



GLONASS星载原子钟的长期特性分析

赵丹宁¹ 雷雨^{1,2}

1 宝鸡文理学院电子电气工程学院,陕西 宝鸡,721013

2 西安邮电大学计算机学院,陕西 西安,710121

摘要:俄罗斯全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GLONASS)于2011-10恢复提供全球服务,分析其星载原子钟特性对系统性能评估、完好性监测、卫星钟差确定和预报等具有重要意义。首先基于俄罗斯联邦航天局GLONASS定位、导航、授时信息与分析中心(Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, IAC)提供的2016-01-01—2019-05-11多星定轨解算的GLONASS精密卫星钟差产品,利用包含原子钟相位、频率与频漂参数的二次多项式拟合卫星钟差模型,分析了GLONASS在轨铯钟相位、频率、频漂与星钟模型噪声的长期变化特性;然后采用重叠哈达玛方差计算了铯钟的频率稳定度。结果表明,GLONASS在轨铯钟的相位和频率变化相对平稳;在轨铯钟模型的噪声水平和频漂均值分别为0.7 ns和 $5.94 \times 10^{-15}/\text{d}$;GLONASS在轨铯钟千秒频率稳定度保持在 10^{-13} 量级,频率稳定度随着星钟模型噪声增大而降低;新的卫星钟具有更优良的物理特性和更低的模型噪声。

关键词:GLONASS;卫星钟;星钟模型;频漂;频率稳定度

中图分类号:P228.41

文献标志码:A

星载原子钟作为卫星导航系统的星上时间基准,其性能的优劣直接影响着导航系统的服务质量^[1]。由于在轨卫星钟的时频特性在运行期间会由于外部环境及设备老化等因素产生变化和差异,因此开展星载原子钟特性分析对于导航系统的完好性监测、系统性能评估以及卫星钟差确定和预报等具有重要意义^[2-4]。俄罗斯全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GLONASS)已于2011-10恢复全球组网,目前GLONASS有26颗在轨卫星,其星座由GLONASS-M系列卫星构成,卫星寿命为7 a,在轨星载原子钟均为铯钟,星载原子钟性能评估对卫星导航系统的发展弥足轻重,该项工作贯穿卫星导航系统发展的各个阶段。

目前大部分关于星载原子钟性能评估的研究主要是针对美国GPS(global positioning system)或中国北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)等星载原子钟展开的^[5-10],针对GLONASS星载原子钟的特性分析也做了一些初步探讨。如文献[11]使用9个月的钟差数据对GLONASS星载铯钟的频率、相位和

万秒稳特性进行了分析;文献[12]使用1 d的钟差数据对6颗GLONASS卫星的星载铯钟0.4~100 s平滑时间下的短期稳定度进行了分析;文献[13]基于1 d的钟差数据分析了GLONASS在轨铯钟在0.05~100 s之间的短期稳定度;文献[14]采用365 d的数据对GLONASS卫星钟的频率准确度、频漂和天稳进行了评估。与GPS和BDS相比,对GLONASS星载钟特性的分析大多针对某一特性展开,尚未对各种特性进行全面的分析;大多研究采用较短时间的数据进行分析,鲜有长期特性分析的研究。本文采用2016-01-01—2019-05-11共3年多的多星定轨解算的GLONASS卫星钟差数据,计算了GLONASS卫星钟的相位、频率、频漂(星钟模型参数)、星钟模型噪声和千秒稳指标,在此基础上分析了GLONASS星载原子钟特性的变化规律趋势,从而揭示GLONASS星载原子钟在轨连续运行状态。

1 星载原子钟特性分析模型

相位(钟差)、频率(钟速)、钟频漂或老化率

收稿日期:2020-08-02

项目资助:国家自然科学基金(11503031)。

第一作者:赵丹宁,博士,讲师,主要从事卫星自主导航研究。zhaodanning31@163.com

通讯作者:雷雨,博士,讲师。leiyu@xupt.edu.cn

(钟漂)和频率稳定度是表征原子钟特性的重要指标,其中,千秒稳会影响广播星历星钟参数和精密星历预报钟差产品的更新频率以及授时性能,因此分析千秒稳对于导航系统的运行控制和监测评估具有重要的实际意义,是衡量卫星钟特性的一项重要指标;星钟模型噪声决定了钟差确定及预报的精度和稳定性。本文通过相位、频率、频漂、频率稳定度(千秒稳)和星钟模型噪声5个指标对GLONASS星载原子钟的长期特性进行了分析。

由于星载原子钟在轨运行期间会受到环境干扰或信号异常等不确定因素的影响,卫星钟差序列中经常出现钟跳、粗差或数据缺失等异常情况,因此在计算星载原子钟特性指标前,需要对获取的卫星钟差数据进行恰当处理。

1.1 钟差数据异常处理方法

钟差数据异常处理主要包括钟跳识别、粗差探测和缺失数据处理。钟差的相位跳变对应频率峰值,根据这种特点,可通过设定适当的阈值对钟差对应的频率数据进行钟跳识别。

利用抗差性与时效性较好的的中位数(median absolute deviation, MAD)方法对卫星钟差数据中出现的粗差进行探测,即当钟差测量值满足以下关系时就认为是粗差^[1]:

$$|y_i| > m + n\text{MAD} \quad (1)$$

式中, y_i 为钟差对应的频率值; $m = \text{Median}\{y_i\}$,表示频率序列的中位数; $\text{MAD} = \text{Median}\{|y_i - m|/0.6745\}$; n 为整数,一般取 $n = 5^{[9]}$ 。对于探测到的粗差,将粗差点对应的钟差值视为数据缺失。

对于缺失数据,通常是将该粗差点数据填充为零或通过剩余数据对该点进行插值,但这两种处理方式均会引入新的数据,从而给原始钟差数据造成一定程度的信息失真,因此本文将数据缺失点对应历元时刻的钟差数据设

为空。

1.2 星载铯原子钟模型

星载铯原子钟在运行过程中存在一定程度的频率漂移^[11,13],因此,在构造星载铯原子钟模型时采用了包含表征原子钟物理特性的相位、频率和频漂的二次多项式模型,其表达式为:

$$x_i = a_0 + a_1(t_i - t_0) + a_2(t_i - t_0)^2 + v_i \quad (2)$$

式中, x_i 为钟差; a_0 、 a_1 和 a_2 分别表示相位、频率和频漂; t_i 为对应的钟差观测时刻; t_0 为星钟参数的参考时刻; v_i 为观测误差。

