

# MADDOCA-LEX 高频 GPS 卫星钟差 短期预测精度分析

姚盛, 张绍成, 李玮, 独士康

(中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 湖北 武汉 430078)

**摘要:** 日本准天顶卫星系统(QZSS)卫星通过 L 波段实时播发高频全球卫星导航系统(GNSS)精密轨道和钟差产品,为 GNSS 导航用户提供实时精密单点定位(PPP)服务. 本文以 JAXA MADDOCA 数据中心提供的 1 s 采样率 GPS 卫星钟差数据为研究对象,首先采用阿伦方差对卫星钟差的短期稳定性进行评估;然后分别采用一阶多项式、二阶多项式和灰色模型对高频钟差产品进行建模,在 5 s, 10 s 和 30 s 的拟合窗口内预报后续 10 s 内钟差,并基于预报残差的均方根误差(RMS)评定不同类型 GPS 卫星钟差产品的短期预报精度. 基于 2020 年 1 月 1 日—21 日连续 21 天的实时高频钟差统计分析结果表明,不同型号的 GPS 卫星钟差 1 s, 5 s 和 10 s 的短期稳定性均能达到  $10^{-12}$  量级;对比预报精度显示,10 s 以内的拟合窗口采用最简单的一阶多项式最为稳定可靠,10 s 延迟预报 RMS 精度可控制在 0.1 ns 以内;若采用 30 s 的拟合窗口,考虑钟差频漂特性的二阶多项式则更为稳定可靠,预报钟差的 RMS 精度能达到 0.15 ns 以内. 由此可见,本文基于 MADDOCA-LEX 钟差产品的实时预报精度可以满足厘米级 PPP 的需求.

**关键字:** 全球定位系统;卫星钟差;阿伦方差;稳定性分析;钟差预报

**中图分类号:** P228.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1008-9268(2020)03-0016-06

## 0 引言

卫星钟的稳定性是影响全球卫星导航系统(GNSS)导航定位精度的重要因素<sup>[1]</sup>. 国际 GNSS 服务组织(IGS)提供采样率为 30 s 和 5 min 的 GPS 精密钟差,但其较低的采样频率和产品时延无法满足实时高频高精度用户的需求<sup>[2]</sup>. 日本准天顶卫星系统(QZSS)作为一个区域性卫星导航系统,除播发与 GNSS 相同的导航定位信号外,还通过卫星频段播发采样率为 1 s 的精密钟差和采样率为 30 s 的精密轨道产品<sup>[3]</sup>,使得能够消除在分析卫星钟稳定性时使用较低频采样率数据内插高频数据引起的粗差<sup>[4]</sup>. 日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)提供的精密轨道和钟差产品是 MADDOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis)数据处理软件生成,并

通过 L 频段 1278.75 MHz 的实验频率播发给地面用户,因而也被称为 MADDOCA-LEX(L-band Experiment)产品<sup>[5]</sup>.

国内外学者已就 GNSS 卫星钟差的中长期稳定性和预报技术进行了较多的研究:文献[6]基于 IGS 提供的采样率为 30 s 的钟差产品对卫星钟的中长期稳定性进行了分析<sup>[6]</sup>,文献[7]采用灰色模型对 6 h 的钟差进行了中长期预报和最优预报模型的探究<sup>[7]</sup>. 这些研究主要针对卫星钟在与地面监测站失联后,仅靠自身维持与系统时间同步时所做的中长期预报,文献[8-9]揭示了其普遍精度一般在纳秒级别,主要用于数米精度的导航应用. JAXA 发布的 MADDOCA-LEX 产品提供了 0.1 ns 精度的钟差,但实时播发中可能存在 6~8 s 的时延<sup>[5]</sup>,在用户使用过程中钟差对测距精度的影响会进一步增加. 因此需要分析卫星钟差在数秒内的短期稳

收稿日期: 2020-03-09

资助项目: 国家自然科学基金(41804033, 41504023)

