

基于高频观测值的不同 GNSS 卫星钟稳定性分析

李明哲¹ 张绍成^{1,2} 胡友健¹ 侯威震¹

1 中国地质大学(武汉),湖北 武汉,430074
2 中国科学院大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北 武汉,430077

摘 要:在 GNSS 高精度数据处理中,卫星钟差往往是决定结果精度的核心因素之一。采用 20 Hz 的双频观测数据对 GNSS 星载原子钟 0.05~100 s 平滑时间下的短期稳定性进行分析,通过星间单差的方法消除接收机钟差,采用无电离层组合及夜间观测避免电离层高阶项短期变化的影响,同时采用经验模型和映射函数来进行对流层延迟改正。通过 Lag 1 自相关函数分析了影响 GNSS 卫星钟稳定性的主要噪声类型,并使用阿伦方差计算分析 GPS、GLONASS 及 BDS 各自系统内不同卫星组合之间的钟差。结果表明,GPS、GLONASS 及 BDS 系统钟差稳定性 0.05 秒稳均可达到 10^{-10} 量级,秒稳可达 10^{-11} 量级。可以认定,GPS、GLONASS 及 BDS 在短期内的稳定性量级相当,从而验证了基于星间单差的 BDS 掩星数据处理方案的可行性。

关键词:GNSS 钟差;高频观测值;短期稳定性;阿伦方差;噪声识别

中图分类号:P228 **文献标志码:**A

全球卫星定位导航系统已不再局限于传统的定位导航服务,越来越多的高频高动态应用正逐步发展成熟。在 GPS 掩星观测中,接收机载体为运动速度高达数千米每秒的低轨卫星,观测频率达到 50 Hz,此时 GPS 卫星钟差的短期偏移将给反演参数带来系统性偏差。因此在早期 GPS 系统存在 SA 干扰时,掩星数据处理过程中需引入地基观测数据实现卫星钟差偏移的差分消除。随着 GPS 卫星系统的完善和 IGS 服务精度的提高,GPS 掩星观测已可以去除地基参考站的辅助,其得益于 GPS 星载钟在高频掩星观测中的高度稳定性。

目前,基于 GNSS 卫星钟稳定性的研究主要集中在中期和长期,评价星载原子钟质量的采样间隔往往都在数 10 s 以上^[1-4],仅有少数研究关注了卫星钟短期稳定性^[5]。总体来看,针对 1 s 以内短期稳定性的相关分析较少。然而在掩星观测中,采样频率一般为 50 Hz,且掩星事件持续时间一般不超过 100 s。原子钟中长期稳定性不足以说明掩星观测中卫星钟的影响,需要对卫星钟短期稳定性进行更为详细的分析。

本文首先介绍钟差计算的基本模型及卫星钟差参数数据处理方法;随后就原子钟稳定性分析和数据预处理方法进行了阐述;最后以实测数据进行钟差计算,通过 Lag1 自相关函数分析了影响卫星钟稳定性的主要噪声类型,并通过稳定性模拟分析了大气掩星弯曲角反演受卫星钟稳定性的影响情况。考虑到短期内原子钟频率漂移不明显,相比于哈达玛方差,直接使用阿伦方差能够满足平滑时间小于 100 s 的稳定性分析。结合噪声分析结果,本文使用阿伦方差对 GPS、GLONASS 及 BDS 系统星载原子钟在 0.05~100 s 之间的短期稳定性进行分析,从而验证各种 GNSS 卫星系统在掩星观测反演应用中的可行性,并为掩星数据的处理方法提供参考。

1 基本观测模型及钟差计算

为了获得高精度的钟差结果,需采用载波观测方程求解卫星钟差。在已知测站点三维坐标的情况下,用星间差分方法消除掉接收机钟差,最终得到卫星钟差的单差值。

卫星精密钟差的确定是以某一颗卫星钟为参考钟,其他卫星以单差形式体现^[6],因此星间差分所得 GNSS 卫星钟单差即可视为 GNSS 卫星钟差。同时由于现在掩星数据的处理方法主要是基于单差观测,单差钟差能够更好地体现卫星钟稳定性对大气掩星反演结果的影响。载波相位观测方程及其钟差计算方法分别为:

