

GPS BLOCK IIF星载原子钟长期性能分析*

王宇谱^{1,2†} 吕志平^{1‡} 李林阳¹ 翟树峰¹

(1 解放军信息工程大学地理空间信息学院 郑州 450001)

(2 地理信息工程国家重点实验室 西安 710054)

摘要 星载原子钟长期性能的分析对于系统完好性监测、卫星钟差确定与预报等具有重要的作用. GPS最新型的BLOCK IIF系列卫星于2016年2月6日部署完成. 通过星载原子钟的频率准确度、频率漂移率、频率稳定度、观测噪声水平和钟差周期特性这5个指标的长期变化, 分析评估了GPS BLOCK IIF星载原子钟的长期性能. 计算分析表明: 铷钟的频率准确度为 $7.1 \times 10^{-12} \pm 2.1 \times 10^{-13}$, 频率漂移率为 $(5.5 \times 10^{-14} \pm 1.1 \times 10^{-14})/\text{d}$, 平均噪声水平约为0.2 ns; 铯钟的频率准确度为 $1.0 \times 10^{-12} \pm 2.9 \times 10^{-15}$, 频率漂移率为 $(3.4 \times 10^{-15} \pm 5.4 \times 10^{-16})/\text{d}$, 平均噪声水平约为1.0 ns, 并且指标变化相对平稳; 铷钟的2 h、6 h、12 h和天稳定度分别为 3.4×10^{-14} 、 2.3×10^{-14} 、 7.3×10^{-15} 与 6.0×10^{-15} ; 铯钟对应的稳定度指标分别为 1.9×10^{-13} 、 1.1×10^{-13} 、 7.9×10^{-14} 和 5.5×10^{-14} ; 卫星钟差存在显著周期项, 主周期分别近似为卫星轨道周期的1/2、1倍或2倍.

关键词 天体测量学; 时间; 星载原子钟; 方法: 性能分析, 方法: 数据分析

中图分类号: P127; 文献标识码: A

1 引言

星载原子钟作为卫星导航定位系统的星上时间基准与核心部件^[1], 分析其性能对于系统的完好性监测、系统性能的评估和卫星钟差的确定及预报等具有重要作用. 因此, 对于星载原子钟性能的分析展开了大量的研究^[2-5]. GPS BLOCK IIF系列卫星自2010年到2016年间陆续发射并完成部署, 其在接下来一段时间将成为星座的主体, 开展该类型卫星的星载原子钟性能分析, 对于提升系统的服务性能和下一步系统的建设、维护等具有重要的意义. 近年来针对BLOCK IIF星载原子钟性能的分析进行了一些初步的探讨^[6-8], 但已有的研究成果仍存在一定的局限性: 首先, 由于前期该类型卫星没有

2016-10-17收到原稿, 2016-12-08收到修改稿

*国家自然科学基金项目(41674019)、国家重点研发计划项目(2016YFB0501701)、地理信息工程国家重点实验室开放研究基金项目(SKLGIE2015-M-1-6)资助

[†]987834660@qq.com

[‡]ssscenter@126.com

部署完成, 没有对该类型所有卫星的星载原子钟进行较为全面系统的分析和评估; 其次, 已有的研究主要是基于几天到几十天的数据进行较短时间的分析和评估, 较长时间段性能评估的相关研究还相对较少; 再次, 目前对星载原子钟性能的分析大多集中在某个指标值或某个特性方面, 没有形成较为全面的星载原子钟性能评价体系. 基于此, 本文采用所有GPS BLOCK IIF卫星自开始运行到2016年8月27日的卫星钟差数据, 综合星载原子钟的频率准确度、频率漂移率、频率稳定度、钟差模型噪声和钟差周期特性这5个指标的长期变化规律, 较为全面地分析和评估了GPS BLOCK IIF星载原子钟的长期性能.

2 方法原理

2.1 频率准确度

频率准确度描述了实际频率相对于标称值的一致性程度^[1], 是反映原子钟性能的一项重要指标. 将基于精密定轨方法获取的卫星钟差(时差)数据记为 x_i , $i = 1, 2, \dots, N$, N 为采样个数, 设取样周期为 T (两次取样的时间间隔); 基于最小二乘法以线性函数 $x = K_T t + C$ 拟合钟差序列, 便可求得 T 时间段的频率准确度 K_T ; 当 $T=1$ d时, 则有^[9]:

$$K_T = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}, \quad (1)$$

其中, t_i 是测量时差值的时刻(即取样时序), $\bar{t}$ 和 $\bar{x}$ 的表达式分别为

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t_i).$$

2.2 频率漂移率

星载原子钟的频率漂移特性是其在连续运行过程中的基本特性, 以频率漂移率来表征. 频率漂移率的最小二乘解为^[1,4]:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N [y_i(\tau) - \bar{y}(\tau)](t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}, \quad (2)$$

其中 D 是频率漂移率, $y_i(\tau)$ 表示 t_i 时刻频标的相对频率值; τ 表示取样时间, $\bar{y}(\tau)$ 的表达式为:

$$\bar{y}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i(\tau). \quad (3)$$