通信作者: 张绍成 E-mail: gnss.zsc@foxmail.com

定性,评估实时钟差在数秒时延条件下的精度。

本文首先对 MADOCA-LEX 产品及特性进行简要介绍,然后介绍了卫星钟差稳定性分析和预报的方法,最后基于 MADOCA-LEX 提供的高频 GPS 钟差数据和阿伦方差对卫星钟短期稳定性进行分析,并采用多项式模型和灰色模型进行短期钟差预报,评价模型对不同类型 GPS 卫星钟差预报的精度。

## 1 MADOCA-LEX 产品

日本准天顶系统(QZSS)是由日本宇宙航空开发机构(JAXA)运营,自2017年2月28日起由日本内阁府(CAO)控制 QZS-1 覆盖整个亚洲-大洋洲的区域性卫星导航系统。2018年11月1日,日本官方宣布 QZSS 开始正式提供 LEX 增强服务<sup>[10]</sup>。为满足 GNSS 用户实时精密单点定位(PPP)等高频高动态应用的需求,JAXA 基于 MADOCA 软件平台实时收集处理全球 52 个 GNSS 系统监测站的观测数据,解算 GNSS 卫星的高频轨道参数和卫星钟差,并通过互联网或 QZSS 卫星的导航频段实时播发给地面接收机,为用户提供不需要外部互联网连接的实时 PPP 服务。

若用户需要对产品质量进行分析,可以从 JAXA 的 FTP 服务器上下载包括 RTCM10403.2-SSR (ssrXXXXX. rtm)、RINEX SP3 (madocaXXXXX. sp3) 格式的 MADOCA 产品 (ftp://mgmds01.tksc.jaxa.jp/)。本文所用 1 s 采样率的 MADOCA 实时钟差改正产品格式为 RTCM-SSR,电文类型为 1058,实时 GPS 精密钟差产品是通过广播星历计算的卫星钟差和 MADOCA 实时钟差改正产品恢复得到。

MADOCA-LEX 产品的数据主要包括轨道、时钟、差分码偏差和用户测距精度(URA)等信息,其中卫星轨道数据每 30 s 更新一次;钟差数据每 1 s 更新一次,延迟一般为 6~8 s;而 URA 则用于评估 GPS、GLONASS、Galileo 和 QZSS 的距离精度,每 30 s 更新一次;差分码偏差的更新周期为 1 d。该产品 GPS 卫星钟差的目标精度为 0.1 ns,实时定位误差小于 10 cm<sup>[5]</sup>。国内外学者已从该产品的钟差精度<sup>[11]</sup>、可用性<sup>[10]</sup>和在 PPP 领域的应用<sup>[12]</sup>等多方面对 MADOCA-LEX 产品进行了分析,证实了该产品的定位服务精度能够达到厘米级 PPP 应用的需求。

## 2 钟差稳定性分析及预报模型

### 2.1 数据预处理方法

星载原子钟在轨期间,因硬件故障或外界环境等因素,原始钟差数据中不可避免地会出现粗差。为消除粗差数据对评估结果的影响,需对原始钟差数据进行数据预处理<sup>[1]</sup>。数据预处理前,通常需要先要将原始钟差转化为频率数据。转换公式为

$$f_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{\tau}, \quad (1)$$

式中: $x_i$  为  $i$  时刻钟差数据; $f_i$  为频率数据。考虑到较长时间的钟差频率数据的数据量较大,为提高效率,本文使用中位数法对粗差数据进行剔除,具体公式如下<sup>[13]</sup>:

$$MAD = \text{Median}\{|y_i - m| / 0.6745\}, \quad (2)$$

式中, $m = \text{Median}\{y_i\}$ ,当观测量  $|y_i| > (m + n \cdot MAD)$  时,将其标为粗差点,本文仅对数据进行  $n = 3$  的粗差剔除的预处理操作。

