

关于空基时间基准建立中频率驾驭算法的研究*

陈广耀¹⁾ 邢楠^{1,2)†}

(1)北京师范大学天文系, 100875, 北京; (2)上海市空间导航与定位技术重点实验室, 200030, 上海)

摘要 基于低轨导航增强星座建立空基时间基准时,需要指定不同于地面时间基准所建立的频率驾驭策略;围绕频率驾驭策略的选取,分别介绍了阻尼系数、反馈钟差或调频信息和模型预测控制(MPC)3种频率驾驭算法,利用仿真试验分析了它们的优缺点.结果表明:阻尼系数法调节频次低,适用于地面注参数的调节模式;反馈钟差或调频信息法调节频次高,适用于星载设备自主调节;模型预测控制法因其可调参数多,可以得到相对更高的频率稳定度,但操作方法相对复杂.几种算法均可通过适当调节流程以满足当前低轨卫星频率驾驭的精度要求.

关键词 卫星导航系统;频率驾驭算法;低轨增强;模型预测控制算法

中图分类号 TN967.1

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022358

0 引言

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)发展至今,已经成为一个遍及全球、惠及全民的基础设施,在国民经济建设和国防安全领域发挥着巨大作用.随着应用领域的扩展和用户需求的提升,仍需提升GNSS的服务性能,各国因此发展出了多种卫星导航增强系统.低轨卫星凭借其轨道高度低、地面接收信号强、运动速度高、卫星几何变化快等优势,既可以增强卫星导航信号及与中高轨卫星实现优势互补,又可以通过通信和导航系统融合,播发独立测距信号,实现备份的定位导航能力,已成为当前导航增强领域关注的热点,有望成为下一代导航系统发展的新增量^[1-3].

卫星导航系统的核心是高精度且统一的系统时间,以及系统内各节点与系统时间的精确同步.目前各GNSS时均由地面站建立和维持,但地面站受限于成本、环境等其他因素影响无法做到全球覆盖,同时地面站也会遭受自然损毁或人为破坏,这些都会导致GNSS一段时间的性能下降或瘫痪.为了保证卫星导航系统在脱离地面站后的一段时间内独立运行,需实现卫星星座自主导航;自主导航期间,卫星星座与导航系统失联,无法与导航系统时实现时间同步.为保证系统正常运行和服务性能,需要综合导航卫星上的星载原子钟建立空基时间基准^[4-5].目前,星载原子

钟除了铯钟、铷钟和氢钟主流选择,还包括冷原子微波钟和热原子光钟等新技术时钟^[6-9],新一代原子钟频率稳定性更高,可以提供更好的频率基准;激光星间链路的发展可大大提高卫星导航系统的星间测距精度与星间通信速率^[10-11];低轨卫星可作为移动监测站,实现对导航星座的全球跟踪覆盖.基于这些技术的发展,空基时间基准的建立越来越成熟.

为了维持低轨卫星原子钟与标准时间的的时间同步,需要利用频率驾驭算法.频率驾驭算法的本质是通过当前时刻施加调频量,用以减小下一时刻被驾驭对象相对于参考源的相位偏差和频率偏差,同时尽可能优化驾驭后时间尺度的频率稳定性^[12-14].驾驭方法与策略选择需通过技术研究和仿真分析确定,既要保证时间偏差达到指标要求,又不能破坏本地时间的频率稳定度.驾驭有开环和闭环2种方式:开环驾驭的核心是钟差预测,通过预测值调整被驾驭的时间尺度^[15];闭环驾驭的核心是反馈控制,要求观测量可以实时获取^[16].

本文利用仿真试验,分别得到了阻尼系数^[17]、反馈钟差或调频信息和模型预测控制(model predictive control, MPC)3种频率驾驭算法^[18]的驾驭结果,并分析其异同,讨论这几种算法的应用范围.