$$\lambda_i \varphi_{r,i}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + dtrop_{r,i}^s - \text{dion}_{r,i}^s - \lambda_i N_{r,i}^s + \epsilon_{r,i}^s \quad (1)$$

$$dt^s - dt^k = ((\rho_r^s - \rho_r^k) + (dtrop_{r,i}^s - dtrop_{r,i}^k) - (\text{dion}_{r,i}^s - \text{dion}_{r,i}^k) - (\lambda_i N_{r,i}^s - \lambda_i N_{r,i}^k) - (\lambda_i \varphi_{r,i}^s - \lambda_i \varphi_{r,i}^k) + (\epsilon_{r,i}^s - \epsilon_{r,i}^k))/c \quad (2)$$

式中, λ_i 表示波段为 i 的载波波长; $\varphi_{r,i}^s$ 表示接收机 r 对卫星 s 的载波相位观测值; ρ_r^s 为接收机与卫星之间的几何距离; c 为光速; dt_r 为接收机钟差; dt^s 为卫星钟差; $dtrop_{r,i}^s$ 、 $\text{dion}_{r,i}^s$ 为对流层延迟及电离层延迟; $N_{r,i}^s$ 为载波相位整周模糊度; $\epsilon_{r,i}^s$ 为载波相位噪声项。计算过程中卫星坐标由精密星历内插得到,采用双频组合削弱电离层影响,并利用 UNB3 模型及 Niell 映射函数进行对流层改正^[7-8],由于在分析卫星钟稳定性时,要将钟差相位数据转换为相对频率数据,该步骤需要将计算所得的钟差在历元间再次求差,所以可将整周模糊度初步纳入单差钟差待后续抵消。

2 原子钟稳定性分析方法

2.1 钟差模型

原子钟的稳定性指其输出频率受噪声影响而产生的随机起伏情况,是描述平均频率随机变化的量。原子钟差可以看作确定性变化分量和随机性变化分量的综合影响,其模型可以表示为:

$$x(t) = x_0 + y_0 t + \frac{1}{2} D t^2 + \epsilon(t) \quad (3)$$

式中, $x(t)$ 表示原子钟时间偏差; x_0 为原子钟的初始相位偏差; y_0 为原子钟的初始频率偏差; D 为原子钟频率漂移项; $\epsilon(t)$ 为随机变化分量^[1]。

2.2 粗差数据剔除

由于星载原子钟在长期连续运行过程中不可避免地会出现粗差,为了避免其对稳定性分析结果产生严重影响,须对钟差粗差数据进行探测及剔除。在原子钟的稳定性分析过程中主要是采用频率数据进行粗差的剔除^[2]。相位数据向相对频率偏差数据的转换式为:

$$y_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{\tau_0} \quad (4)$$

式中, x_i 、 x_{i+1} 分别表示第 i 个历元和第 $i+1$ 个历元的钟差相位数据; τ_0 为历元间隔。在完成相位数据向频率数据转换后,采用 3σ 原则对相对频率数据进行粗差的剔除。把超出均值 3 倍标准差部分的频率数据认为是粗差点,并将其值记为 0。在本文的测试数据中, GPS、GLONASS 及 BDS 这 3 个星座的钟差频率数据剔除分别小于 0.39%、0.28% 和 0.39%。

2.3 噪声识别理论

原子钟的随机模型可以用 5 种独立的能量谱噪声来表示,整体噪声可看作这 5 种噪声的线性叠加。噪声的功率谱密度与边带频率的关系可以表示为:

$$S_y(f) = \sum_{\alpha=-2}^2 h_{\alpha} f^{\alpha} \quad (5)$$

式中, f 为边带频率; h_{α} 为噪声指数为 α 的能量谱噪声强度系数,而 α 可取值 -2、-1、0、1、2,分别对应调频随机游走噪声(random walk FM)、调频闪变噪声(flicker FM)、调频白噪声(white FM)、调相闪变噪声(flicker PM)和调相白噪声(white PM)。