### 2.2 基于阿伦方差的稳定性分析

GPS 星载原子钟主要有铷钟和铯钟两种,其中铯钟频率输出频率频漂接近于 0,常使用阿伦方差<sup>[14]</sup>进行稳定度分析;而铷钟长期频漂较为明显,一般采用哈达玛方差<sup>[6]</sup>进行稳定度分析。但考虑到铷钟短期内频漂并不十分明显<sup>[15]</sup>,为保证各原子钟稳定性分析方法的一致性,本文统一使用阿伦方差对卫星钟稳定性进行分析,其公式表达如下:

$$\delta_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M' - 1)} \sum_{i=1}^{M'-1} [\bar{y}_{i+1}(m) - \bar{y}_i]^2, \quad (3)$$

式中: $\tau$  为平滑时间; $\bar{y}_{i+1}(m)$  为第  $i + 1$  个平滑时间内频率数据的平均值; $M' = \text{int}(M/m) + 1$ 。

### 2.3 参数估计模型

#### 2.3.1 多项式模型(PM)

PM 是短期钟差拟合预报中应用最广泛的模型之一,能够较好地表征卫星钟时频特性,常应用于 GNSS 实时导航定位等应用的钟差预报<sup>[1]</sup>。常用的多项式模型主要包括一阶模型(LM)<sup>[16]</sup>、二阶模型(QP)<sup>[17]</sup>和高阶多项式模型。数学表达式如下:

$$x_i = a_0 + a_1(t_i - t_0) + a_2(t_i - t_0)^2 + \dots + a_m(t_i - t_0)^m + \int_{t_0}^{t_i} y(t) dt, \quad (4)$$

式中: $x_i$  为钟差预报值; $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$  为钟差

模型参数,就卫星钟的物理特性而言,前 3 个参数分别对应钟差、钟速和钟漂; $\int_{t_0}^{t_i} y(t) dt$  为卫星钟差随机误差项,一般用原子钟的稳定度描述其统计特性.

2.3.2 灰色模型(GM)

对于采样间隔均匀的钟差时间序列,可利用灰色模型进行建模和预报,其模型公式可表达如下<sup>[18]</sup>:

$$x^{(0)}(k) = (1 - e^a) \left[ x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-a(k-1)}, \quad (5)$$

式中: $x^{(0)}(k)$  表示钟差原始序列中的第  $k$  个数据, $k=1,2,\dots,n$ ;  $a$ 、 $u$  为待确定参数,其值可以通过对样本或样本的衍生数列采用最小二乘准则求得.灰色模型的优点是只需要少量的已知数据就能建立模型;缺点是无法充分利用更多的已有数据来提高其预报精度.本文预报钟差所用时间序列数据最少为 5 个,最多仅有 30 个,灰色模型具备可行性.

3 数据分析

3.1 算例数据

本文采用 2020 年 1 月 1 日-21 日连续 21 天的 1 s 钟差数据(MADDOCA 服务器 1 月 24-28 日处于维护状态,数据产品中中断服务),对所有在轨 GPS 卫星钟性能进行评估.由于 MADDOCA-LEX 产品暂无最新的 Block III A 卫星的钟差产品,因而本文无法对最新的 G04、G18 卫星钟差进行评估.为便于比较分析,将本文涉及的所有卫星分类列举如表 1 所示.

表 1 本文涉及 GPS 卫星及原子钟类型分类

卫星及原子钟类型	卫星
Block IIF CS	G08, G24
Block IIF RB	G01, G03, G06, G09, G10, G25, G26, G27, G30, G32
Block IIR-M RB	G05, G07, G12, G15, G17, G29, G31
Block IIR RB	G02, G11, G13, G14, G16, G19, G20, G21, G22, G23, G28

3.2 稳定性分析

使用 2020 年 1 月 1 日-21 日的的数据,采用阿伦方差画出原子钟在 [1, 5, 10, 50, 100, 200, 300, 400, 1000]s 的稳定性结果如图 1 所示.由图可知,