2.3 频率稳定度

频率稳定度的结果是衡量原子钟性能优劣的重要指标之一. 铷(Rubidium, Rb)钟一般以Hadamard系列方差进行频率稳定度分析, 而铯(Cesium, Cs)钟则基于Allan系列方差进行频率稳定度分析^[1], 其中, 重叠Hadamard方差和重叠Allan方差具有较高的置信度且公式相对简单, 因此本文使用这两种方差分别计算GPS BLOCK IIF星载铷钟和铯钟的频率稳定度. 基于钟差(时差)数据的重叠Allan方差计算公式为^[10]:

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

式中 $\tau=m\tau_0$, τ_0 为相邻钟差数据的采样间隔, m 为平滑因子, 一般取 $1 \leq m \leq \text{int}((N-1)/2)$. 基于钟差(时差)数据的重叠Hadamard方差计算公式为^[10]:

$$H\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{6\tau^2(N-3m)} \sum_{i=1}^{N-3m} (x_{i+3m} - 3x_{i+2m} + 3x_{i+m} - x_i)^2, \quad (5)$$

式中的平滑因子一般取 $1 \leq m \leq \text{int}((N-1)/3)$.

2.4 卫星钟差模型

星载原子钟钟差模型的噪声水平决定着钟差实时估计和预报的精度及稳定性. 本文将该特性作为反映星载原子钟性能的一项指标. 在构造精密卫星钟差模型时, 通常采用包含表征卫星钟时频特性的相位、频率和频率漂移的二次多项式模型, 其表达式为^[11]:

$$l_i = a_0 + a_1(t_i - t_0) + a_2(t_i - t_0)^2 + \Delta_i \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

式中, t_0 为星钟参数的参考时刻, t_i 表示历元时刻, l_i 是 t_i 时刻的卫星钟差(相位). 待估参数 a_0 、 a_1 和 a_2 分别表示参考时刻 t_0 的相位(钟差)、频率(钟速)及频率漂移率(频漂); Δ_i 为观测误差. 已知钟差数据不少于3个, 便可拟合求取表征卫星钟差模型噪声的拟合残差.

2.5 基于频谱分析的周期项提取

星载原子钟钟差的周期特性分析能够精化星载原子钟的钟差模型, 并为联合定轨轨道动力学模型的完善提供参考^[12]. 因此, 本文将钟差周期特性分析也作为评估星载原子钟性能的重要指标. 基于频谱分析的方法可以有效地提取并分析卫星钟差的周期项. 在提取卫星钟差的周期项时, 首先使用二次多项式对每天的卫星钟差进行拟合来消除钟差的趋势项, 然后基于拟合残差进行周期项的提取. 对于离散傅立叶级数(DFT)而言, 其表达式为^[13]:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{M-1} v(n)e^{-i\frac{2\pi}{M}kn}, \quad (7)$$

式中 $X(k)$ 代表 k 时段的频谱值, $v(n)$ 对应于钟差的拟合残差序列, n 是残差序列中元素的序号, i 表示虚数单位, e 是数学常数, M 是残差的个数. 通过该式可求出各残差点对应的频谱值. 然后根据残差序列对应的频谱图便可较为容易地确定周期项.

3 BLOCK IIF卫星钟性能分析

导航卫星星载原子钟的性能分析和评估大多是基于已知的钟差产品来开展研究的^[14]. 本文分析GPS BLOCK IIF星载原子钟性能时, 所采用的卫星钟差数据来自IGS (International Global Navigation Satellite System Service)提供的15 min采样间隔的最终精密钟差产品, 该卫星钟差是基于多星定轨联合解算卫星轨道和钟差的方式得到的, 在卫星钟差的解算过程中扣除了相对论改正、潮汐改正和大气负荷等误差改正, 具有较高的精度^[15-16]. 表1给出了BLOCK IIF卫星的相关信息(<http://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>). 文中所使用数据的时间段为各颗卫星自开始运行

到2016年8月27日, 表1中的运行时间即为每颗卫星在该时间段内的运行天数. 本文首先使用钟差数据预处理中普遍采用的中位数(Median Absolute Deviation, MAD)方法^[10,12]对卫星钟差数据进行预处理(探测出的异常钟差所对应的历元标记为数据缺失), 然后根据上述方法原理计算各项性能指标并分析BLOCK IIF星载原子钟的长期性能.