1 阻尼系数法

用一个状态方程描述被驾驭对象与参考源时标

* 国家自然科学基金资助项目(12021003)

† 通信作者:邢楠(1985—),女,副教授,博士,硕士生导师.研究方向:精密定轨与卫星导航. E-mail: xingnan@bnu.edu.cn

收稿日期:2022-12-26

的相位偏差、频率偏差、频率漂移与施加的频率调整之间的关系为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t+1) = \begin{pmatrix} 1 & \tau & 0.5\tau^2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{x}(t) + \begin{pmatrix} \tau \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot u(t) + \xi(t), \\ \mathbf{x}(t) = \begin{pmatrix} p(t) \\ y(t) \\ d(t) \end{pmatrix}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}(t)$ 表示 t 时刻的状态变量,包括相位偏差 $p(t)$ 、频率偏差 $y(t)$ 和频率漂移 $d(t)$; $u(t)$ 表示频率调整量; $\xi(t)$ 表示系统噪声; τ 为驾驭时间间隔。

对阻尼系数法的频率调整量进行设置,

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) = -\frac{p(t)}{\tau \cdot D} - y(t) - 0.5\tau \cdot d(t), \quad (2)$$

式中: u_2 表示频率偏差的改正,在一个调整周期内,当前时刻的频偏会被完全补偿掉; u_1 表示相位偏差的改正,不考虑噪声影响,频率偏差已经被 u_2 完全补偿, u_1 引入了附加的频率偏差,会在下一时刻相位偏差减小到0后继续增加相位偏差,因此需设置阻尼系数 D 来减小系统的震荡; u_3 表示频率漂移的改正.同时可以设定调频量的阈值,以避免过大的调整量破坏驾驭对象的频率稳定度。

利用当前星载氢钟性能仿真得到被驾驭钟.假设参考钟相位偏差为0,仿真钟初始相位偏差为10 ns,初始频偏为 $3 \times 10^{-14} \text{ ns} \cdot \text{s}^{-1}$,相位偏差阈值设为 $\pm 20 \text{ ns}$,频率调整量阈值设为 $\pm 1 \times 10^{-14} \text{ s} \cdot \text{s}^{-1}$,数据间隔为30 s,共生成200 d数据。

阻尼系数 D 对驾驭时长和频率稳定度都有较大影响,具体表现为: D 值越大驾驭的持续时间越长,驾驭间隔越长,驾驭后频率稳定度更好.本文尝试了多个阻尼系数,其中 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$ 都是较合适的量级,在本次试验中,阻尼系数 D 设为 1×10^5 ,驾驭结果如图1所示。

由图1可见:仿真钟在经过约4 d到达阈值20 ns,然后开始频率驾驭,驾驭持续时间约7 min,随后仿真钟自由运行,直至下一次达到阈值;共6次频率驾驭,驾驭时间间隔分别为17、37、22、57和48 d,呈现逐渐增加趋势;驾驭持续时间分别为7、11、20、38、3和15 min,也有逐渐增加的趋势.驾驭后时钟的中长期频率稳定度变差,短期频率稳定度略优。