Lag1 自相关函数是目前较为常用的原子钟噪声识别方法,通过式(6)至式(8)计算 p 值能够有效识别构成原子钟随机模型的 5 种噪声。

$$r_1 = \sum_{i=1}^{N-1} (z_i - \bar{z})(z_{i+1} - \bar{z}) / \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2 \quad (6)$$

$$\delta = r_1 / (1 + r_1) \quad (7)$$

$$p = -2(\delta + d) \quad (8)$$

式中, $\{z_n = 1, 2 \cdots N\}$ 为对应平滑时间为 τ 的原子钟相位数据或频率数据; \bar{z} 为数据序列的平均值; d 为计算时的差分次数,其取值一般为 0~2; p 为对噪声指数 α 的估计值,当输入序列为相位数据时, $\alpha = P + 2$,输入为频率数据时, $\alpha = P$ 。据此可以通过 α 来确定噪声类型^[4,9]。

2.4 阿伦方差

阿伦系列方差是最常用的稳定性计算方法,解决了标准方差用于原子频标时域稳定性分析时发散的问题,能够有效表征原子钟时域稳定性^[1-2]。由于哈达玛方差是三次采样方差,阿伦方差是二次采样方差,因此欲得到相同的置信度估计成果,前者需要更多的数据,当原子频标受调频白噪声和调相随机噪声影响时,哈达玛方差估计结果不如阿伦方差估计结果置信度高^[1],为了获得更好的置信度,本文使用重叠阿伦方差进行分析,其定义为:

$$\sigma_y^2(\tau)=\frac{1}{2m^2(M-2m+1)}\sum_{j=1}^{M-2m+1}\sum_{i=j}^{j+m-1}[y_{i+m}-y_i]^2$$

(9)

式中, $\{y_n=1,2\cdots M\}$ 为采样间隔为 τ_0 的原子钟相对频率偏差序列; M 为数据总个数; τ 为平滑时间; m 为平滑因子, $m=\tau/\tau_0$ 。

3 GNSS 卫星钟稳定性分析

本文使用 Trimble R8 型 GNSS 接收机, 基于内置天线, 于 2016-03-18 采集了 20 Hz 双频观测数据, 选取其中不含周跳的时段及卫星进行计算, 并选取夜间时段以减弱电离层误差二阶项的影响, 筛选后每组数据的时长为 1 h。

3.1 GNSS 卫星情况

考虑到 GNSS 不同型号卫星和卫星钟原子晶振的不同, 可能会对卫星钟差稳定性带来不同的影响, 因此为了区分各种 GNSS 卫星中不同型号卫星和原子晶振的差异, 将 GPS、GLONASS 及 BDS 系统在轨运行卫星情况分别统计如表 1-3 所示。

表 1 GPS 卫星情况^[10]

Tab.1 Satellites Information of GPS

卫星种类	PRN	原子钟类型	发射时间
Block IIR	02, 11, 13, 14, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 28	RB	1997—2004 年
	05, 07, 12, 15, 17, 29, 31	RB	2005—2009 年
Block IIF	01, 03, 06, 08, 09, 10, 24, 25, 26, 27, 30, 32	08, 24 为 CS, 其他为 RB	2010—2016 年

表 2 GLONASS 卫星情况^[11]

Tab.2 Satellites Information of GLONASS

卫星种类	PRN	原子钟类型	发射时间
GLONASS M	10, 11, 13, 14, 15, 19, 20	CS	2005—2007 年
GLONASS M	01, 05, 06, 16, 22, 23, 24	CS	2008—2010 年
GLONASS M	02, 03, 04, 07, 08, 17, 18, 21	CS	2011—2016 年
GLONASS K1	09, 20	CS	2014 年, 2011 年

表 3 BeiDou 卫星情况^[12]

Tab.3 Satellites Information of BDS

卫星种类	PRN	原子钟类型	发射时间
GEO	01, 02, 03, 04, 05	RB	2010—2012 年
IGSO	06, 07, 08, 09, 10	RB	2010—2011 年
MEO	11, 12, 13, 14	RB	2012 年

3.2 噪声识别

基于去除粗差后的频率数据计算 Lag1 自相关函数, 并通过计算 p 值确定噪声指数 α , 进而估计 GPS、GLONASS 及 BDS 系统各自的原子钟噪声类型。图 1 所示为噪声指数计算情况, 其中黑色、蓝色、红色折线分别表示 GPS、GLONASS 及 BDS 卫星钟噪声指数随平滑时间的变化情况。