表 1 GPS BLOCK IIF 卫星的相关信息
Table 1 The related information of GPS BLOCK IIF satellites

Satellite name	Clock type	Starting run time	Run time/d
PRN01	Rb clock	2011-10-14	1782
PRN03	Rb clock	2014-12-12	625
PRN06	Rb clock	2014-06-10	810
PRN08	Cs clock	2015-08-12	382
PRN09	Rb clock	2014-09-17	711
PRN10	Rb clock	2015-12-09	263
PRN24	Cs clock	2012-11-14	1383
PRN25	Rb clock	2010-08-27	2193
PRN26	Rb clock	2015-04-20	496
PRN27	Rb clock	2013-06-21	1164
PRN30	Rb clock	2014-05-30	820
PRN32	Rb clock	2016-03-09	172

3.1 频率准确度的长期变化规律

以1 d为取样时间间隔, 计算各卫星钟每天的频率准确度, 得到频率准确度的数据序列, 其结果如图1所示. 同时, 图中还给出了数据序列的均方根(Root Mean Square, 记作RMS)值及该数据序列的不确定度(Uncertainty, 记作 U ; 本文采用的是标准不确定度的A类评定方法)^[17-18], 其中(8)式和(9)式分别是RMS和 U 的计算公式, 式中 s_i 为数据序列 $\{s_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 的第 i 个非空元素, n 为数据序列的个数. 下文频漂、稳定性和钟差模型噪声对应的RMS和 U 的计算亦是如此.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i^2}, \quad (8)$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}, \quad \bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i. \quad (9)$$

根据图1可以看出, 星载铯钟频率准确度的长期序列不但变化比较平稳且精度相对较高, 两台铯钟频率准确度的平均值为 $1.0 \times 10^{-12} \pm 2.9 \times 10^{-15}$; 而星载铷钟频率准确度的长期序列变化波动较大, 且各颗卫星间的差异比较明显, 所有铷钟频率准确度的平均值为 $7.1 \times 10^{-12} \pm 2.1 \times 10^{-13}$; 因此, GPS BLOCK IIF星载铯钟的频率准确度优于其

铷钟的频率准确度. 此外, 从运行时间比较长的PRN01和PRN27可以看出: 星载铷钟在前期运行过程频率准确度的变化波动较大, 但随着运行时间的增加, 到后面一段时间内其准确度的波动相对比较平稳; 这可能是因为星载铷钟的铷灯在初始老化阶段光强变化较快, 而在进入稳定阶段之后光强变化较小所致.