从结果看,阻尼系数法以设置阈值为界,以相位偏差为导向,当相位偏差超过阈值时进行驾驭,此时

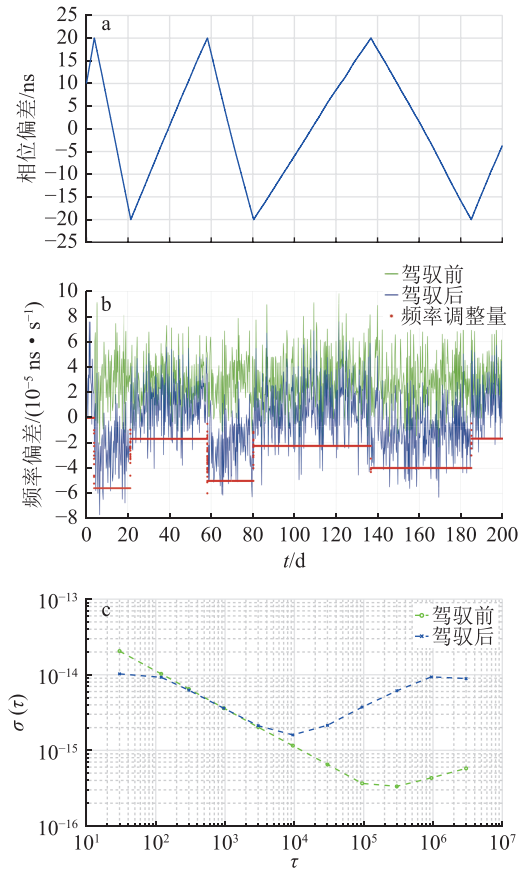


图1 阻尼系数法驾驭后相位偏差(a)、频偏调整量(b)和Allan偏差(c)

驾驭后频率偏差在0左右波动,并逐渐靠近0,这也导致了驾驭时间间隔呈逐渐增加的趋势。

2 反馈钟差或调频信息法

反馈钟差和调频信息法可分为反馈频率调整量和反馈钟差测量。

2.1 反馈频率调整量 反馈频率调整量方法是假定初始频率准确度调整至一定范围内,地面系统计算星地钟差,当钟差超过一定范围时,计算该时间段的平均频率偏差 f ,并反向调整,即

$$u = -a \cdot f, \quad (3)$$

式中 a 为调整系数,用以控制频率调整量.其对驾驭间隔和驾驭后频率稳定性的影响没有明显的线性关系,且这种影响并不是很大.其选值在0.1~5.0之间,过大或过小的值对结果的影响不再明显.具体值的选择应视时差数据和驾驭需求的情况而定,在本次试验中设置为0.5。

本文利用与第1章相同的仿真钟进行驾驭,相位偏差阈值仍为 $\pm 20 \text{ ns}$,频率调整量阈值仍为 $\pm 1 \times 10^{-14} \text{ s} \cdot \text{s}^{-1}$,调整系数 a 设为0.5,驾驭结果如图2所示。

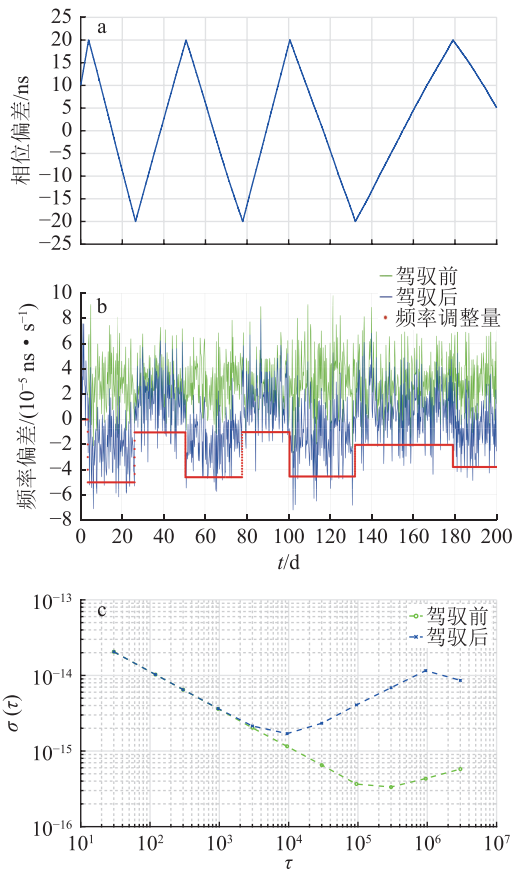


图 2 反馈频率调整量方法驾驭后相位偏差(a)、频偏调整量(b)和 Allan 偏差(c)

由图 2 可见: 仿真钟经过约 4 d 到达阈值 20 ns, 然后开始频率驾驭, 频率驾驭持续时间约 3 min, 随后仿真钟自由运行, 直至达到下一次阈值; 共 7 次频率驾驭, 驾驭时间间隔分别为 22、24、22、23、32 和 47 d, 呈现逐渐增加趋势; 驾驭持续时间分别为 3、3、15、8、30、9 和 37 min, 也呈现逐渐增加趋势. 频率稳定度用 Allan 偏差来评估, 驾驭后时钟短期频率稳定度不变, 中长期频率稳定度变差.