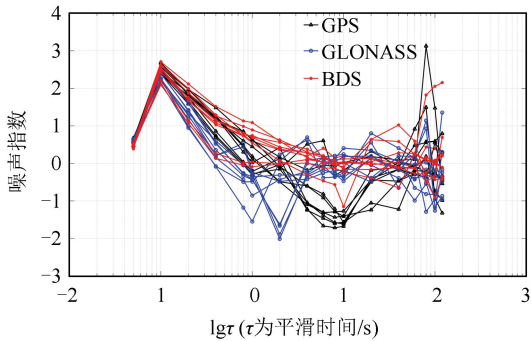


图 1 GNSS 卫星钟噪声分析

Fig.1 GNSS Satellite Clocks Noise Identification

从图中可以看出, 在平滑时间 0.4 s 以内, 计算得到的卫星钟差噪声构成相似, 在 0.1~0.4 s 之间表现出调相白噪声特性, 推断这一部分的钟差稳定性结果会受接收机硬件噪声或者信号噪声影响。而在 0.4 s 以后, 各卫星组合的噪声类型表现出差异, BDS 系统 α 噪声指数基本在 0 附近摆动, 估计其卫星钟主要受调频白噪声影响。GPS 和 GLONASS 卫星钟在 1~10 s 之间受到调频随机游走噪声、调频闪变噪声、调频白噪声的影响。而在 10~100 s 之间, 其噪声类型主要向调频白噪声靠拢。在平滑时间 100 s 处, 由于采样数据的减少会对 p 值计算的准确性产生影响, 导致噪声指数 α 略有发散。

3.3 卫星钟稳定性影响

为了研究卫星钟稳定性对大气掩星反演结果的影响, 本文选取 2016-03-18 的 COSMIC 掩星数据进行分析。从 CDAAC 提供的附加相位产品中随机选取 3 个掩星事件进行模拟。采用计算机生成伪随机数的方式, 为原始附加相位中每历元数据分别添加卫星钟稳定性为 10^{-12} 、 10^{-11} 、 10^{-10} 量级的模拟影响。利用欧洲气象卫星应用组织 EUMESAT 下属科研机构 GRAS 开发的无线电掩星处理包 ROPP (radio occultation processing package) 对原始附加相位产品及模拟影响后的附加相位产品进行处理, 为了减小平滑因素对稳定性影响分析的干扰, 本文将平滑因子设置为 0.1 km。

考虑到掩星 L1 载波的信号质量要优于 L2 载波, 选取 L1 载波生成的弯曲角进行对比, 将同一掩星事件生成的弯曲角截取内插到间隔为 0.1 km 的影响参数格网上进行对比, 结果如图 2 所示。

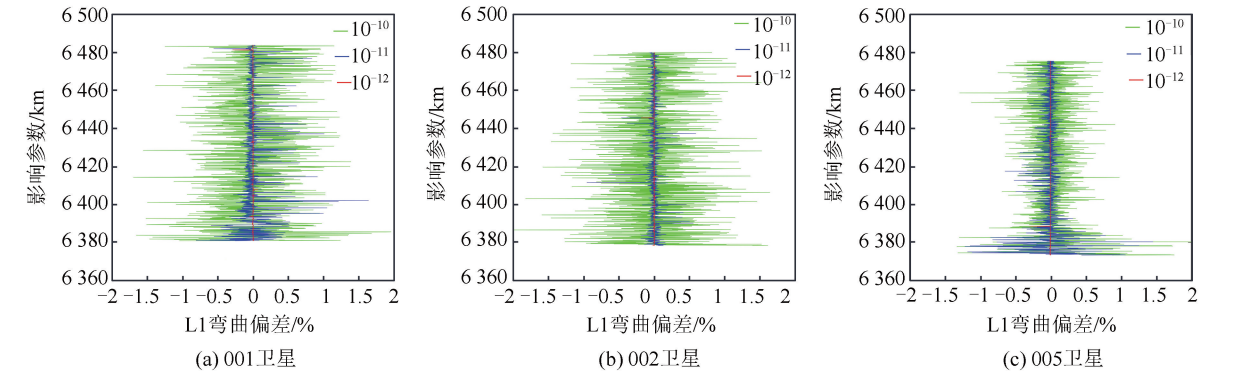


图 2 模拟卫星钟稳定性影响的弯曲角偏差
Fig.2 Bending Angle Bias Caused by Analog Satellite Clock Stability