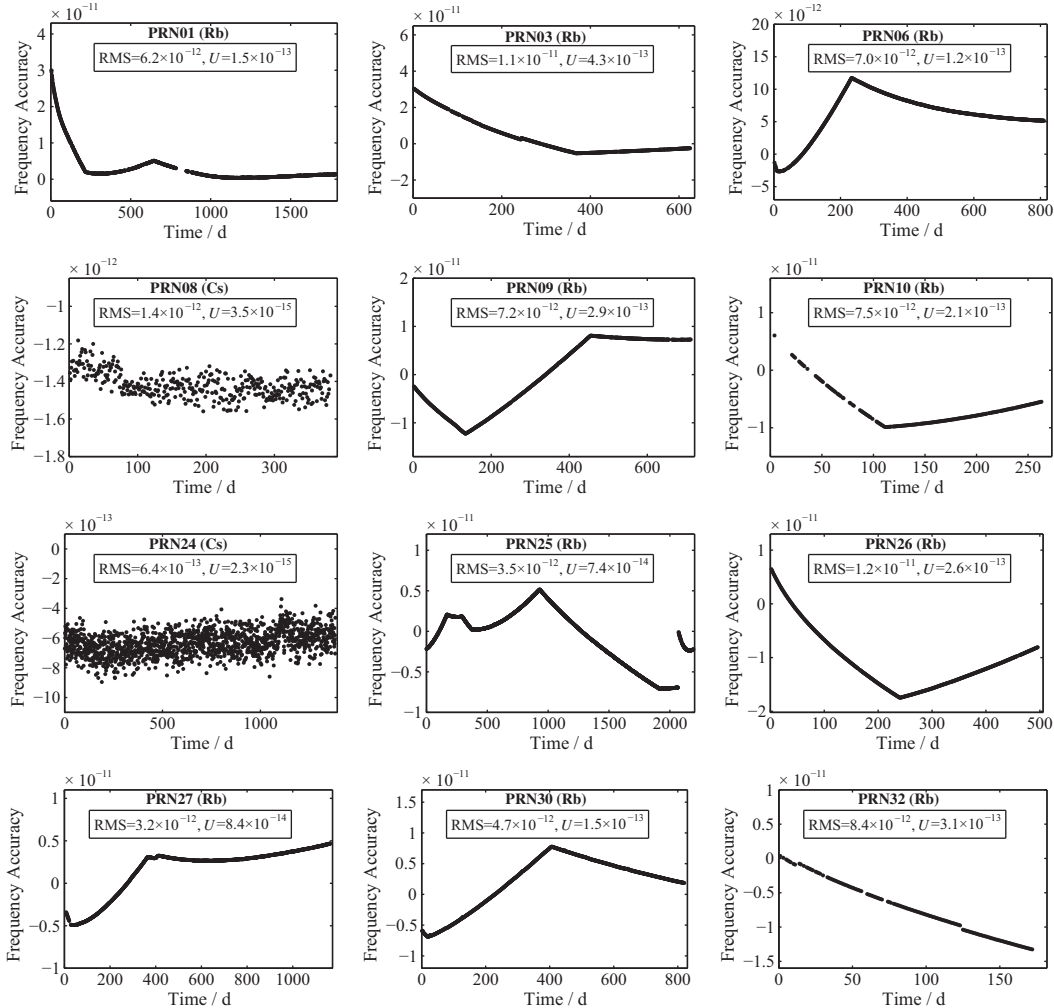


图1 GPS BLOCK IIF星载原子钟的频率准确度

Fig. 1 Frequency accuracies of GPS BLOCK IIF satellite clocks

3.2 频率漂移率的长期变化规律

要计算得到较为可靠的星载原子钟频率漂移率通常需至少15 d的连续数据. 本文以15 d为取样时间间隔, 计算各颗卫星不同时间段(简称时段, Session)的频漂及频漂序列对应的RMS和 U . 需要说明的是: 当取样的15 d数据连续且无数据缺失时则计算该时段的频漂, 否则该时段的频漂值记为空; 同时, 连续取样到最后剩余不满15 d的数据不

参与计算; 各颗卫星的频漂计算结果如图2所示. 根据图2可以看出: 星载铷钟1 d的频漂基本都在 10^{-14} 量级, 所有铷钟频漂的平均值为 $(5.5 \times 10^{-14} \pm 1.1 \times 10^{-14})/\text{d}$; 而星载铯钟1 d的频漂则在 10^{-15} 量级, 两台铯钟频漂的平均值为 $(3.4 \times 10^{-15} \pm 5.4 \times 10^{-16})/\text{d}$, 而且, 铯钟频漂序列的长期变化比较平稳; 而铷钟频漂序列的长期变化波动较大. 因此, GPS BLOCK IIF星载铯钟频漂的长期特性优于其铷钟频漂的长期特性.