当钟差数据不少于3个时,采用二次多项式模型拟合卫星钟差,用来分析星载原子钟的相位、频率和频漂物理特性。对于星钟模型噪声,采用拟合残差的均方根(root mean square, RMS)来衡量星载钟模型噪声水平,计算如下:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_i^2} \quad (3)$$

式中, Δ_i 为二次多项式模型的拟合残差; N 为钟差数据个数。

1.3 频率稳定度分析模型

频率稳定度可以描述原子钟输出频率受噪声影响的随机起伏情况,是表征原子钟性能的一项重要指标。由于哈达玛系列方差适合用来计算存在频漂的原子钟的频率稳定度,因此,本文采用置信度较高的重叠哈达玛方差来分析星载铯原子钟的频率稳定度。基于钟差数据的重叠哈达玛方差的计算如下:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{6\tau^2(N-3m)} \sum_{i=1}^{N-3m} (x_{i+3m} - 3x_{i+2m} + 3x_{i+m} - x_i)^2 \quad (4)$$

式中, m 为平滑因子,通常取 $1 \leq m \leq \text{int}[(N-1)/3]$; $\tau = m\tau_0$ 为平滑时间, τ_0 为钟差数据采样间隔。图1给出了GLONASS星载原子钟特性分析流程及其所采用的特性分析指标。

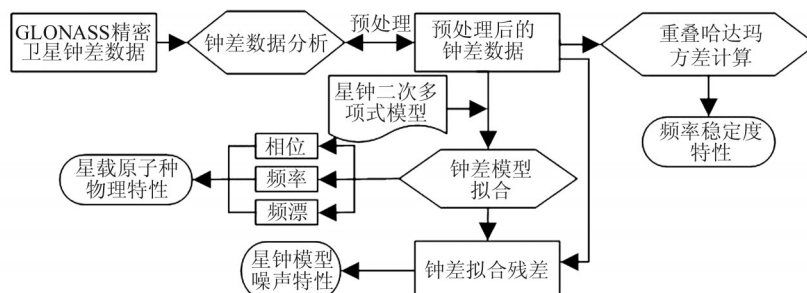


图1 GLONASS星载原子钟特性分析流程

Fig.1 Flowchart of Characterization Analysis for GLONASS In-Flight Clocks

2 钟差数据来源及预处理

星载原子钟特性分析通常是利用精密卫星钟差产品来开展研究的。本文收集了俄罗斯联邦航天局 GLONASS 定位、导航、授时信息与分析中心 (Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, IAC) 提供的 2016-01-01—2019-05-11 共 3 年多的 GLONASS 事后精密卫星钟差数据进行研究,采样间隔为 5 min,该精密钟差数据是利用国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 多 GNSS 试验项目 (multi-GNSS experiment, MGEX) 的地面跟踪站观测数据进行精密定轨求解获得,是俄罗斯官方提供的 GLONASS 卫星钟差产品,可以较为客观地分析 GLONASS 星载原子钟特性。表 1 给出了 GLONASS-M 系列在轨卫星的相关信息。

表 1 GLONASS 在轨运行卫星的相关信息

Tab.1 Information of GLONASS Satellites in Orbit

卫星	星钟类型	发射日期	运行时间/月
R01	铯钟	2009-12-14	112.6
R02	铯钟	2013-04-26	72.2
R03	铯钟	2011-11-04	89.9
R04	铯钟	2011-10-02	91.0
R05	铯钟	2018-06-17	10.4
R06	铯钟	2009-12-14	112.6
R07	铯钟	2011-11-04	89.9
R08	铯钟	2011-11-04	89.9
R09	铯钟	2014-12-01	53.0
R10	铯钟	2006-12-25	148.2
R11	铯钟	2016-05-29	35.0
R13	铯钟	2007-12-25	136.2
R14	铯钟	2017-09-22	19.2
R15	铯钟	2018-11-03	5.9
R16	铯钟	2010-09-02	104.0
R17	铯钟	2016-02-07	38.7
R18	铯钟	2014-03-24	61.2
R19	铯钟	2007-10-26	138.2
R20	铯钟	2007-10-26	138.2
R21	铯钟	2014-06-14	58.6
R22	铯钟	2010-03-02	110.0
R23	铯钟	2010-03-02	110.0
R24	铯钟	2010-03-02	110.0

针对卫星钟差数据中出现的相位跳变、粗差和数据缺失,采用如下流程和策略对钟差数据进行预处理:(1)基于钟差数据来定位相位跳变位置,并标记钟跳历元位置进行分段处理;(2)对钟差数据进行相邻历元间一次差分获得钟差一次差数据,将一次差数据视为频率数据;(3)利用

MAD 方法对频率数据进行粗差探测,将粗差点历元的钟差标记为数据缺失;(4)将数据缺失历元的钟差设为非数(not a number, NaN)。

以 R08 和 R09 卫星钟差数据为例,图 2 给出了钟差数据预处理前后 2016-01-01—2019-05-11 时段的卫星钟差序列,图中纵向的虚线表示数据按照年份的划分。由图 2 可以看出,R08 原始卫星钟差序列中存在若干粗差点,可能是由 GLONASS 观测值异常或钟差解算策略引起的,即钟差产品包含粗差;R09 原始卫星钟差序列中除包含粗差点外,还存在明显的相位跳变,且跳变幅度较大,即钟差产品不仅包含粗差,而且原子钟本身也出现了异常,说明 R08 和 R09 原始钟差数据中均存在明显的异常值,需要进行必要的钟差数据预处理。由图 2(c)和 2(d)可以看出,经过钟差数据预处理后的钟差序列相对光滑且不存在明显异常值,预处理后的钟差数据质量有很大程度的改善,R08、R09 卫星钟差数据的实际变化过程获得了有效的展示,这说明在基于卫星钟差数据开展星载原子钟性能评估等相关研究时进行钟差数据预处理是必要的,同时也说明了本文钟差数据预处理策略的有效性。