从结果来看, 反馈频率调整量与阻尼系数法类似, 但概念更加简单, 依然以阈值为界, 以相位偏差为导向, 当相位偏差超过阈值时进行频率驾驭, 驾驭后频率在 0 左右波动, 并逐渐靠近 0, 也导致驾驭时间间隔呈增加趋势.

2.2 反馈钟差测量 反馈钟差测量方法由地面系统计算星地钟差, 并按固定时间间隔 T 进行反馈; 星上时频处理单元综合星钟性能, 调整时频输出信号频率, 频率调整量为

$$u = -\frac{p(t) - p(t-T)}{T}. \quad (4)$$

依然利用与第 2 章相同的仿真钟进行驾驭, 此次不设置相位偏差阈值, 频率调整量阈值仍为 $\pm 1 \times 10^{-14}$

$s \cdot s^{-1}$, 反馈时间间隔 T 设为 1 d, 驾驭结果如图 3 所示.

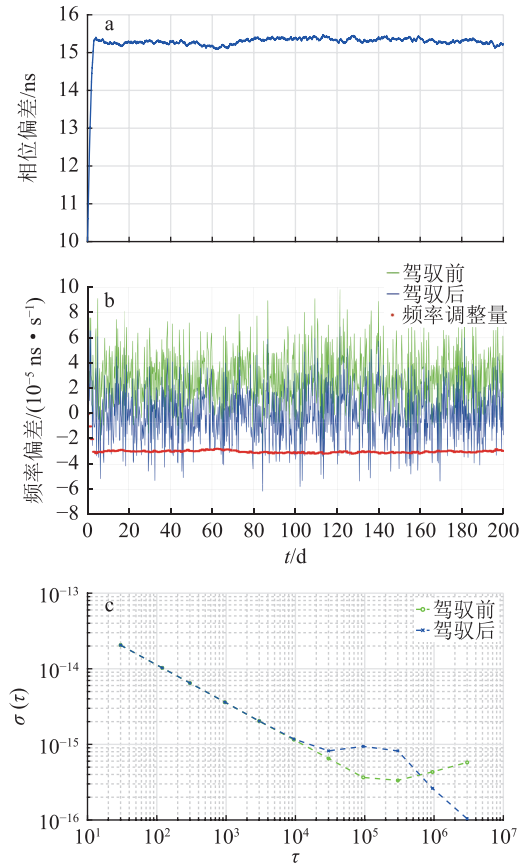


图 3 反馈钟差测量方法驾驭后相位偏差(a)、频偏调整量(b)和 Allan 偏差(c)

由图 3 可见: 仿真钟相位约经过 3 d 的增长, 到达稳定状态, 并在 0.5 ns 内波动; 频率经过 3 d 的调整, 也达到稳定状态, 并在 0 附近波动; 驾驭后的时钟中短期频率稳定度不变, 长期频率稳定度呈现先变差后变好的趋势.

与反馈频率调整量方法不同, 反馈钟差测量并没有设置阈值, 而是按照固定时间间隔进行钟差反馈, 并进行频率调整, 结果是将频率调整至 0 附近, 相位偏差也达到稳定状态, 约为 15 ns, 这是初始相位偏差、初始频偏、反馈时间间隔和频率调整量上限共同作用的结果. 该方法无法有效控制驾驭后的相位偏差, 需要人为给定合适的初始状态, 以达到最好的驾驭结果.