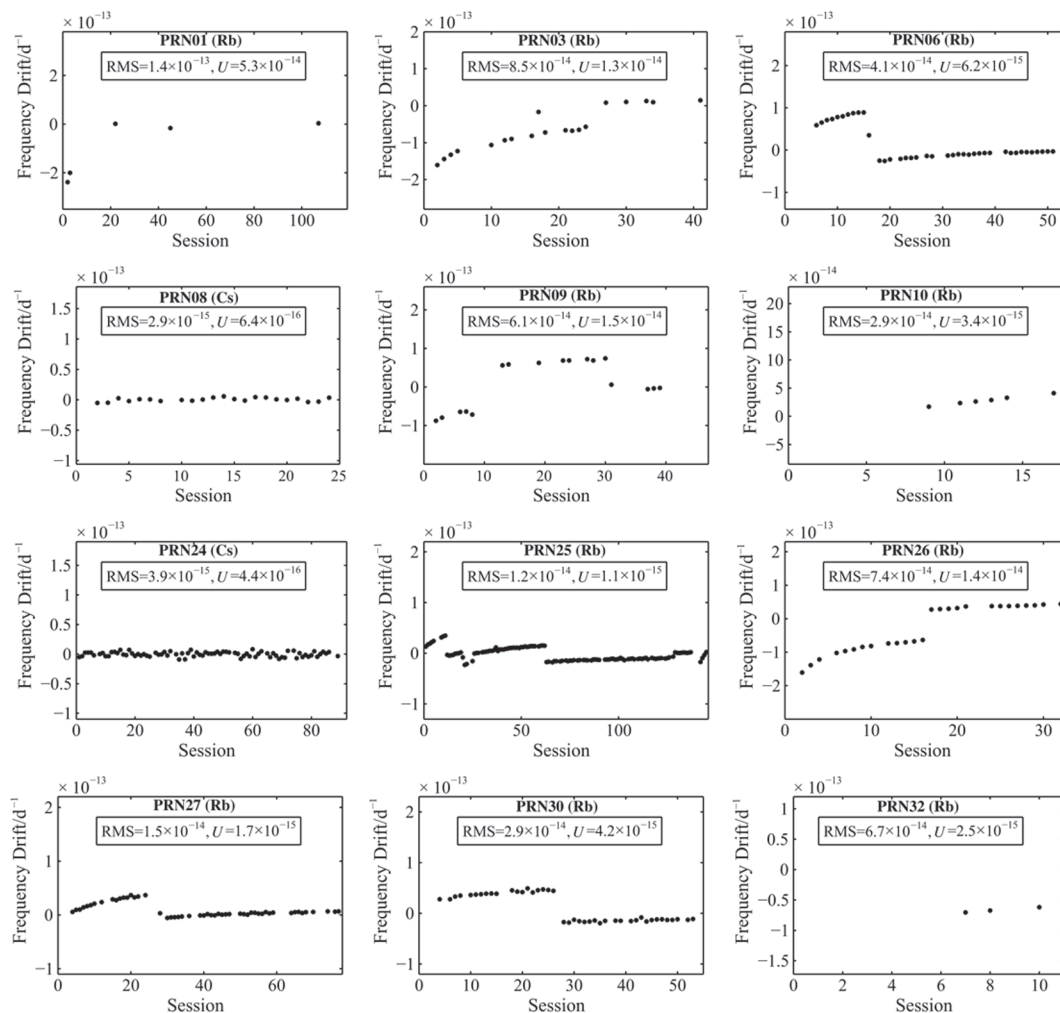


图 2 GPS BLOCK IIF星载原子钟的频率漂移率

Fig. 2 Frequency drifts of GPS BLOCK IIF satellite clocks

3.3 频率稳定度的长期特性分析

星载原子钟评估天稳定度(简称天稳, 平滑时间 $\tau=24 \text{ h} \times 3600 \text{ s/h}=86400 \text{ s}$)是频率稳定性分析的一个重要指标. 此外, 为了从不同时间尺度较为全面地分析星载原子钟的频率稳定性, 在计算天稳的同时, 本文还计算了2 h、6 h和12 h (平滑时间分别为7200 s、21600 s和43200 s)的频率稳定度结果. 计算天稳通常需要至少15 d的连续钟差数据, 因

此与计算频率漂移率类似, 以15 d为取样时间间隔计算各颗卫星不同时段频率稳定结果及其对应的RMS和 U , 结果如图3所示. 图中黑色、蓝色、红色和紫色分别表示当稳定度计算的平滑时间(即(4)式和(5)式中的 τ , 也就是取样间隔)为2 h、6 h、12 h和1 d时的频率稳定度计算结果.