3 相位、频率、频漂与残差特性分析

本文利用二次多项式模型对钟差数据预处理后的卫星钟差序列进行逐日拟合,获得卫星钟的相位(钟差)、频率(钟速)、频漂(钟漂)指标及模型拟合残差的长期时间序列,结果分别如图 3、4、5、6 所示。由于 R12 卫星在 2016-01-01—2019-05-11 期间处于不可用状态,故未对其卫星钟进行分析。

图 3 给出了 GLONASS 卫星钟相位的长期变化。从图 3 可以看出,GLONASS 星载原子钟在长期运行过程中偶尔出现调相操作,相位数据比较连续和稳定,其中,R09 卫星钟出现 4 次调相,R07、R08、R10、R15、R18、R19 和 R22 卫星钟出现 2 次调相,R01、R03、R11、R14、R16、R17 和 R21 卫星钟出现 1 次调相,R02、R04、R06、R13、R20 和 R24 卫星钟则没有进行调相操作,各卫星钟出现调相的时间各不相同。进行调相操作的主要原因如下:(1)新发射卫星与替换卫星的星载原子钟之间的切换,如 R11、R14、R15 和 R17 卫星钟出现的调相就属于此种情况;(2)星载原子钟随着运行时间的累积,自身硬件设备可能出现了一定程度的老化,导致输出相位随着时间累积偏差增大,为了保证输出相位的准确性,需要进行相位调整来对卫星钟予以校准。

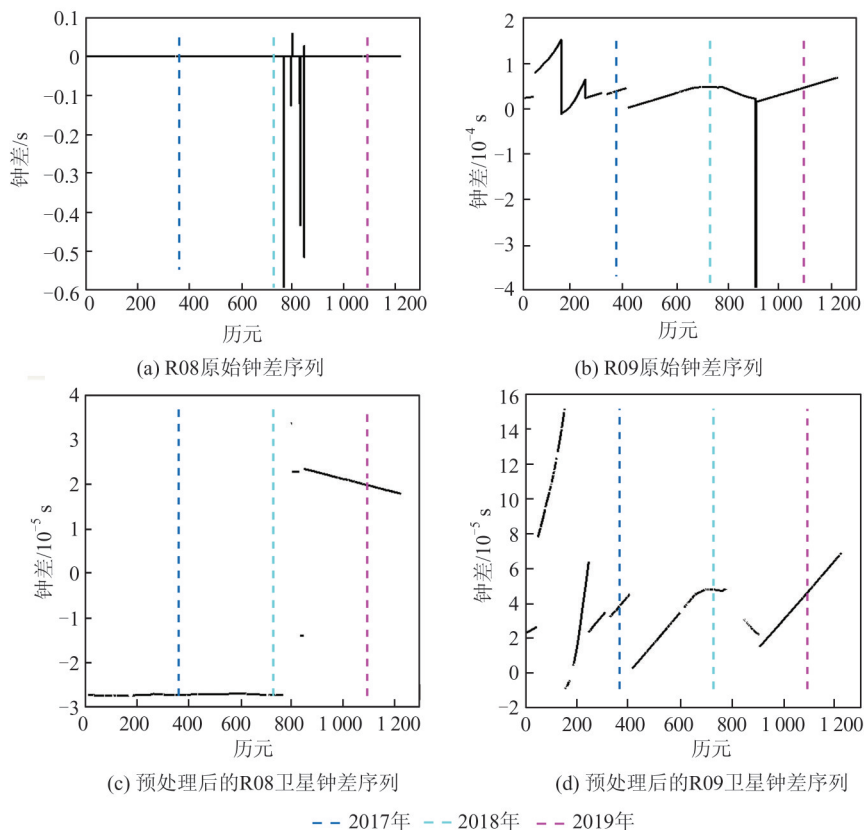


图2 R08与R09预处理前后的卫星钟差序列

Fig.2 Satellite Clock Sequences of R08 and R09 Before and After Data Preprocessing