图 2(a)、2(b)、2(c)分别为 2016-03-18 COSMIC 001、002、005 卫星的一个随机掩星事件, 在添加模拟稳定性偏差后对 L1 弯曲角反演结果的影响, 其中纵坐标表示影响参数, 横坐标表示 L1 弯曲角偏差百分比, 如图 2 中红线所示, 可以看到, 当卫星钟稳定性为 10^{-12} 时, 其对弯曲角反演的影响较小, 偏差基本在 0 附近波动, 当稳定性为 10^{-11} 时影响有所增大, 但基本在 $-0.5\% \sim 0.5\%$ 之间, 而当稳定性为 10^{-10} 时, 其对弯曲角反演的影响程度明显增大, 摆动范围变为 $-1.5\% \sim 1.5\%$ 。据此可以推测, 在平滑时间短的情况下, 稳定性达到 10^{-12} 量级的卫星钟能够较好地用于大气掩星弯曲角反演。

3.4 时域稳定性分析

考虑到卫星钟稳定性可能与卫星种类及发射时间相关, 所以分别在 GPS、GLONASS 及 BDS

各自系统内选取了 9 对卫星组合进行卫星钟稳定性分析, 各系统不同平滑时间下的钟差稳定性结果如图 3(a)、3(b)、3(c)所示。尽管 GPS 及 BeiDou 系统卫星钟种类主要为 RB 原子钟, 但在短期内其频率漂移不明显, 且二者原子钟主要受调频随机游走噪声、调频闪变噪声、调频白噪声的影响, 不考虑哈达玛方差, 直接采用阿伦方差能够满足平滑时间小于 100 s 的稳定性分析^[1,9]。

从图 3 中可以看出, GPS、GLONASS 和 BDS 各自系统内不同卫星组合的钟差稳定性 0.05 秒稳及 0.1 秒稳均可以达到 10^{-10} 量级, 秒稳可达 10^{-11} 量级, 10 秒稳及 100 秒稳均可达到 10^{-12} 量级。在分析时段内, 三者原子钟稳定性的变化趋势基本一致, 均随着平滑时间的增加而不断变好。30~100 s 之间的卫星钟稳定性变化趋势也符合之前一些学者所做的相关研究结果。

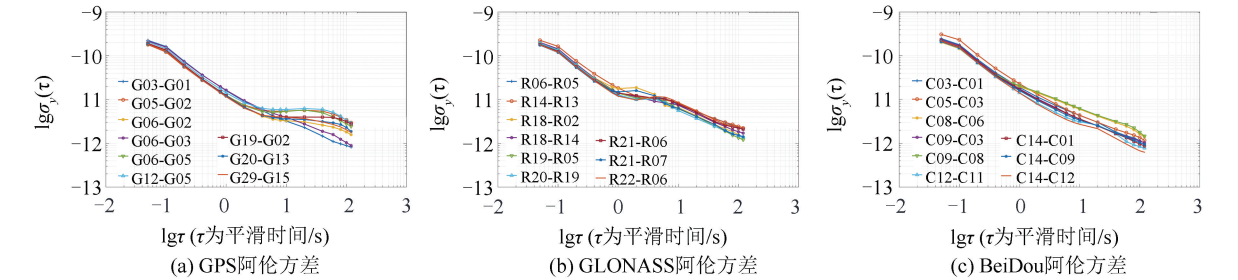


图 3 GPS、GLONASS、BDS 卫星钟阿伦方差结果
Fig.3 Allan Deviation Results of GPS, GLONASS, BDS Satellite Clocks

GPS 系统中选取的卫星组合包括了 Block IIR-Block IIR、Block IIRM-Block IIRM、Block IIF-Block IIF、Block IIRM-Block IIR、Block IIF-Block IIR、Block IIRM-Block IIF 这几种组合方式, 考虑到 GPS 卫星的种类与发射时间的相关性, 这些组合也能够代表不同发射时间的组合。