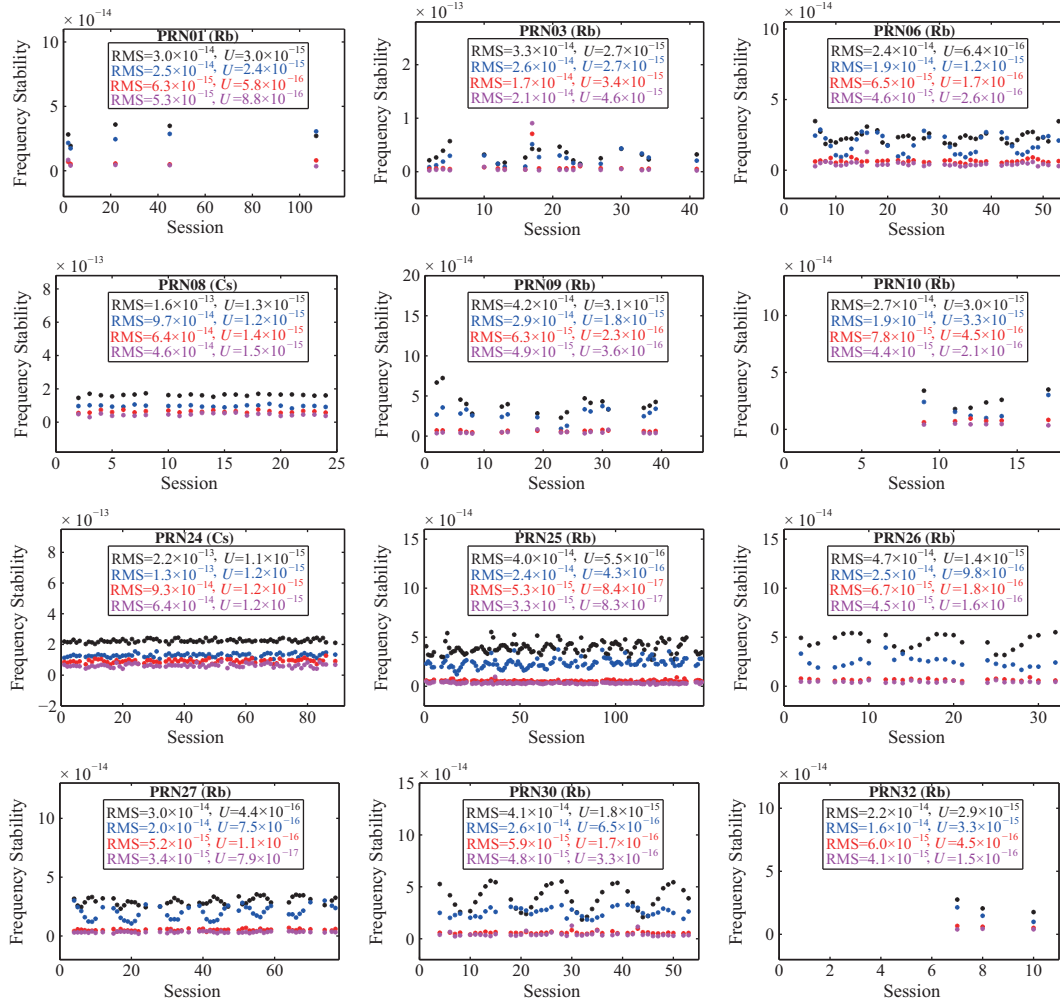


图3 GPS BLOCK IIF星载原子钟的频率稳定度

Fig. 3 Frequency stability of GPS BLOCK IIF satellite clocks

从图3中可以看出: 铷钟的天稳基本都在 10^{-15} 量级, 而铯钟的天稳基本保持在 10^{-14} 量级; 但是, 铯钟频率稳定度序列的长期变化比较平稳, 而铷钟的2 h和6 h稳定度序列的长期变化波动较大且呈现一定的周期性变化特点(PRN01、PRN10和PRN32参与计算的时段较少, 其周期性变化未能体现出来), 该变化周期的时间大约是0.5 yr. 所有铷钟2 h、6 h、12 h和天稳定度的平均值分别为 $3.4 \times 10^{-14} \pm 2.0 \times 10^{-15}$ 、 $2.3 \times 10^{-14} \pm 1.7 \times 10^{-15}$ 、 $7.3 \times 10^{-15} \pm 5.8 \times 10^{-16}$ 和 $6.0 \times 10^{-15} \pm 7.1 \times 10^{-16}$, 两铯钟对

应稳定度指标的平均值分别为 $1.9 \times 10^{-13} \pm 1.2 \times 10^{-15}$ 、 $1.1 \times 10^{-13} \pm 1.2 \times 10^{-15}$ 、 $7.9 \times 10^{-14} \pm 1.3 \times 10^{-15}$ 和 $5.5 \times 10^{-14} \pm 1.4 \times 10^{-15}$. 因此可知, BLOCK IIF 星载铷钟的频率稳定度优于其铯钟的频率稳定度, 而且在一定的时间范围内随着平滑时间的变长星载原子钟的频率稳定性变得更好.

3.4 钟差模型噪声的长期变化特点

采用钟差二次多项式模型对预处理后的卫星钟差数据进行逐天拟合得到对应的拟合残差, 同时计算残差序列对应的 RMS 和 U , 其结果如图 4 所示.