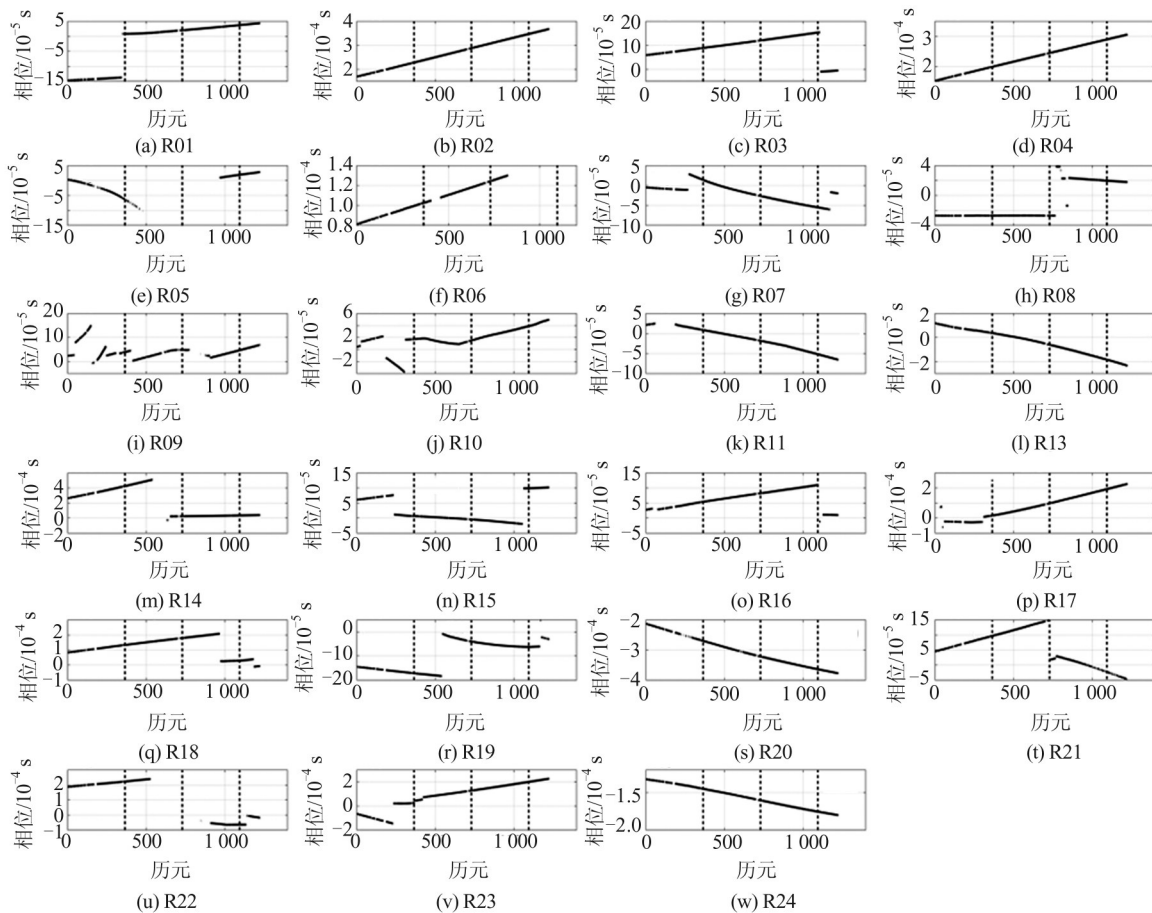


图3 GLONASS在轨铯钟相位的长期变化

Fig.3 Long-Term Phase Variations of GLONASS Cesium Clocks in Orbit

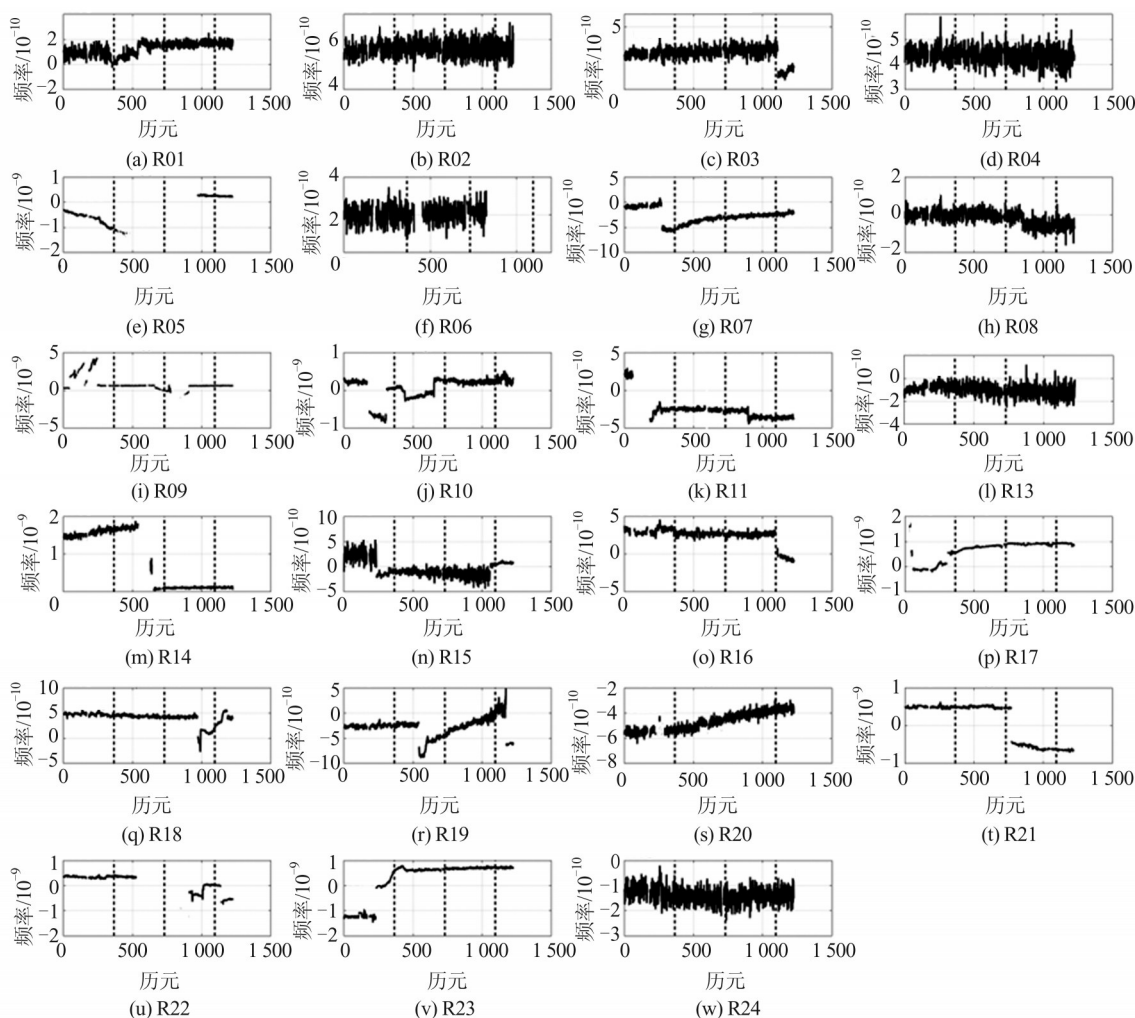


图4 GLONASS在轨铯钟频率的长期变化

Fig.4 Long-Term Frequency Variations of GLONASS Cesium Clocks in Orbit

图4给出了GLONASS星载原子钟频率的长期变化。从图4可以看出,各颗卫星钟频率序列比较连续和稳定,卫星钟在运行过程中会出现一定次数的调频操作,其频率跳变次数与相位跳变次数相当,其中,R01、R09、R10、R14、R15、R17、R18、R19、R22和R23卫星钟出现2次调频,R03、R07、R08、R11、R16和R21卫星钟出现1次调频,其他卫星钟则没有进行调频操作,各卫星钟出现调频的时间同样各不相同。与相位跳变类似,新发射卫星与替换卫星的星载原子钟之间的切换是导致频率跳变的一个主要原因。

图5给出了GLONASS星载原子钟在2016-01-01—2019-05-11时段日漂移率的长期变化及其平均值。从图5可以看出,GLONASS星载原子钟的日漂移率处于 $10^{-15} \sim 10^{-14}$ 量级,除R15卫星钟的频漂稍大外($\pm 8 \times 10^{-14}/\text{d}$),其他GLONASS星载原子钟的日漂移率在 $\pm 5 \times 10^{-14}$ 之间变化,且每颗卫星在不同时间的频漂情况各