从图 3(a)中可以看出各种组合在分析时段内稳定性基本处于相同的量级, 但在 10 s 处不同卫星组合的卫星钟稳定性开始分散, 并在 100 s 处表现出较为明显的差异。其中 Block IIF-Block IIF 组合的稳定性要好于其他组合, 推测可能是卫星钟稳定性与原子钟生产工艺的提高有一定相关

性,由于 Block IIF 型卫星发射时间较晚,原子钟性能有所改进,稳定性提高。

在 GLONASS 系统中,由于卫星类型主要为 GLONASS M 型,仅有的两颗 GLONASS K1 型卫星难以同时观测,所以不便采用卫星类型进行分类。本文采取将发射时间分为 2008 年以前、2008—2010 年及 2010 年以后共 3 个阶段,选取不同的时间组合进行稳定性分析,如图 3(b)所示,不同组合 GLONASS 卫星钟整体变化趋势与 GPS 相似,在平滑时间 100 s 处,尽管稳定性有所差异,但相比于 GPS 而言分散度较小。

由于 BeiDou 系统卫星发射时间集中在 2010 年以后,时间较为接近,本文则选取了 GEO-GEO、IGSO-GEO、MEO-GEO、IGSO-IGSO、MEO-IGSO、MEO-MEO 共 6 种卫星组合方式。从图 3(c)中可以看到,在 1 s 以内,各卫星组合稳定性均在 10^{-10} 量级,其中仅有 C05-C03 地球静止轨道卫星组合的稳定性略微不足。而在平滑时间 1~100 s 之间,不同组合稳定性略有分散,最终在 100 s 处产生较为明显的差异,但相比于 GPS 而言分散度同样较小。其中 MEO-MEO 组合的稳定性要略好于其他组合,同样可能与 MEO 卫星发射较晚,原子钟性能改善有一定关系。

图 4(a)直观地比较了 GNSS 各系统卫星钟的稳定性,可以看出,在平滑时间小于 1 s 时,由于接收机及信号噪声的干扰,使得 GNSS 卫星钟稳定性表现出相同的趋势,但是可以推断在此平滑时间内各系统卫星钟的稳定性不会显著差于当前分析的结果。在平滑时间 1~10 s 的范围内, GPS 卫星钟整体稳定性要略好于 BDS 及 GLONASS 卫星钟。而在 100 s 的平滑时间上, BDS 卫星钟的稳定性要好于 GPS 系统 Block IIR 及 Block IIRM 卫星钟,基本与 Block IIF 卫星钟的稳定性相当,同时整体上稳定性也好于 GLONASS 卫星钟。而在整个平滑时段内,可以看到 BDS MEO 组合卫星钟稳定性已经接近 GPS Block IIF 组合的稳定性。图 4(b)则以 2010 年为节点,将 GNSS 卫星分为两类。可以看出,在 10~100 s 的平滑时间内,2010 年后发射的卫星整体稳定性较好,可以推测 GNSS 卫星钟稳定性与卫星发射时间或者说原子钟生产时间有一定相关性。

图 5 更为直观地表现了不同系统在 0.05 s、1 s 及 100 s 3 个平滑时间上的稳定性情况,其纵坐标分别为阿伦方差值除以 10^{-10} 、 10^{-11} 及