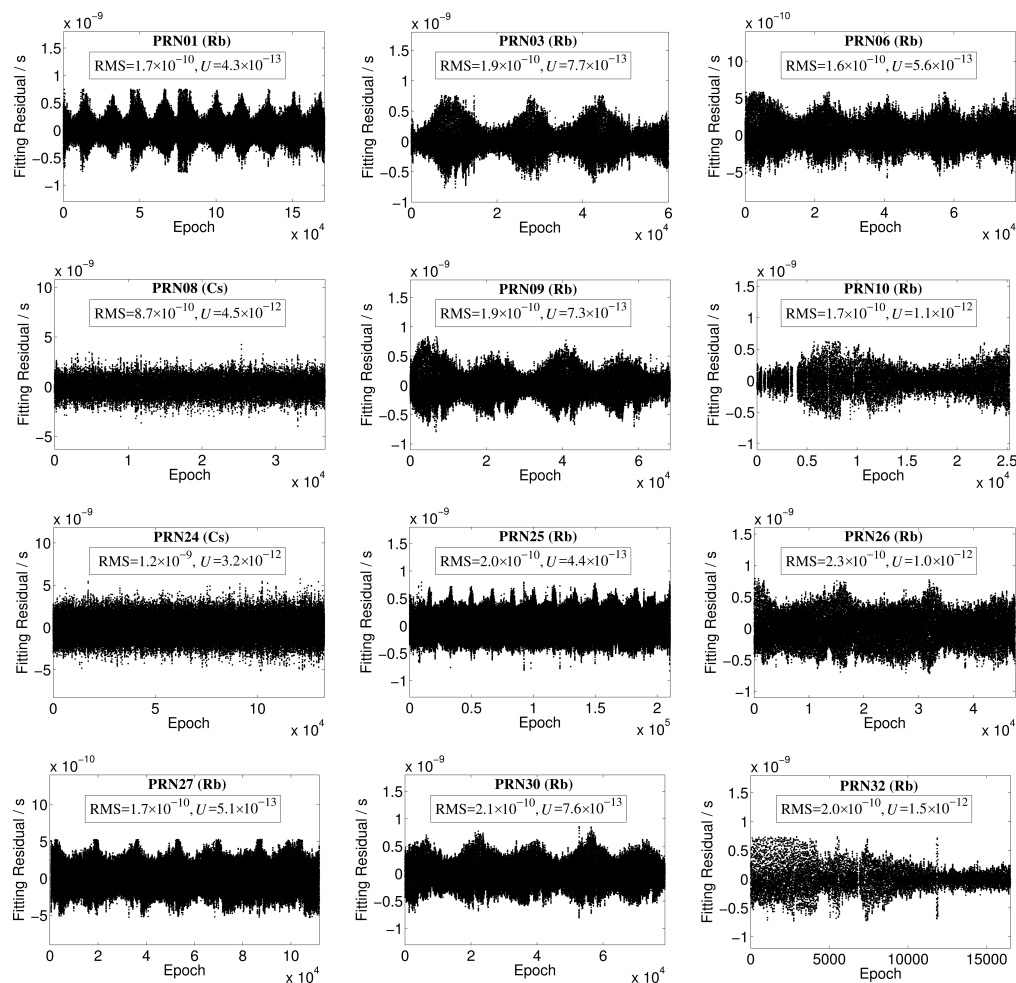


图 4 GPS BLOCK IIF 星载原子钟钟差模型的噪声水平

Fig. 4 Noise level of clock bias model of GPS BLOCK IIF satellite clocks

根据图中结果可以看出: 两铯钟的钟差模型噪声分布相对平稳, 其模型噪声的平均值约为 1.0 ns; 铷钟钟差模型噪声的精度在亚纳秒量级, 其噪声的 RMS 值均在 0.23 ns 以内, 所有铷钟的模型噪声平均值约为 0.2 ns; 说明 BLOCK IIF 星载铯钟长期运行过程中的噪声水平比较稳定, 但精度相对较差, 而星载铷钟长期运行过程中虽然噪声起伏较大,

但整体而言其噪声水平的精度却相对较好. 此外, 除了运行时间相对较短的PRN32之外, 其余铷钟的模型噪声序列均存在以大约半年为周期的长周期项; 同时, 与3.3节铷钟的2 h和6 h稳定度指标进行对比可以发现: 铷钟的频率稳定性影响着铷钟钟差模型的噪声分布, 其频率稳定度的周期变化特点会使得钟差模型噪声具有近似周期项的周期性变化特点.

3.5 卫星钟差周期特性分析

基于拟合残差使用频谱分析的方法提取卫星钟差的周期项, 其结果如表2所列. 需要说明的是: 在提取周期项时, 取频谱分析结果中幅值较大且突出的频率点, 铷钟取到前6项, 铯钟取到前4项. 因为这样既能保留主要的周期项并反映数据真实的周期特性, 又能避免提取过多周期项导致出现周期项提取不准和不必要的工作量. 从表中结果可以看出: GPS BLOCK IIF卫星的钟差数据均存在较为显著的周期项, 具体表现为: 铷钟钟差的3个主周期依次是12 h、6 h (PRN26和PRN30的前2项分别为6 h、12 h)和24 h, 铯钟钟差的2个主周期依次是12 h、6 h. 顾及GPS卫星轨道的周期(11 h 58 min), 可以发现: 卫星钟差数据的主周期分别近似为卫星轨道周期的1倍、1/2或2倍. 同时, 考虑到IGS最终精密卫星钟差数据是基于精密定轨方法得到的, 所以可以认为在同时解算卫星轨道和钟差的过程中一部分的轨道误差被钟差吸收.

表 2 卫星钟差数据周期项的提取结果(周期项按照显著程度依次给出, 单位: h)
Table 2 The periodic terms extracted from the satellite clock bias data (periodic terms are given according to their amplitudes from large to small, unit: h)

Clock type	Satellite	Period 1	Period 2	Period 3	Period 4	Period 5	Period 6
Rb clock	PRN01	12	6	24	4	3	2.4
	PRN03	12	6	24	4	8	3
	PRN06	12	6	24	4	3	8
	PRN09	12	6	24	4	8	3
	PRN10	12	6	24	4	17	8
	PRN25	12	6	24	4	3	8
	PRN26	6	12	24	4	3	8
	PRN27	12	6	24	4	3	2.4
	PRN30	6	12	24	4	8	3
Cs clock	PRN32	12	6	24	4	8	4.8
	PRN08	12	6	13.7	15.2		
	PRN24	12	6	13.7	15.7		

4 总结

通过星载原子钟的频率准确度、频率漂移率、频率稳定度、观测噪声和钟差周期特性这5个指标的长期变化, 分析评估了GPS BLOCK IIF星载原子钟的长期性能. 根据计算和分析得到以下结论:

(1) 铯钟频率准确度的长期变化平稳, 其平均值为 $1.0 \times 10^{-12} \pm 2.9 \times 10^{-15}$; 铷钟频率准确度的长期变化波动较大, 其平均值为 $7.1 \times 10^{-12} \pm 2.1 \times 10^{-13}$.

(2) 铷钟频漂的平均值为 $(5.5 \times 10^{-14} \pm 1.1 \times 10^{-14})/\text{d}$, 铯钟频漂的平均值为 $(3.4 \times 10^{-15} \pm 5.4 \times 10^{-16})/\text{d}$; 铯钟频漂的长期变化平稳, 铷钟频漂的长期变化波动较大.

(3) 铷钟 2 h、6 h、12 h 和天稳定度的平均值分别为 3.4×10^{-14} 、 2.3×10^{-14} 、 7.3×10^{-15} 和 6.0×10^{-15} , 铯钟对应指标的平均值分别为 1.9×10^{-13} 、 1.1×10^{-13} 、 7.9×10^{-14} 和 5.5×10^{-14} . 在一定的时间内随着平滑时间的变长, 星载原子钟的频率稳定性变得更好.