不相同,大部分星载铯钟的频漂处于同一水平;2016年以后发射卫星的星载铯钟具有较好的频漂特性,如R05、R11和R17卫星钟的日漂移率维持在 2×10^{-14} 以内,R15卫星钟在完成新旧星载钟更替以后,其日漂移率小于 1×10^{-14} ,即日漂移率处于 10^{-15} 量级,说明新型星载铯钟具有更低的频漂率;除R15卫星钟频漂均值($1.44 \times 10^{-14}/\text{d}$)稍大外,其他卫星钟频漂的均值在 $(2.42 \sim 9.82) \times 10^{-14}/\text{d}$ 之间,整体而言,GLONASS在轨铯钟日漂移率的均值为 5.94×10^{-15} 。GLONASS星载铯钟频漂在相对较长的一段时间内是比较稳定的,但会随着在轨运行时间的累积,其星载钟的频漂有逐渐增大的趋势,如早期发射的R10、R13和R19卫星等星载钟表现得尤为明显,这主要是由于卫星超期服役导致硬件设备老化造成的。

图6给出了GLONASS星载原子钟模型拟合残差序列及其RMS值。从图6可以看出,除R15卫星钟模型拟合残差较大外(RMS达到2.0 ns,

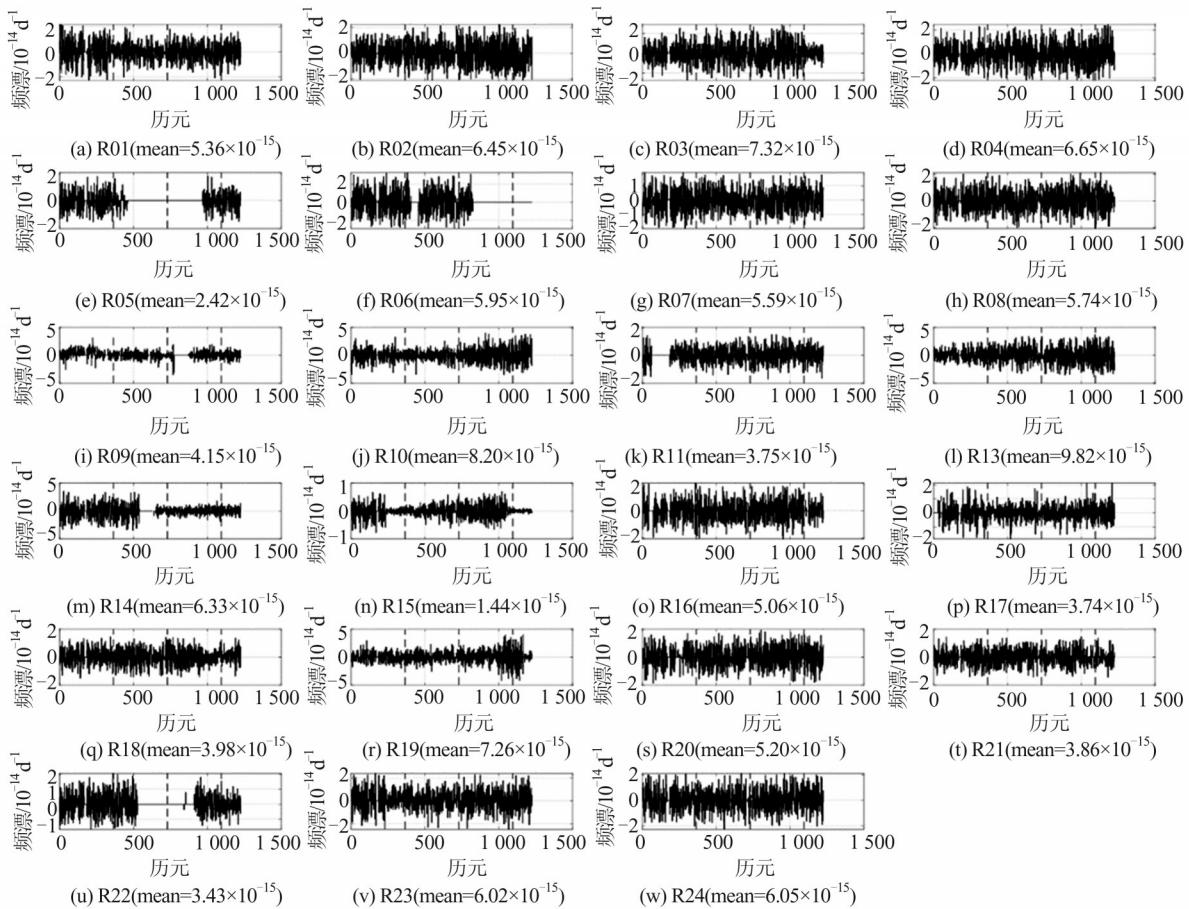


图5 GLONASS在轨铯钟日漂移率的长期变化及其平均值

Fig.5 Long-Term Variations of Day Frequency Drift Rate and Their Mean Values of GLONASS Cesium Clocks in Orbit

最大值约 10 ns),其他 GLONASS 星载原子钟的模型拟合残差基本在 5 ns 以内, RMS 均在 1.2 ns 以内,大部分卫星钟模型拟合精度优于 1 ns, R15 卫星钟在完成新旧原子钟切换以后,其模型拟合残差同样保持在 5 ns 以内,拟合精度在亚 ns 量级,说明各星载钟的模型噪声水平基本相当,模型拟合精度在同一量级;此外, R05、R11、R14 和 R17 卫星钟在完成新旧原子钟切换以后,模型 RMS 也得到不同程度的提高,模型 RMS 小于 2 ns; R01、R03、R07、R10 和 R15 卫星钟模型的拟合残差在前期较大且不平稳,而在调相和调频后残差明显减小且趋于平稳。GLONASS 各星载铯钟在相对较长的一段时间内,其模型噪声的波动范围保持在近似相同的水平之内,噪声波动比较稳定,但会随着在轨运行时间的长期累积,其模型噪声会呈现逐渐增大的趋势,如早期发射的 R10、R13、R15 和 R19 等卫星的星载钟模型的 RMS 随着时间的增加逐渐变大,特别是后期时间段残差明显变大。整体而言, GLONASS 卫星钟模型的拟合精度达到亚纳秒量级。