几种不同类型卫星钟差的 10 s 稳定性均在  $10^{-12}$  s 量级且 5 s 以内稳定性无明显差异;就 5 s 以上的稳定性而言,配备铷钟的 Block IIF 卫星钟差稳定性的优势逐渐体现,百秒稳在  $10^{-12}$  到  $10^{-13}$  量级,而配备铯钟的 Block IIF 卫星钟差稳定性略差于其他卫星. Block IIR-M 钟与 Block IIR 钟差稳定特性整体上无明显差异,千秒稳在  $10^{-13}$  s,相较于 Block IIF 铷钟而言,该钟稳定性一致性要略微分散.图 1 中体现的各种卫星 100 s 以上稳定特性与使用 IGS 中心提供的采样率为 30 s 的数据分析的 GPS 卫星钟稳定性的结论一致<sup>[19]</sup>.由于本文考虑的是实时 PPP 中,高频钟差在 6~8 s 的数据延迟情况下所存在的精度损失,因此主要关注原子钟 5~10 s 时间间隔的稳定特性.

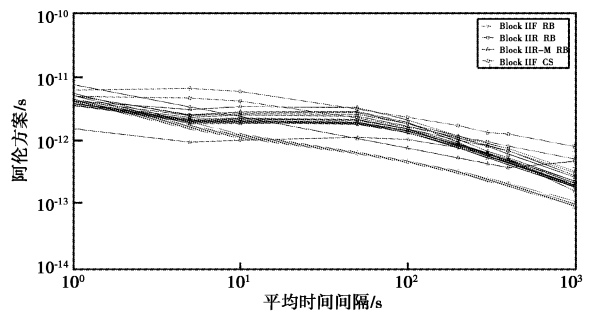


图 1 不同类型 GPS 卫星高频钟差稳定性

为验证各种卫星钟差多天的短期钟差稳定性,本文以 G08(Block II F 铯钟),G15(Block II R-M 铷钟),G21(Block II R 铷钟),和 G32(Block II F 铷钟)4 颗典型卫星为例,其 2020 年 1 月 1 日-21 日连续 21 天的 10 s 稳定性对比如图 2 所示;4 种不同类型卫星钟差的 10 s 稳定性都在  $10^{-12}$  量级,且绝对数值无明显变化,验证了本文的钟差产品稳定性分析的可靠性.

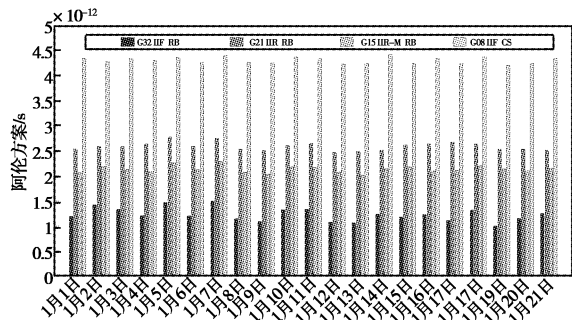


图 2 四颗典型 GPS 卫星单天钟差的 10 s 稳定性

### 3.3 短期钟差预报

分别使用 LM、QP 和 GM 对 GPS 卫星钟差进行建模预报,评估不同拟合窗口长度对钟差预报精度的影响.选取 JAXA 数据中心提供的 2020 年 1 月 1 日一整天的采样间隔为 1 s 的实时精密钟差数据,将全天 86 400 个历元分别按照 5 s、10 s 和 30 s 间隔分为若干组,每组数据均采用 LM、QP 和 GM 建立钟差预报模型并预测后续 10 s 时长的钟差,然后以 MADOCA-LEX 提供的后续实际钟差为参考值,评价预报钟差的精度.本文选用预报残差的均方误差(RMS)作为衡量钟差预报精度的指标,来比较不同模型和拟合窗口长度的精度差异.

