

# 基于一致性时钟同步方法的天基时频同步网建模与仿真技术研究

余金照, 陈建云, 瞿智, 胡梅  
(国防科技大学 智能科学学院, 长沙 410073)

**摘要:** 以卫星网络为核心的天基信息网络是现代通信网络的主要发展方向, 卫星网络的高精度时频同步是天基信息网络正常运行的基础, 也是卫星应用研究必不可少的前提条件; 针对天基信息网络的时频同步问题, 对基于一致性时钟同步方法的天基时频同步网建模与仿真技术进行了研究, 通过相邻卫星节点建立的星间测量链路, 实现了高精度时钟同步; 进行了天基时频同步网建模与仿真系统的需求及功能组成的分析, 完成了卫星网络场景仿真以及一致性时钟同步方法的仿真, 仿真结果表明, 逻辑时钟的时间偏差优于 0.1 ns, 相对频率偏差优于  $1e-10$ , 时间间隔误差优于 0.1 ns, 时钟偏差优于 10 ps@1000 s, 阿伦方差优于  $1e-15@1$  h。

**关键词:** 一致性时钟同步; 卫星网络; 建模与仿真; 亚纳秒量级; 误差分析

## Research on Modeling and Simulation Technology of Space-based Time-frequency Synchronization Network Based on Consensus Clock Synchronization Method

SHE Jinzhao, CHEN Jianyun, QU Zhi, HU Mei

(College of Intelligent Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The space-based information network with satellite network as the core is the main development direction of modern communication network. The high-precision time-frequency synchronization of satellite network is the basis for the normal operation of space-based information network, and it is also an essential prerequisite for satellite application studies; Aiming at the time-frequency synchronization of space-based information network, the modeling and simulation technology of space-based time-frequency synchronization network based on consistent clock synchronization method is studied. Through the inter satellite measurement link established by the adjacent satellite nodes, the high-precision clock synchronization is achieved; The requirements and functional composition of the space-based time-frequency synchronization network modeling and simulation system are analyzed, and the satellite network scenario simulation and the simulation of the consistent clock synchronization method are realized; The simulation results show that the time error of logical clock is better than 0.1 ns, the relative frequency deviation is better than  $1e-10$ , the time interval error is better than 0.1 ns, the time deviation is better than 10 ps@1 000 s, and the Allen variance is better than  $1e-15@1$  h.

**Keywords:** consistent clock synchronization; satellite network; modeling and simulation; sub-nanosecond level; error analysis

## 0 引言

随着通讯技术和卫星信息技术的持续发展, 传统的地面有线和无线网络通信技术已经无法满足人类日益增长的信息获取和数据传输的需求。为了满足新时代信息服务需求, 弥补传统地面通信网络的不足, 世界主要航天国家都在大力发展以卫星网络为核心, 陆基、海基、空基网络有机连接成整体的天基信息网络。

为了从根本上解决天基信息系统覆盖能力有限、响应速度慢、体系协同能力弱的问题, 2017年, 中国工程院启动实施了“天基信息实时服务系统发展战略研究”项目, 该项目构建的天基信息实时服务系统(PNTRC, positioning, navigation, timing, remote sensing, communication)同时提供定位、导航、授时、遥感、通信服务, 为广大军民用户提供从卫星到智能终端的快速、准确、智能化、实时的天基信息服务<sup>[1-3]</sup>。

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-07-19。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62001491)。

作者简介: 余金照(1998-), 女, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要从事天基智能理论与技术方向的研究。

瞿智(1986-), 男, 湖北十堰人, 博士, 讲师, 主要从事卫星扩频应用、星群网络时频基准建立与维持等方向的研究。

胡梅(1982-), 女, 湖北天门人, 博士, 副教授, 主要从事空间仪器工程方向的研究。

通讯作者: 陈建云(1975-), 男, 江苏南京人, 博士, 研究员, 主要从事天基组网与精密测量、空间测控总体技术等方向的研究。

引用格式: 余金照, 陈建云, 瞿智, 等. 基于一致性时钟同步方法的天基时频同步网建模与仿真技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 228-234.