结合图 5 和图 6 可以看出,随着卫星钟频漂的增大,卫星钟模型噪声也随之增大,说明卫星钟模型噪声水平与卫星钟频漂密切相关,换言之,星载原子钟的自身物理模型参数会显著影响星钟模型精度。

综上所述, GLONASS 各星载铯钟虽然在轨运行时间不同,但各星载钟频率和相位变化较为稳定,只存在极少的跳变和跳相操作;虽然部分卫星钟的频漂和模型噪声随着在轨运行时间呈现一定的增大趋势,但总体而言,大部分 GLONASS 星载钟的频漂率和星钟模型噪声基本处于同一水平;新发射卫星的星载钟具有更低的频漂率和模型噪声。

4 频率稳定度特性分析

为了揭示 GLONASS 在轨铯钟频率稳定度的长期变化特性,以每一天钟差数据作为计算的时间单元,分析了 GLONASS 卫星钟在平滑时间为 1 800 s 情况下的频率稳定度(简称千秒稳)指标变化特性,计算获得的 GLONASS 卫星钟在

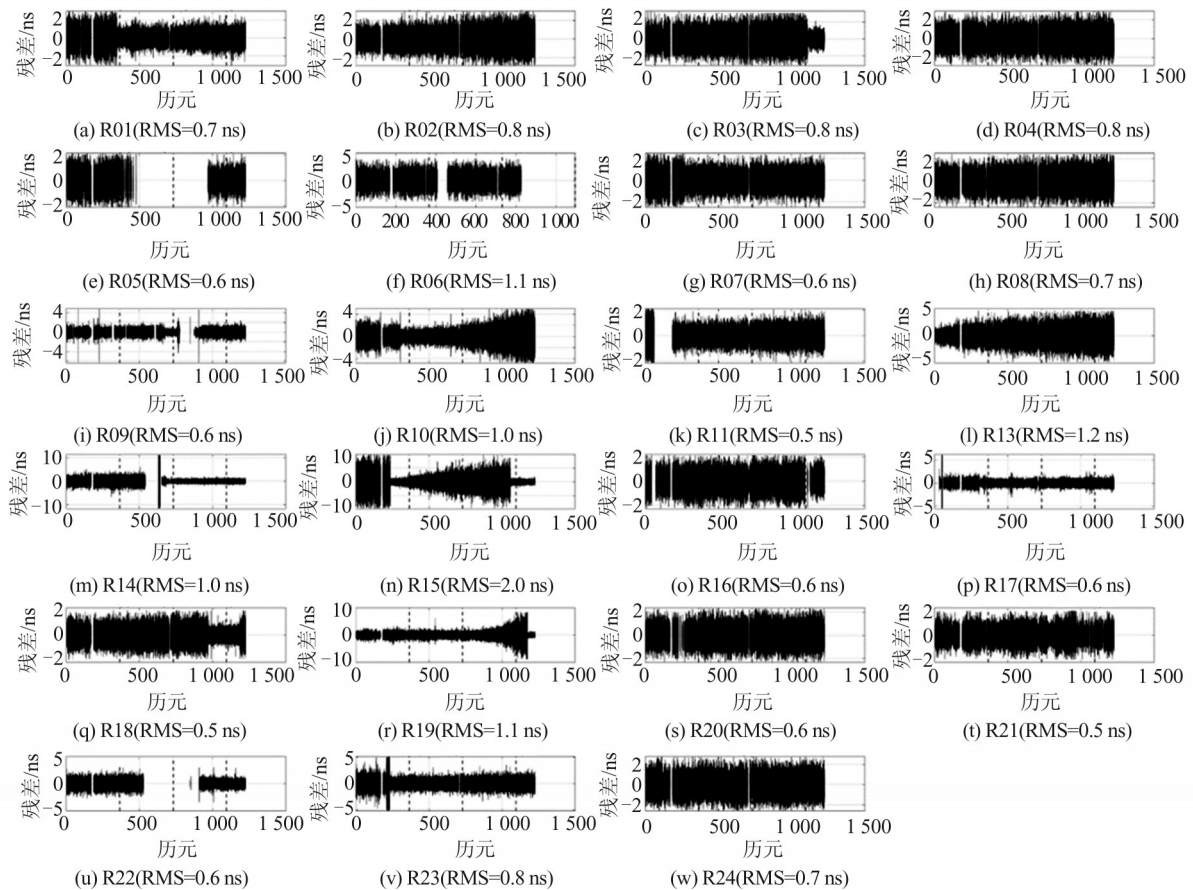


图 6 GLONASS 在轨铯钟模型拟合残差的长期变化及其 RMS 统计值

Fig.6 Long-Term Variations and RMS Statistics of the Model Fitting Residuals of GLONASS Cesium Clock in Orbit

2016-01-01—2019-05-11 时段的千秒稳长期序列如图 7 所示,图 7 中还给出了每颗在轨铯钟千秒稳的平均值。当每天数据连续且无数据缺失时则计算该天的千秒稳,否则该天的千秒稳记为空。

从图 7 可以看出, GLONASS 在轨铯钟千秒稳变化较为平稳,各卫星钟在相对较长的一段时间内其千秒稳维持在相似的水平之内,在轨铯钟的千秒稳基本维持在 8×10^{-13} 以下,所有 GLONASS 卫星钟的平均千秒稳为 3.5×10^{-13} ,其中, R15 卫星钟在未进行新旧卫星更替之前,其千秒稳稍低; R02、R09、R15 和 R19 卫星钟随着在轨运行时间的增加,其稳定度呈现一定程度的降低。这种稳定度降低现象是在卫星钟在轨运行较长时间以后才出现的,换言之,在卫星钟在轨运行的较长一段时期内,其稳定度是非常稳定的,随着长时间运行的累积,其稳定度才呈现缓慢的降低趋势,这说明 GLONASS 星载铯钟具有较为稳定的频率特性,这与其频漂特性密切相关。R11、R14 和 R15 卫星钟在完成新旧原子钟切换以后,其稳定度得到明显的提高,说明新型