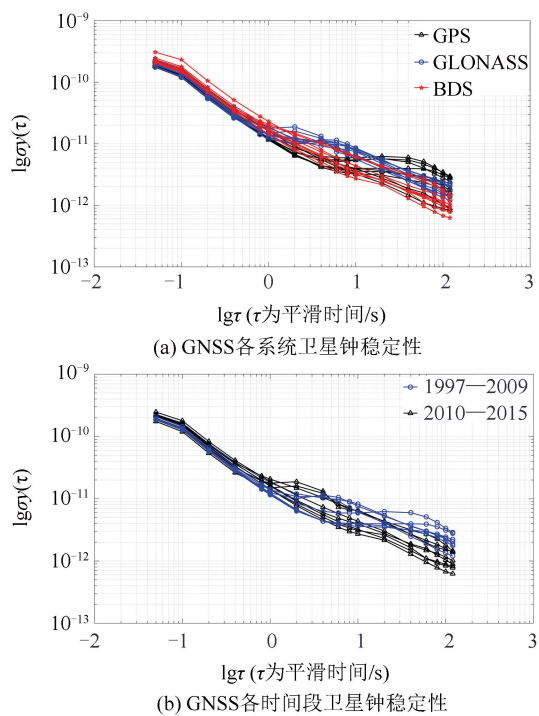


图 4 GPS、GLONASS、BDS 卫星钟整体稳定性对比
Fig.4 Comparison of GPS, GLONASS, BDS Satellite Clocks Stability

10^{-12} , 可以明显看出各系统在相同平滑时间下的量级基本一致。

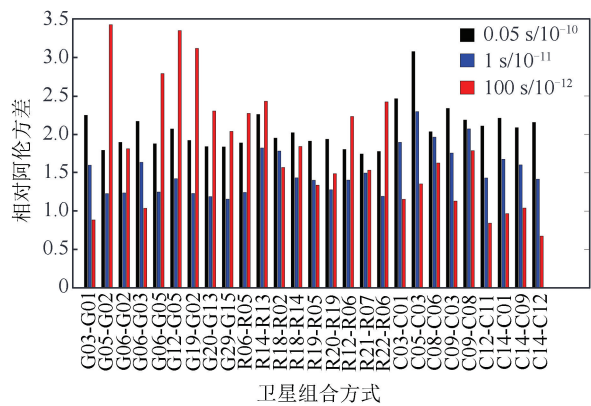


图 5 GPS、GLONASS、BDS 卫星钟平滑时间上的稳定性
Fig.5 The Stability of GPS, GLONASS, BDS Satellite Clocks

4 结 语

随着 GNSS 在高频高动态方向的发展,需要更短期、更细节的卫星信息来支持相关应用的实现。本文利用 2016-03-18 自主观测的双频载波相位观测值计算 GPS、GLONASS 及 BDS 各自系统内卫星之间的钟差,选取 Lag1 自相关函数分析了短期内影响卫星钟稳定性的噪声类型,并利

用阿伦方差评价星载原子钟的稳定性,同时简要模拟了卫星钟稳定性对大气掩星弯曲角反演的影响。根据 GNSS 卫星钟短期噪声分析结果可以看出,GNSS 各系统卫星钟短期内主要受调频随机游走噪声、调频闪变噪声、调频白噪声的影响,单差 0.05 秒稳均在 10^{-10} 量级,秒稳可达 10^{-11} 量级。在 100 s 以内的稳定性随着平滑时间的增加而变好,最终在 100 s 处稳定性可以达到 10^{-12} 量级。横向来看,GNSS 各系统在相同平滑时间内不同卫星组合的单差钟差稳定性基本处于相同的量级,这为后续 BDS 在掩星等相关方面的研究提供了一定的参考。相较于 GPS 系统及 GLO-NASS 系统而言,2012 年发射的 BDS MEO 卫星原子钟短期稳定性较好,从而验证 BDS 掩星数据处理过程中星间单差模式的可行性,同时在低轨卫星接收机钟性能允许的情况下,甚至可以考虑非差模式实现掩星数据处理。

参 考 文 献

[1] Guo Hairong. Study on the Analysis Theories and Algorithms of the Time and Frequency Characterization for Atomic Clocks of Navigation Satellites [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2006(郭海荣.导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究[D].郑州:信息工程大学,2006)

[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] Mao Yue, Chen Jianpeng, Dai Wei, et al. Analysis of On-board Atomic Clock Stability Influences[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011,36(10):1 182-1 186(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):1 182-1 186)

[4] Luo Pan, Li Jianwen, Huang Hai, et al. Frequency Stability Analysis and Noise Identification of BD Satellite Clock[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2014,31(1):34-37(罗潘,李建文,黄海,等.北斗卫星钟稳定性分析及噪声识别[J].测绘科学技术学报,2014,31(1):34-37)

[5] Hauschild A, Montenbruck O, Steigenberger P. Short-term Analysis of GNSS Clocks[J]. *GPS Solution*, 2013,17:295-307