首先使用 5 s 拟合窗口,分别采用 LM、QP 和 GM 模型建模,预报残差的 RMS 值随预报时长的变化趋势如图 3 所示:三种模型的预报精度都随着预报时长增加而降低,且铯钟精度随时间衰减最为显著,其中 LM 模型预报残差的 RMS 值均在 0.1 ns 以内,GM 模型的精度稍差,RMS 值最大达到 0.15 ns. QP 模型预报精度较低,10 s 后 RMS 值可达 0.4 ns,此偏差折合测距误差达到 12 cm,无法保证厘米级的定位精度.

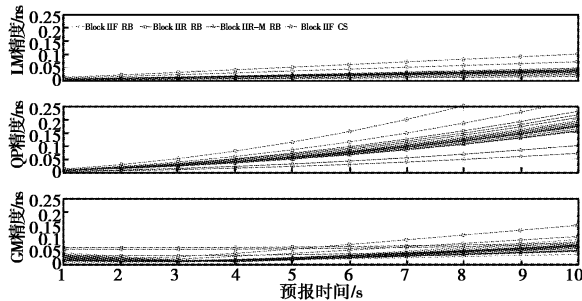


图 3 5 s 拟合窗口长度 10 s 钟差预报残差 RMS 对比

将拟合窗口增加到 10 s 后,预报精度如图 4 所示:三种模型的预测精度与使用 5 s 时长时基本一致,其中 LM 模型预报精度仍为最佳,RMS 小于 0.1 ns, QP 模型的预报精度有较大提高,其 RMS 值大多低于 0.2 ns,而 GM 预测模型则有两颗 RMS 值接近 0.2 ns 的 Block-IIR 铷钟,预报精度较差,稳定性还有待提高.

拟合窗口再次增加至 30 s 时长的钟差预报精度如图 5 所示:QP 模型的预报精度显著提高,所有卫星的 RMS 值均低于 0.1 ns. LM 模型因未考虑钟的频漂特性,预报精度明显退化,误差可达 0.4 ns;该现象在 GM 预报模型中体现得更为明

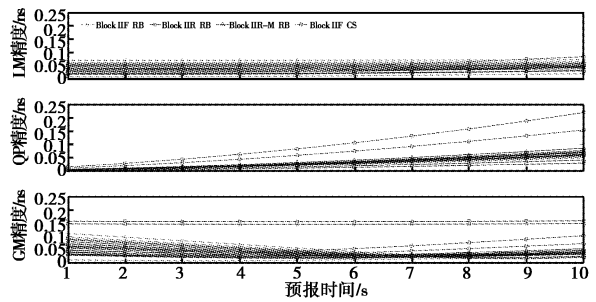


图 4 10 s 拟合窗口长度 10 s 钟差预报残差 RMS 对比

显,除两颗精度明显发散的 Block IIR 卫星以外,其他卫星预报钟差的 RMS 值也接近 0.5 ns.因此,使用 30 s 拟合时长进行钟差预报时,QP 模型精度要高于 LM 和 GM 模型.

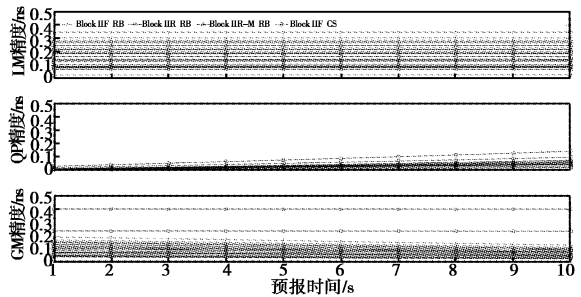


图 5 30 s 拟合窗口长度 10 s 钟差预报残差 RMS 对比

上述基于不同种类卫星钟差的短期预报对比结果可见,加载铷钟的卫星钟差预报精度整体略高于 Block IIF 铯钟,与图 1 钟铷钟 10 s 短期稳定性高于铯钟一致.采用 5 s 和 10 s 拟合窗口时,一阶线性模型即可得到较好钟差预报精度,延迟 10 s 之后其预报精度仍然不超过 0.1 ns.如采用 30 s 拟合窗口,则需要考虑卫星钟的频漂特性,因此采用 QP 预报精度更优,达到 0.15 ns 以内.灰色预报模型常见于钟差产品的长期预报,本文的 3 种拟合窗口长度下短期钟差预报中未体现优势,不建议用于钟差短期预报.

