟差综合方法中存在的 GPS、BDS、GLONASS 和 Galileo 4 个卫星导航系统之间存在的周期项差异问题,本文提出了一种基于多项式附加周期项拟合的钟差综合方法,根据 GPS、BDS、GLONASS 和 Galileo 卫星运行的周期,选择不同的多项式附加周期性模型,对卫星钟差进行拟合,依据求得的拟合残差进行定权,对钟差进行加权平均,得到钟差综合值,记为 COM。为了验证提出的方法的有效性,对综合得到的钟差进行精度对比,稳定性分析以及北斗单系统静态 PPP 实验,

2.4 综合产品内符合度分析

为了验证 COM 钟差与轨道的内符合度,本文选择 5 个 MEGX 测站,钟差产品分别使用 COM 钟差与 ISC 钟差,其余产品均使用 iGMAS 综合中心的产品进行北斗单系统静态精密单点定位实验。以 IGS GBM 分析中心产品的 GPS 静态精密单点定位结果为参考,来验证两种钟差产品静态 PPP 的精度,实验结果见表 3。

从表 3 可以看出:除了 FALK 测站之外,COM 钟差 N 方向定位精度基本稳定在 1.00 cm 左右,均高于 ISC 钟差 N 方向定位精度;E 方向定位精度,ISC 要高于 COM;ISC 与 COM 钟差在 U 方向点的定位精度相当。通过求取 N、E、U 三个方向定位精度的平均  $R_{MS}$  可得:使用 COM 钟差进行 PPP 实验,可获得 3 cm 左右的定位精度。这说明 COM 钟差与轨道具有较好的内符合度,并且精密单点定位实验也进一步验证了钟差产品精度分析的结果。

得出如下结论:

a) 对于 GPS、BDS、GLONASS 和 Galileo 4 个卫星导航系统,对其卫星钟差进行综合时选用的模型略有差异,BDS、GLONASS 和 Galileo 系统均采用二次多项式+4 个周期的模型进行钟差综合, Galileo 系统则采用二次多项式+3 个周期的模型进行卫星钟差综合。

b) 综合钟差 BDS 与 GLONASS 卫星的  $R_{MS}$  最优且较稳定,GPS 与 Galileo 卫星的  $R_{MS}$  略差于 ISC 钟差,但优于 CHD、NTS、WHU、XRS 钟差。

c) 综合钟差 BDS 单系统静态 PPP 的结果与 ISC 相当,位置精度基本稳定在 3.00 cm 左右。

该方法在钟差综合时能有效解决因不同 GNSS 卫星导航系统之间周期性差异而导致综合钟差精度较差问题,本文提出的基于多项式附加周期项拟合的钟差综合方法可以作为 iGMAS 分析中心钟差综合方法的有益补充。

由于轨道与钟差相关性非常强,本文提出的方法尚未涉及 iGMAS 分析中心轨道产品的综合方法研究,在下一步的工作将会对轨道产品综合方法展开研究。

#### 参考文献:

- [1] Kouba J, Springer T. New IGS station and satellite clock combination [J]. GPS Solutions, 2001, 4(4):31-36.
- [2] Yao Y B. Theory and realization of GPS orbit integration [J]. Geo-Spatial Information Science, 2008, 11(1): 1-5.
- [3] Springer T A, Zumberge J F, Kouba J. The IGS Analysis Products and Consistency of the Combined Solutions [R]. Darmstadt: IGS Analysis Center Workshop, 1998.
- [4] Chen L, Song W W, Yi W T et al. Research on a method of real-time combination of precise GPS clock corrections[J]. GPS Solutions, 2017, 21(1):187-195.
- [5] Neilan R, Fisher S, Walia G, et al. IGS Central Bureau technical report 2015 [J]. Arquivos de Neuro-Psiquiatria, 2016, 70(11), 909-910.
- [6] Chen K K, Xu T H, Yang Y X. Robust combination of IGS analysis center GLONASS clocks [J]. GPS Solutions, 2017, 21(3): 1251-1263.
- [7] 陈康慷,徐天河,杨玉国,等. iGMAS GNSS 钟差产品综合与评估[J]. 测绘学报, 2016, 45(S2): 46-53.
- [8] 杨定江,马泽林,李卓凡,等. 顾及周期项的北斗卫星钟差建模与预报[J]. 北京测绘, 2020, 34(6):819-824.
- [9] 马卓希,杨力,贾小林. BDS 星载原子钟周期项特性及预报研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(3): 292-296.
- [10] 郑作亚,党亚民,卢秀山,等. 附有周期项的预报模型及其在 GPS 卫星钟差预报中的应用研究[J]. 天文学报, 2010, 51(1): 95-102.
- [11] 孙大双,吕志平,王宇谱,等. 一种顾及钟差周期误差和随机特性的卫星钟差预报方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(12):1078-1082.
- [12] 苗伟,王潜心,胡超,等. iGMAS 分析中心产品一致性分析及其应用研究[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(5): 45-57.
- [13] 邱卫宁. 具有稳健初值的选权迭代法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(4):452-454.
- [14] 赵丽华,杨元喜,王庆良. 考虑区域构造特征的地壳形变分析拟合推估模型[J]. 测绘学报, 2011, 40(4):435-441.
- [15] 丁毅涛,郭美军. 基于不同机构钟差产品的 GNSS 星载钟性能分析与评估[J]. 时间频率学报, 2020, 43(1): 72-84.
- [16] 计国锋,杨志强,贾小林. MGEX 和 iGMAS 的多系统轨道和钟差产品精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(1): 13-19.
- [17] 毛亚,王潜心,胡超,等. BDS-3 卫星钟差特性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(1): 53-61.
- [18] 王宇谱,吕志平,王宁. BDS 星载原子钟长期性能分析[J]. 测绘学报, 2017, 46(2):157-169.

(责任编辑:康 锋)