[6] Lou Yidong, Shi Chuang, Zhou Xiaoqing, et al. Realization and Analysis of GPS Precise Clock Products[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009,34(1):88-91(楼益栋,施闯,周小青.GPS 精密卫星钟差估计与分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2009,34(1):88-91)

[7] Collins J P. Assessment and Development of a Tropospheric Delay Model for Aircraft Users of the Global Positioning System[R]. Technical Report University of New Brunswick, Fredericton, Canada, 1999

[8] Mendes V B. Modeling the Neutral Atmosphere Propagation Delay in Radiometric Space Techniques [D]. Fredericton: University of New Brunswick, 1999

[9] Riley W J. Handbook of Frequency Stability Analysis[M]. Washington : Government Printing Office, 2008

[10] GPS Constellation Status [OL]. (2016-04-06). <http://www.navcen.uscg.gov/? Do = constellation-Status>

[11] Glonass Constellation Status [OL]. (2016-04-07). <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>

[12] Orbit Data and Resources on Active GNSS Satellites [OL].(2015-08).<http://gpsworld.com/the-almanac>

Comparison of GNSS Satellite Clock Stability Based on High Frequency Observations

LI Mingzhe¹ ZHANG Shaocheng^{1,2} HU Youjian¹ HOU Weizhen¹

1 China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In GNSS high-precision applications, transmit satellite clock stability is one of the core factors which can directly affect the data processing performance. In this paper, the short-term stabilities of GNSS clocks are investigated with 2 0 Hz dual - frequency ground - based observations . In date pro - (下转第 1503 页)

Sidereal Filtering Based on Sphere Multipath Stacking
and Its Application in PPP

WANG Yan¹ ZHANG Chuanding² HU Xiaogong³ ZHU Lingfeng²
FENG Wei² CHANG Zhiqiao²

- 1 Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China
- 2 Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China
- 3 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

Abstract: Sidereal filtering (SF) is applied to reducing the error of static station observation caused by multipath. However, SF based on observation domain has some problems when used for static precise point positioning (PPP). Hence, an adapted algorithm named sphere multipath stacking (SMPS) is proposed and applied to PPP. The process of SMPS algorithm and the statistical algorithm that choose the appropriate cell size are presented in this paper. The experiment result that utilizes the data from 10 IGS stations shows that SMPS algorithm can reduce the multipath error of GNSS carrier phase observation and the accuracy of 1-3 hours positioning result improves clearly. The positioning accuracy improvement ratios of E, N, U directions are 41.59%, 38.60%, and 36.96%, respectively.

Key words: multipath error; sidereal filtering; sphere multipath stacking (SMPS); precise point positioning (PPP); post-fit residuals

First author: WANG Yan, PhD candidate, specializes in the theories and methods of measurement data processing. E-mail: wanglyan.hi@163.com

Corresponding author: ZHANG Chuanding, PhD, professor. E-mail: 13607665382@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41374038, 41204022, 41274043.

.....
(上接第 1495 页)

cessing procedure, the receiver clock bias are removed with single difference between two satellites, and the night-time dual-frequency observations were used to form the ionosphere-free measurements to avoid the ionosphere delays. Thus, the troposphere delays are corrected with empirical model and mapping function for residual delays. The satellite clock bias are identified by Lag1 autocorrelation function, and the short-term stability of different GNSS satellite atomic clocks are analyzed with Allan deviation. The results show that the single-difference clock stability of GPS, GLONASS and BeiDou are almost on the same magnitude, which is about 10^{-10} degree on 0.05 second interval and 10^{-11} degree on 1 second interval. Thus, the single-different strategy can be validated for BeiDou radio occultation data processing.

Key words: GNSS clock bias; high frequency observation; short-term stability; Allan deviation; noise identification

First author: LI Mingzhe, postgraduate, specializes in GNSS radio occultation data processing. E-mail: limingzhe92@hotmail.com

Corresponding author: ZHANG Shaocheng, PhD, lecturer. E-mail: gnss.zsc@foxmail.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41504023; the State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics Funding, No. SKLGED2015-3-2-E; Fundamental Research Funds for the Central Universities, China University of Geosciences(Wuhan), No. CUGL150839.