(4) 铯钟的钟差模型噪声变化平稳, 而铷钟的钟差模型噪声波动较大, 铷钟钟差模型噪声的平均值约为 0.2 ns, 铯钟钟差模型噪声的平均值约为 1.0 ns; 此外, 铷钟的频率稳定性影响铷钟钟差模型的噪声分布, 两者存在以大约半年为周期的长周期项.

(5) GPS BLOCK IIF 卫星的钟差数据均存在显著的周期项, 其主周期分别近似为卫星轨道周期的 1/2、1 倍或 2 倍.

最后, 对比各颗卫星的各项性能指标可以发现, 试验时间段内 BLOCK IIF 卫星在轨运行时间的长短与各性能指标之间无明显的关系; 同时, 本文所设计的星载原子钟性能指标能够从不同角度较为全面地表征 GPS BLOCK IIF 星载原子钟的性能.

致谢 感谢审稿专家在审阅本文的过程中指出的问题和给出的详细建议.

参 考 文 献

- [1] 郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究. 郑州: 信息工程大学, 2006: 143-150
- [2] Uhlemann M, Gendt G, Ramatschi M, et al. Postdam: Proceedings of the IAG Scientific Assembly in Postdam, 2013: 673-679
- [3] Griggs E, Kursinski E R, Akos D. GPS Solutions, 2014, 18: 443
- [4] 贾小林, 冯来平, 毛悦, 等. 时间频率学报, 2010, 33: 115
- [5] 毛悦, 陈建鹏, 戴伟, 等. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36: 1182
- [6] 付文举. GNSS 在轨卫星钟特性分析及钟差预报研究. 西安: 长安大学, 2014: 29-40
- [7] 白锐锋, 蔡志武, 肖胜红. GPS Block-IIF 星载原子钟性能分析研究. 第三届中国卫星导航学术年会, 广州, May 16-19, 2012
- [8] 张清华, 隋立芬, 贾小林, 等. 导航定位学报, 2014, 2: 46
- [9] 高为广, 蔺玉亭, 陈谷仓, 等. 测绘科学技术学报, 2014, 31: 342
- [10] Riley W J. Handbook of Frequency Stability Analysis. Boulder: Time and Frequency Division Physics Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 2008: 18-26
- [11] 王宇谱, 吕志平, 孙大双, 等. 天文学报, 2016, 57: 78
- [12] 周佩元, 杜兰, 路余, 等. 测绘学报, 2015, 44: 1299
- [13] 黄观文, 张勤, 许国昌, 等. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33: 496
- [14] Huang G, Zhang Q, Li H, et al. AdSpR, 2015, 55: 269
- [15] Kouba J. A Guide to Using International GNSS Service Products. Ocean Surface Topography Science Team Meeting, Boulder, 2013
- [16] 楼益栋, 施闯, 周小青, 等. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34: 88
- [17] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示. JJF 1059.1-2012. 2013
- [18] 李金海. 误差理论与测量不确定度评定. 北京: 中国计量出版社, 2003: 173-176

Analysis of the Long-term Performance of GPS BLOCK IIF Satellite Atomic Clocks

WANG Yu-pu^{1,2} LÜ Zhi-ping¹ LI Lin-yang¹ ZHAI Shu-feng¹

(1 School of Surveying and Mapping, the PLA Information Engineering University,
Zhengzhou 450001)

(2 State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054)

ABSTRACT It plays important roles in monitoring system integrity, determining and predicting satellite clock bias, etc., to analyze the long-term performance of BLOCK IIF satellite atomic clocks. The latest BLOCK IIF series of GPS have been developed completely on 2016 February 6. The long-term performance of GPS BLOCK IIF satellite atomic clocks is analyzed and evaluated based on the long-term variations of five performance indexes, including frequency accuracy, frequency drift, frequency stability, noise level, and periodic terms of clock bias. The analyzed and evaluated results show that frequency accuracy, frequency drift, and average noise level of the rubidium clocks are respectively $7.1 \times 10^{-12} \pm 2.1 \times 10^{-13}$, $(5.5 \times 10^{-14} \pm 1.1 \times 10^{-14})/\text{d}$, and about 0.2 nanosecond. The corresponding indexes of the cesium clocks are respectively $1.0 \times 10^{-12} \pm 2.9 \times 10^{-15}$, $(3.4 \times 10^{-15} \pm 5.4 \times 10^{-16})/\text{d}$, and about 1.0 nanosecond, and their variations are relatively stable. The frequency stability of rubidium clocks in the 2 hours, 6 hours, 12 hours, and 24 hours (averaging time $\tau=7200$ s, 21600 s, 43200 s, and 86400 s) are 3.4×10^{-14} , 2.3×10^{-14} , 7.3×10^{-15} , and 6.0×10^{-15} respectively. The corresponding stability indexes of the cesium clocks are 1.9×10^{-13} , 1.1×10^{-13} , 7.9×10^{-14} , and 5.5×10^{-14} . In addition, there are obvious periodic terms in satellite clock bias, and their primary periods are approximately equal to one-half, one, or double of the corresponding satellite orbit periods.

Key words astrometry: time, satellite atomic clock, methods: performance evaluation, methods: data analysis