## 4 结束语

本文基于 MADOCA-LEX 产品提供的 1 s 采样率的 GPS 精密钟差,首先用阿伦方差分析各卫星原子钟的短期稳定性,并用多天的数据比较不同类型 GPS 卫星钟的多天 10 s 稳定性.然后分别使用 LM、QP 和 GM 对原子钟 10 s 内的钟差进行了预报和精度评估.分析结果显示:

- 1)MADOCA-LEX 提供的高频钟差产品 5 s

和 10 s 稳定性都达到了  $10^{-12}$  量级,数据产品 10 s 以内漂移理论上不会超过 0.1 ns;

2)采用 5 s 或 10 s 拟合时长窗口进行钟差预报时,因卫星钟差的频漂都不明显,LM 模型相对于 QP 和 GM 模型而言预测精度最高且效果最为稳定;若采用 30 s 时长的窗口进行钟差预报,QP 模型因考虑了卫星钟的频漂效应,预测效果更为可靠.两种模式的钟差预测残差 RMS 值都可达到 0.15 ns 以内,满足厘米级 PPP 的需求.

### 参考文献

- [1] 黄观文. GNSS 星载原子钟质量评价及精密钟差算法研究[D]. 西安:长安大学,2012.
- [2] ZHANG X H, LI X X. Satellite clock estimation at 1Hz for realtime kinematic PPP applications[J]. GPS solutions, 2011, 15 (4): 315-324. DOI: 10. 1007/s1029-010-0191-7.
- [3] HARIMA K, CHOY S, WAKABAYASHI Y, et al. Transmission of augmentation messages for precise point positioning utilizing Japanese QZSS LEX signal [C]// Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS + 2014), 2014: 2467-2477.
- [4] HESSELBARTH A, WANNINGER L. Short-term stability of GNSS satellite clocks and its effects on precise point positioning [C]// Proceedings of ION GNSS 2008, Savannah, Georgia, 2008:1855-1863.
- [5] MADOCA Product [DB/OL]. (2020-01-30). [https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public\\_index\\_en.html](https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html).
- [6] 毛悦,陈建鹏,戴伟,等. 星载原子钟稳定性影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(10): 1182-1186.
- [7] 李玮,程鹏飞,秘金钟. 灰色模型在快速卫星钟差预报中的应用[J]. 测绘科学, 2010, 35(3): 43-45.
- [8] 王宇谱. GNSS 星载原子钟性能分析与卫星钟差建模预报研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2017.
- [9] 赵琳琳. BDS/GPS/Galileo 星载原子钟长期在轨性能评估分析[D]. 武汉:武汉大学,2018.
- [10] ZHANG S C, DU S K, LI W, et al. Evaluation of the GPS precise orbit and clock corrections from MADOCA Real-time products[J]. Sensors, 2019, 19 (11):2580. DOI:10. 3390/s19112580.
- [11] ZAMINPARDAZ S, WANGF K, TEUNISSEN P J G. Australia-first high-precision positioning results with new Japanese QZSS regional satellite system [J]. GPS solutions, 2018, 22(4):101. DOI: 10. 1007/s10291-018-0763-5.
- [12] CHOY S, HARIMA K, LI Y, et al. GPS precise point positioning with the Japanese Quasi-Zenith satellite system LEX augmentation corrections[J]. Journal of navigation, 2015, 68 (4): 769-783. DOI: 10. 1017/S0373463314000915.
- [13] 张焕. GPS 星载钟特性分析及短期预报算法研究[D]. 陕西:长安大学,2017.
- [14] 李明哲,张绍成,胡友健,等. 基于高频观测值的不同 GNSS 卫星钟稳定性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(10):1490-1495,1503.
- [15] 郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究[J]. 郑州:中国人民解放军信息工程大学,2006.
- [16] JANICKA J, TOMASZEWSKI D, RAPINSKI J, et al. The prediction of geocentric corrections during communication link outages in PPP [J]. Sensors, 2020, 20(3):602. DOI:10. 3390/s20030602.
- [17] 宫晓春,王宇谱,王宁,等. GPS 卫星钟差改正数实时预报算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(6): 867-873.
- [18] 王建敏,李特,谢栋平,等. 北斗精密卫星钟差短期预报研究[J]. 测绘科学, 2020, 45(1):33-41.
- [19] 孟祥广,孙越强,杜起飞,等. 北斗卫星在轨原子钟稳定性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(7): 574-576,580.