卫星钟比旧卫星钟有更优良的稳定度特性; R01、R03、R16、R18 和 R23 卫星钟在出现调相和调频操作后,其稳定度出现一次跳变,跳变后,稳定度显著提高且变化更加趋于平稳,这可能是由于地面监测站监测到星载钟频率稳定度不断变差的情况时,会对星载钟进行一定的处理来维持其稳定度,说明相位和频率调整与卫星钟频率稳定度的变化存在密切关联。结合星钟模型拟合残差与频率稳定度的变化规律可以发现, R01、R03、R18 和 R23 等卫星钟的千秒稳数值减小时,其星钟模型拟合残差的数值也在相应的减小,而 R02、R10、R13 和 R19 等卫星钟的千秒稳数值增大时,其星钟模型拟合残差的数值也在相应的增大,这说明 GLONASS 卫星钟的频率稳定度和星钟模型拟合残差之间存在一定的数值关系。

表 2 总结了 GLONASS 卫星钟的频漂数值量级、千秒稳定度和星钟模型噪声指标以及 GPS^[6,14] 和 BDS^[8-9] 卫星钟的对应指标。由表 2 可知, GLONASS 卫星钟不存在频繁的调相与调频操作,其相位和频率序列更为平稳; GLONASS 卫星钟与 GPS、BDS 的频漂数值量级相当,但

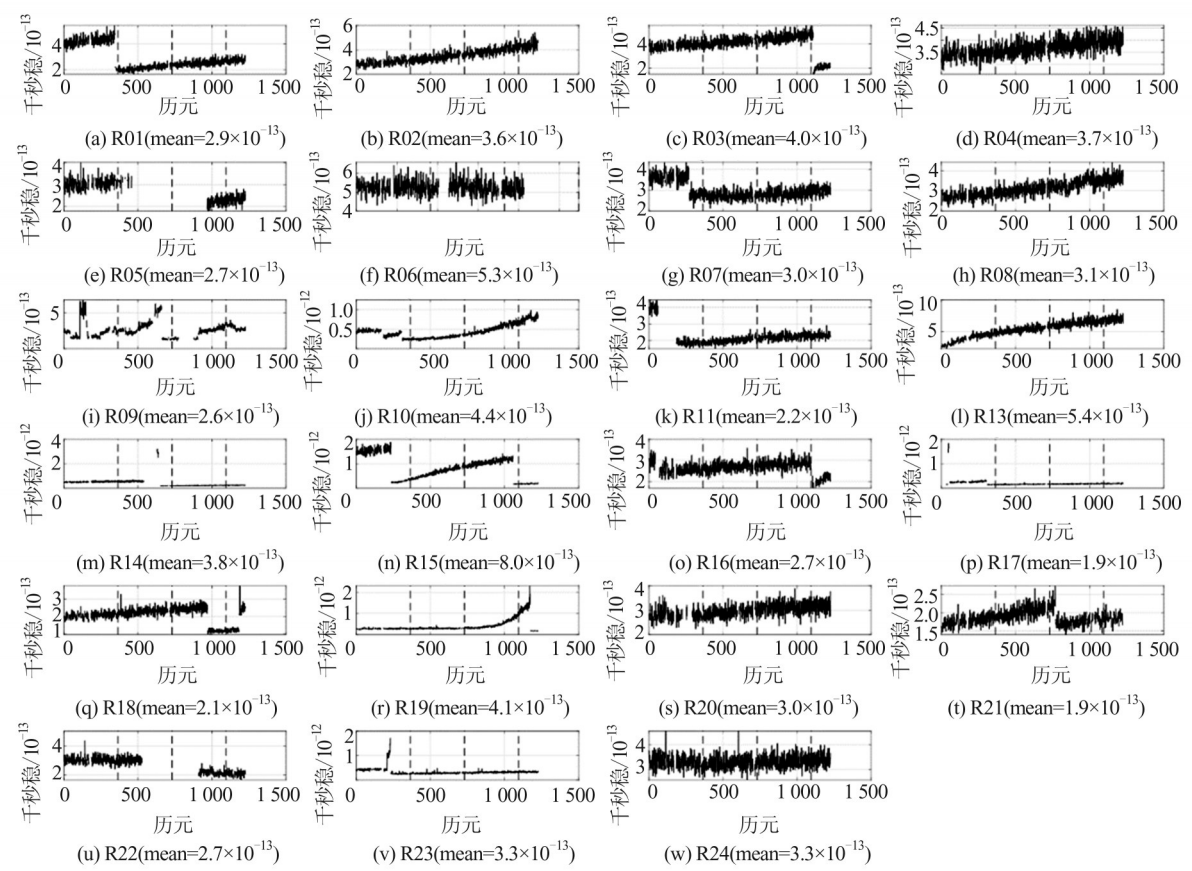


图7 GLONASS在轨铯钟千秒稳的长期变化及其平均统计值

Fig.7 Long-Term Variations and Mean Statistics of the Stability at 1 800 s Interval of GLONASS Cesium Clocks in Orbit

表2 GLONASS、GPS和BDS卫星钟性能指标
Tab.2 Performance Indexes of GLONASS, GPS and BDS Satellite Clocks

导航系统	频漂量级	千秒稳定度/ 10^{-13}	星钟模型噪声/ns
GLONASS	$10^{-15}\sim10^{-14}$	1~8	0.5~2.0
GPS	$10^{-15}\sim10^{-14}$	0.5~0.9	0.2~2.9
BDS	$10^{-15}\sim10^{-14}$	2~6	0.2~2.5

GLONASS 卫星钟频漂序列的随机性更好；GLONASS 卫星钟千秒稳与 GPS 存在约一个数量级的差距,和 BDS 相近；GLONASS 星钟模型噪声与 GPS、BDS 在同一水平。

5 结 语

GLONASS 卫星钟在长期运行过程中存在一定次数的相位和频率跳变,相位和频率调整导致卫星钟差数据的连续性和稳定性变差；GLONASS 在轨铯钟的频漂小于 $8\times10^{-14}/\text{d}$,大部分铯钟的模型噪声水平优于 1 ns,超期服役卫星钟的频漂和模型噪声水平随着在轨运行时间的累积呈现一定程度的增大趋势；GLONASS 在

轨铯钟的千秒稳维持在 8×10^{-13} 以下,超期服役卫星钟的稳定度随着运行时间的增加呈现一定程度的衰减趋势；GLONASS 星钟模型拟合残差随着频率稳定度的提高和降低相应的减小和增大,二者之间存在一定的数值关系。可见,近年新发射 GLONASS 卫星的星载钟的频漂特性、稳定度特性与噪声水平显著优于早期发射的卫星星载钟的特性。