3 模型预测控制算法

模型预测控制算法主要由 3 部分组成.

1) 模型预测. 预测控制的本质是在对过程未来行为进行预测的基础上, 对控制量加以优化, 而预测是基于被控对象的模型来完成的.

2) 滚动优化. 预测控制的优化是在从当前时刻

到未来一段时间内,通过对某一个性能指标函数的最优化,计算这段时间内需要施加的一系列控制量.然而这些控制量并不是按照计算结果逐个施加的,而是每次只施加当前的控制量.在下次优化时,需要根据系统当前的状态重新进行优化.因此它是在线反复进行的.

3) 反馈校正. 预测算法是一种闭环控制算法. 用预测模型预测系统未来的输出, 预测值与真实值存在一定的偏差, 如果充分利用实际输出误差来进行反馈校正, 就能达到更进一步的控制效果^[19-21].

模型预测控制算法的具体过程如下:

设当前时刻为 k , 算法的预测时域为 $k \sim k+p$, 而控制时域为 $k \sim k+m$, 在控制时域内, 可以由算法自由地控制变量, 时刻 $k+m$ 以后, 控制变量保持其最后值不变; 在控制时域内, 算法选择不同的控制序列, 根据模型预测的输出, 得到性能指标函数的值. 算法的目的是选择最优的一组控制序列 $u(k), \dots, u(k+m)$, 使得性能指标函数的值最优或最小. 同时, 性能指标函数也反映了预测的系统输出与期望的系统输出之间的一致性, 所以该算法在保证性能指标函数最优的同时, 也使系统向期望的输出曲线逼近.

在计算获得一组控制序列 $u(k|k), \dots, u(k+m|k)$ 后, 在当前时刻施加计算结果 $u(k|k)$. 当下一次控制时刻 $k+1$ 来临时, 并不施加 $u(k+1|k)$, 而是在新的时刻重复上一次的算法, 此时预测时域为 $k+1, \dots, k+p+1$, 控制时域为 $k+1, \dots, k+m+1$, 计算结束后向系统施加控制变量 $u(k+1|k+1)$. 模型预测控制算法的这种滚动优化模式能够有效避免因模型与实际控制对象不匹配而导致的偏差积累对控制效果的影响. 模型与系统之间的偏差被立即反馈给算法, 从而不会随着时间的积累而变大.

在频率驾取中, 模型预测控制算法可以归结为带约束的二次优化问题.

$$\min J = \sum_{t=k}^{k+p} [x^T(t)W_Q x(t) + u^T(t)W_R u(t)], \quad (5)$$

约束条件为

$$\begin{cases} x(t+1) = \begin{pmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot x(t) + \begin{pmatrix} \tau \\ 1 \end{pmatrix} \cdot u(t), \\ x(k) = x_0, \\ u(k+m) = u(k+m+1) = \dots = u(k+p), \\ |u| \leq u_m. \end{cases} \quad (6)$$

式(5)为性能指标函数. 式中: W_Q 是状态变量权重矩阵; W_R 是控制量权重矩阵. 式(6)中: p 为预测时间范

围; τ 为频率驾取间隔; x_0 为当前时刻状态变量值; u_m 为频率调整量上限. 使用求解器对式(5)求解, 获得一组 $u(k|k), \dots, u(k|k+m)$. 将 $u(k|k)$ 施加于实际的系统. 至此完成了当前时刻的预测控制任务.

在模型预测控制中选择一个涵盖整个系统动态的预测范围, 时间过短则系统来不及反应, 时间过长会浪费计算量, 10 d左右是较合适的范围. 对自由控制时间范围而言, 控制范围越小, 计算量越小, 控制范围增加, 可以获得更好的预测, 但会增加复杂性, 而通常只有前几步控制动作会对预测的输出产生重大影响, 因此控制范围的选择最好设置为预测范围的10%~20%. 对于权重矩阵, 矩阵中的参数是对应变量在代价函数中的权重, 权重越大, 对代价函数的影响越大, 权重大的参数在优化后与设定值之间的差更小. 在频率驾取中, 本文更倾向于优化频率, 所以频率的权重值大于相位的权重值, 即 $W_Q(2,2) > W_Q(1,1)$, 同时希望控制过程更加平稳, 则研究还要控制相对权重, 即保证控制变量与状态变量的平衡.