### 作者简介

**魏盛** (1999—),男,研究方向为 GNSS 精密定位与测量应用.

**张绍成** (1982—),男,博士,讲师,主要研究方向为基于 GNSS 信号的精密定位与大气反演.

**李玮** (1985—),女,博士,讲师,主要研究方向为 GNSS 精密定位算法研究.

**独士康** (1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为基于星基增强信号的精密单点定位.

## The prediction accuracy of the MADOCA-LEX high rate clock products

GUO Sheng, ZHANG Shaocheng, LI Wei, DU Shikang

(School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences,  
Wuhan 430078, China)

**Abstract:** The Japanese QZSS satellite will provide real-time PPP services by broadcasting the L-band augmentation signals with real time high rate GNSS precise orbit and clock corrections. This paper based on the 1Hz high rate GPS clock provided by JAXA MADOCA data center, we firstly evaluates the short-term stability of satellite clock corrections with Allan variance. To simulate the real time products latency, the first-order, second-order polynomials and grey model were used as the clock predictions model, and the fitting windows with 5, 10 and 30 s were used to predict the following 10 s clocks corrections. Over 21 continuous days data range from January 1 to 21 on 2020 were used on the clock stability analysis, the results show that the GPS clocks can reach  $10^{-12}$  with 1, 5 and 10 s intervals. On the prediction model comparison, a whole days analysis results show that, if less than 10 s fitting windows were used, the first-order linear model shows highest stability with accuracy less than 0.1 ns, and if the fitting windows were set to 30 s, the second-order polynomial model has the highest accuracy as the clock drift effects were taken into account. It can be concluded that the satellite clocks from MADOCA-LEX product could be precisely predicted to satisfy the real-time precise point positioning applications.

**Keywords:** Global Positioning System; satellite clock; Allan variance; stability analysis; clock prediction

(上接第 15 页)

## Quick extraction and analysis of deformation information based on BDS similar-single-difference model

CHEN Peiwen<sup>1,2,3</sup>, YU Xuexiang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Hao<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Key Laboratory of Aviation-aerospace-ground Cooperative Monitoring and Early Warning of Coal Mining-induced Disasters of Anhui Higher Education Institutes, Anhui University of Science and Technology, KLAHEI (KLAHEI18015), Huainan 232001, China;

3. Coal Industry Engineering Research Center of Mining Area Environmental And Disaster Cooperative Monitoring, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the GPS similar-single-difference model cannot extract the large deformation information, this paper takes full advantage of the three-frequency signal broadcasted by the BeiDou full constellation, A method for quick extraction of deformation information with triple-frequency combination ambiguity resolution and similar-single-difference model based on BDS was studied. Experiments on the high-precision three-dimensional mobile testing platform show that the above method can quickly extract large deformation information. its accuracy is equivalent to that of GPS and can reach centimeter level.

**Keywords:** BDS; triple-frequency combination; similar-single-difference model; single epoch; large deformation