参 考 文 献

[1] Yang Yuanxi, Xu Yangyin, Li Jinlong, et al. Progress and Performance Evaluation of BeiDou Navigation Satellite System [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 48(5): 584-594 (杨元喜,许扬胤,李金龙,等.北斗三号系统进展及性能预测——试验验证数据分析[J].中国科学:地球科学,2018,48(5):584-594)

[2] Huang Guanwen. Research on Algorithms of Precise Clock Offset and Quality Evaluation of GNSS Satellite Clock[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012 (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)

[3] Li Zuohu. Research on Monitoring and Assessment

- of Satellite Navigation System Performance [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2012(李作虎. 卫星导航系统性能监测及评估方法研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2012)
- [4] Zhang Qinghua, Sui Lifen, Jia Xiaolin. Monitor State of GPS Rb Clock Using Jones-Tryon Kalman Filter [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(4): 436-440 (张清华, 隋立芬, 贾小林. 应用 Jones-Tryon Kalman 滤波器对在轨 GPS Rb 钟进行状态监测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(4): 436-440)
- [5] Huang Guanwen, Cui Bolin, Zhang Qin, et al. An Improved Predicted Model for BDS Ultra-Rapid Satellite Clock Offsets [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 60-68
- [6] Huang G, Zhang Q, Li H, et al. Quality Variations of GPS Satellite Clocks On-orbit Using IGS Clock Products [J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(6): 978-987
- [7] Steigenberger P, Hugentobler U, Loyer S, et al. Galileo Orbit and Clock Quality of the IGS Multi-GNSS Experiment [J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(1): 269-281
- [8] Huang Guanwen, Yu Hang, Guo Hairong, et al. Analysis of the Mid-Long Term Characterization for BDS On-orbit Satellite Clocks [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(7): 982-988 (黄观文, 余杭, 郭海荣, 等. 北斗在轨卫星钟中长期钟差特性分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(7): 982-988)
- [9] Wu Ziqian, Zhou Shanshi, Hu Xiaogong, et al. Performance of the BDS3 Experimental Satellite Passive Hydrogen Maser [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(2): 42-54
- [10] Huang Guanwen, Cui Bolin, Xu Yan, et al. Characteristics and Performance Evaluation of Galileo On-orbit Satellites Atomic Clocks During 2014—2017 [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 9(1): 2 899-2 911
- [11] Fu Wenju, Huang Guanwen, Zhang Qin, et al. The Analysis of the Characterization for GLONASS and GPS On-board Satellite Clocks [C]// China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings, Wuhan, China, 2013: 549-566
- [12] Griggs E, Kursinski E R, Akos D. An Investigation of GNSS Atomic Clock Behavior at Short Time Intervals [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(3): 443-452
- [13] Li Mingzhe, Zhao Shaocheng, Hu Youjian, et al. Comparison of GNSS Satellite Clock Stability Based on High Frequency Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(10): 1 490-1 503 (李明哲, 张绍成, 胡友健, 等. 基于高频观测值得不同 GNSS 卫星钟稳定性分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(10): 1 490-1 503)
- [14] Liu Shuai, Jia Xiaolin, Sun Dawei. Performance Evaluation of GNSS On-board Atomic Clocks [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(2): 276-284 (刘帅, 贾小林, 孙大伟. GNSS 星载原子钟性能评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(2): 276-284)

Long-Term Characteristics Analysis of GLONASS In-Flight Clocks

ZHAO Danning¹ LEI Yu^{1,2}

¹ School of Electrical & Electronic Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China

² School of Computer Science and Technology, Xi'an University of Posts and Communications, Xi'an 710121, China

Abstract: Objectives: In October 2011 the Russian GLONASS (global navigation satellite system) orbital constellation of 24 satellites is restored, enabling global coverage for positioning, navigation and timing for civil users once again. It plays key roles in navigation system performance evaluation, integrity monitoring, determination and prediction of satellite clock correction. To analyze the time-frequency characteristics of GLONASS in-flight satellite clocks, GLONASS satellites are equipped with cesium clocks, which are different from GPS, Galileo and BDS (BeiDou navigation satellite system) satellites, so GLONASS in-flight Cesium clock may have quite different time-frequency characteristics. However, analysis and evaluation are rarely reported about GLONASS satellite clocks. **Methods:** In order to estimate the behavior and state of GLONASS in-flight satellite clocks, the long-term characterization of the GLONASS

in-orbit Cesium clocks is carried out in terms of the long-term variations of the five indices, namely clock phase, frequency, frequency drift, frequency stability and clock model noise. In view of the availability and accuracy of GLONASS satellite clock data, the precise GLONASS satellite clock products from Jan. 1, 2016 to May 11, 2019 with 5-minute interval released by the Russian GLONASS Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing are used as data base to derive the clock phase, frequency, frequency drift and clock model noise from the quadratic polynomial model, as well as calculate the clock frequency stability at the short interval according to the classical Hadamard deviation. **Results:** It is clearly shown that the phase and frequency of the GLONASS on-board Cesium clocks are very stable. The average values of the model noise and frequency drift of the GLONASS in-orbit clocks are 0.7 ns and $5.94 \times 10^{-15}/\text{d}$, respectively. The results demonstrate that GLONASS Cesium clocks have good physical characteristics. The frequency stability of the GLONASS satellite clocks in orbit is at the 10^{-13} level at short interval, and there is noticeable relationship between the frequency stability and clock model noise, which will be needed to clarify further. **Conclusions:** The results show that the physical characteristics of new satellite clocks are better than that of older clocks, and the clock model noise are also substantially lower.

Key words: global navigation satellite system(GLONASS); satellite clocks; clock model; frequency drift; frequency stability

First author: ZHAO Danning, PhD, lecture, specializes in the autonomous satellite navigation. E-mail: zhaodanning31@163.com

Corresponding author: LEI Yu, PhD, lecture. E-mail: leiyu@xupt.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(11503031).

引文格式: ZHAO Danning, LEI Yu. Long-Term Characteristics Analysis of GLONASS In-Flight Clocks[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(6):895-904. DOI:10.13203/j.whugis20190233(赵丹宁, 雷雨. GLONASS 星载原子钟的长期特性分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(6):895-904. DOI:10.13203/j.whugis20190233)