利用与第2章相同的仿真钟进行驾取, 频率驾取间隔 τ 为1 d, 状态变量权重为

$$W_Q = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \times 10^{10} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

控制变量权重为

$$W_R = 1 \times 10^9. \quad (8)$$

预测时间范围为7 d, 自由控制时间范围为1 d, 驾取结果如图4所示.

由图4可见: 仿真钟相位偏差经过先增加后减小的趋势, 最后达到稳定状态, 历时约25 d; 相位偏差稳定在3 ns以内, 频率偏差稳定在0附近; 驾取后的时钟中短期频率稳定度不变, 长期频率稳定度变差.

与反馈钟差测量类似, 模型预测控制算法将频率调整至0附近, 从而使相位偏差达到稳定状态, 同时算法的滚动优化模式使得仿真钟时差向参考钟逼近, 因此也使被驾取钟与参考钟偏差控制在一定范围内, 这样既保证了频率的稳定性, 也使得被驾取钟与参考钟的相位偏差和频率偏差尽可能小.

4 算法分析

各算法结果对比如表1所示.

阻尼系数法概念较简单, 其可调参数阻尼系数 D 对驾取时长和频率稳定度都有较大影响, 具体表现为: D 值越大, 驾取的持续时间越长, 驾取间隔越长, 驾取后频率稳定度更好; 驾取时间间隔长, 驾取持续

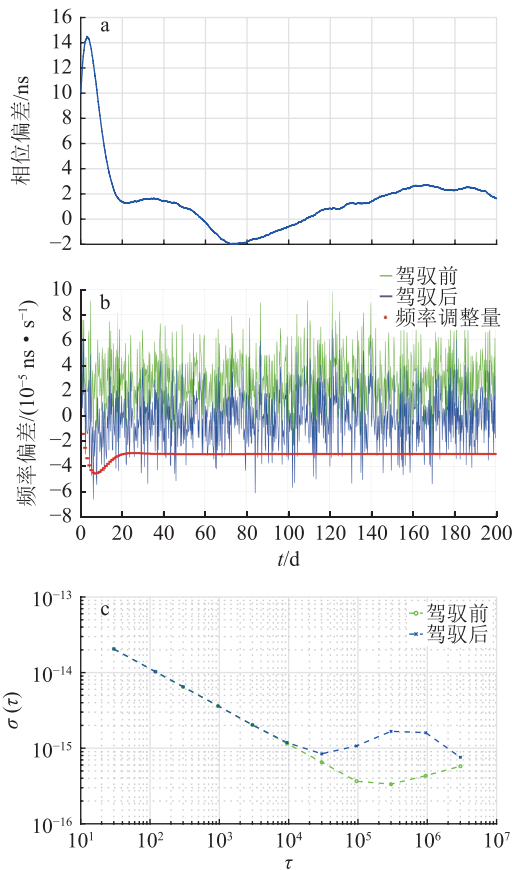


图 4 模型预测控制算法驾驭后相位偏差(a)、频偏调整量(b)和 Allan 偏差(c)

表 1 各驾驭算法结果

项目	阻尼系数法	反馈频率调整量	反馈钟差测量	模型预测控制算法
驾驭时间间隔/d	17~57	22~47	—	—
驾驭持续时间/min	3~38	3~37	—	—
驾驭 Allan 方差/ $10^{-15} (\tau = 1 \text{ d})$	3.558	3.883	8.488	1.014
驾驭后相位偏差范围/ns	± 20	± 20	—	± 3

时间短,调节频次低,适合于地面注参数的调节模式。

反馈钟差或调频信息法概念简单,操作方便,计算量小,其中反馈频率调整量与阻尼系数法类似,但更加简单直接,驾驭结果比阻尼系数法略差;反馈钟差测量方法驾驭频次高,驾驭后频率稳定度好,但是需人为控制相位偏差,在将其稳定状态调整至合适的范围后,应用于星载设备的自主调节。

模型预测控制算法概念较复杂,计算量较大,可调参数多,其控制结果好,既可以调节频率偏差至稳定状态,又可以保证与参考钟相位偏差在一定范围内,同时驾驭后频率稳定性高,利于在不同控制目标之间做微调,可用于星载设备的自主调节,但对星载

设备性能有较高的要求。

当前 GNSS 星载钟时间稳定度在 $1 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-15}$ 量级^[22-23],几种算法驾驭后时差的时间稳定度可以达到 $1 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-16}$ 量级,均优于当前星载原子钟的频率稳定度。而世界各国^[24-25]守时实验室产生的协调世界时的物理实现,如中国科学院国家授时中心产生和维持的 UTC(NTSC)、美国标准技术研究院产生和维持的 UTC(NIST)等的时间偏差范围为 $\pm 20 \text{ ns}$,相对频率偏差为 3×10^{-14} 。几种算法均能达到当前标准,其中阻尼系数法和反馈频率调整量可以设置更小的阈值,以获得更小的时间偏差,反馈钟差测量稳定后的时间偏差可达到 1 ns ,模型预测控制算法驾驭后时间偏差可达到 3 ns ,均好于当前标准。

5 结束语

本文介绍了阻尼系数法、反馈钟差或调频信息法和模型预测控制算法的概念,并利用仿真实验得到几种算法的驾驭结果。结果表明:阻尼系数法以相位偏差为导向,调节频次低,适用于地面注参数的调节模式;反馈钟差或调频信息法概念简单,计算量小,分为反馈频率调整量法和反馈钟差测量法,前者驾驭结果相对较差,调整频次低,后者驾驭结果好,但无法控制相位偏差调整,需人为调整初始状态,以此达到更好的控制结果,调整频次高,适用于星载设备自主调节;模型预测控制算法概念较复杂,可调参数多,计算量大,驾驭结果好,频率稳定度高,能同时满足相位偏差、频率偏差与参考钟差距小和驾驭后频率稳定度高的需求,调节频次高,适合星载设备自主操作,但对星载设备性能要求更高。

6 参考文献

- [1] 张小红,马福建.低轨导航增强GNSS发展综述[J].测绘学报,2019,48(9):1073
- [2] REID T G, NEISH A M, WALTER T F, et al. Leveraging commercial broadband LEO constellations for navigating [EB/OL]. [2022-11-22]. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=14729>
- [3] GIORGI G, SCHMIDT T D, TRAINOTTI C, et al. Advanced technologies for satellite navigation and geodesy[J]. Advances in Space Research, 2019, 64(6): 1256
- [4] 孙乐园.导航星座星间链路时间基准自主建立与维持[D].长沙:国防科技大学,2020
- [5] 王向磊,王国成.导航卫星自主时间基准建立与维持方法[C]//第七届中国卫星导航学术年会论文集:S06 原子钟与时频技术.长沙:中国卫星导航学术年会组委会,2016:12

- [6] REN W, LI T, QU Q Z, et al. Development of a space cold atom clock[J]. *National Science Review*, 2020, 7(12): 1828
- [7] BURT E A, YI L, TUCKER B, et al. JPL ultrastable trapped ion atomic frequency standards[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, 63(7): 1013
- [8] NEWMAN Z L, MAURICE V, DRAKE T, et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock[J]. *Optica*, 2019, 6(5): 680
- [9] ARPESI P, BELFI J, GIOIA M, et al. Rubidium pulsed optically pumped clock for space industry[C]//2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC). April 14-18, 2019, Orlando, FL, USA: IEEE, 2019: 1
- [10] 李锐, 林宝军, 刘迎春, 等. 激光星间链路发展综述: 现状、趋势、展望 [EB/OL]. (2022-08-11)[2022-12-10]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEV12pW9UrhTDCdPD64okkMeGkstDKWdxB0iAIuMsYOgYLSxXA8hXJxQFh7qAYezYmGECULZ&uniplatform=NZKPT>
- [11] MICHALAK G, GLASER S, NEUMAYER K H, et al. Precise orbit and Earth parameter determination supported by LEO satellites, inter-satellite links and synchronized clocks of a future GNSS[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(12): 4753
- [12] TAVELLA P. Statistical and mathematical tools for atomic clocks[J]. *Metrologia*, 2008, 45(6): S183
- [13] WHIBBERLEY P B, DAVIS J A, SHEMAR S L. Local representations of UTC in national laboratories[J]. *Metrologia*, 2011, 48(4): S154
- [14] 伍贻威. GNSS时间基准关键技术研究[J]. *测绘学报*, 2017, 46(4): 533
- [15] GORNAEVA L, KOSHELYAEVSKY N, ZAGIROVA E. UTC(SU) steering time scale current status and further improvements[C]//Proceedings of the 20th European Frequency and Time Forum. March 27-30, 2006, Braunschweig, Germany: IEEE, 2012: 486
- [16] KOPPANG P, LELAND R. Linear quadratic stochastic control of atomic hydrogen masers[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1999, 46(3): 517
- [17] 赵赟, 周明翔, 潘峰, 等. 基于阻尼系数控制算法的时间驾驭方法研究[J]. *宇航计测技术*, 2014, 34(3): 13
- [18] 赵书红, 董绍武, 白杉杉, 等. 一种优化的频率驾驭算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(5): 1457
- [19] 席裕庚, 李德伟, 林妹. 模型预测控制: 现状与挑战[J]. *自动化学报*, 2013, 39(3): 222
- [20] QIN S J, BADGWELL T A. A survey of industrial model predictive control technology[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(7): 733
- [21] MAYNE D Q, RAWLINGS J B, RAO C V, et al. Constrained model predictive control: stability and optimality[J]. *Automatica*, 2000, 36(6): 789
- [22] 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
- [23] 伏军胜, 贾小林, 刘家龙, 等. BDS-3卫星与其他GNSS系统卫星原子钟性能分析[J]. *真空与低温*, 2022, 28(5): 615
- [24] 董绍武, 王燕平, 武文俊, 等. 国际原子时及NTSC守时工作进展[J]. *时间频率学报*, 2018, 41(2): 73
- [25] 王莉萍, 徐亮. 时频计量体系守时系统与原子时算法[J]. *上海计量测试*, 2017, 44(5): 33

Research on frequency steering algorithm in satellite-based time reference establishment

CHEN Guangyao¹⁾ XING Nan^{1, 2)}

(1)Department of Astronomy, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2)Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, 200030, Shanghai, China)

Abstract Time reference established by navigation system needs to synchronize with ground time, which requires the use of frequency steering algorithm. Several frequency steering algorithms are examined in this paper, advantages and disadvantages of damping coefficient method, feedback clock difference measurement or frequency adjustment information method, and model predictive control (MPC) method are analyzed. The damping coefficient method has a low frequency of adjustment and is suitable for ground injection operation. Adjustment frequency of feedback clock difference or frequency adjustment information method is high, which is suitable for autonomous adjustment of space-borne equipment. The model predictive control algorithm has many adjustable parameters and can obtain higher frequency stability, but operation method is complicated. These algorithms can meet the requirement of frequency control accuracy of low orbit satellites by proper adjustments.

Keywords navigation satellite system; frequency steering algorithm; low earth orbit constellation augmentation; model predictive control algorithm

【责任编辑: 陆有忠】