天基信息网络由不同轨道的多种类型卫星有机地组成, 是一体化的天基信息获取、传输与分发系统, 由于其轨道运行和组网特征, 在统一基准时间和基准坐标下实现所有网络卫星与地面指挥应用系统之间的时频同步, 是网络运行的基础。

作为天基信息网络的的核心组成部分, 卫星网络的时钟同步问题是众多学者的研究重点, 主要集中在全球卫星导航系统 (GNSS, global navigation satellite system) 与小卫星群领域。

在 GNSS 领域, 通常采用星间测量提升卫星定轨与时间同步性能。全球几大典型 GNSS, 在星间测距误差为厘米级时, 卫星网络时间同步能够达到纳秒级, 甚至亚纳秒级。全球定位系统 (GPS, global positioning system) 系统采用滤波方法, 利用全球监测站的伪距平滑数据在定轨的同时估计钟差参数<sup>[4-5]</sup>。格洛纳斯系统的地面监测站分布在俄罗斯境内, 较好地覆盖了 MEO 卫星, 可获得较高的精密定轨与时间同步处理结果<sup>[6]</sup>。伽利略 (Galileo) 系统由 GEO 卫星建立高精度时间基准, GEO 卫星与 MEO 卫星建立双向测量链路, 对 MEO 卫星进行时间同步<sup>[7]</sup>。当测距精度为厘米量级时, GPS<sup>[8]</sup>、Galileo<sup>[9]</sup> 和 BDS<sup>[10]</sup> 星间时间同步精度能够优于 0.3 ns, 卫星轨道精度能够优于 0.1 m。周善石等<sup>[11]</sup>综述了 BDS 系统精密定轨与时间同步方法, 指出导航星与低轨增强系统联合处理、降低导航星原子钟精度需求是未来导航系统的发展方向。

在小卫星群领域, P. Bolkosold 等<sup>[12]</sup>采用主从模式和参考广播同步算法估计从卫星间的时钟相位和频率偏差, 该方法假定 LEO 微小卫星簇的星间传输时延已经得到补偿。G. Li 等<sup>[13]</sup>研究了星间双向测距与时间同步技术, 针对 200 km 范围内的星群进行了仿真分析, 经过星间链式传递实现星群时间同步精度为 10 ns。蔚保国等<sup>[14]</sup>考虑卫星网络拓扑动态变化, 提出了空间信息网络拓扑聚合图模型, 以此降低时间同步过程中的路由筛选与建链次数。J. Xu 等<sup>[15]</sup>针对星间双向传输路径对称的小卫星簇, 设计了紧凑时差补偿系统来实现主从卫星间时钟同步, 时间同步精度达到 102 ps, 频率同步误差为 0.36 Hz。由此可见, 目前小卫星群网络时钟同步大多采用主从结构进行时频传递, 网络构型规模较小, 网络拓扑结构简单并且变化较小。

但是, 天基信息网络中节点如卫星网络节点、地面移动设备等是随着时间不断移动变化的, 这种变化给天基信息网络的时间同步造成了巨大的困难<sup>[16]</sup>。此外, 整个网络的环境也是复杂多变的, 对网络时频同步来说是一大挑战。因此, 面向高动态和复杂的网络时空行为环境, 如何为天基信息网络中的高动态多节点提供统一的高精度时空基准, 是构建优越的天基信息网络必须解决的问题。

本文重点研究基于一致性时钟同步方法的天基时频同步网建模与仿真技术。构建了天基时频同步网时钟模型, 介绍了一致性时钟同步方法的原理和流程; 分析了天基时频同步网建模与仿真系统的需求和功能组成; 给出了系统

的总体流程, 描述了卫星网络场景仿真以及一致性时钟同步方法的实现步骤; 最后展示了软件设计界面以及天基时频同步网的仿真结果。

## 1 天基时频同步网的一致性时钟同步方法

### 1.1 天基时频同步网时钟模型

天基时频同步网中每个卫星节点均配备一个高稳晶振或原子钟, 本文将时钟的真实时间特性建模为线性时钟模型, 节点  $i$  在参考时间  $t$  时刻的物理时钟读数  $\tau_i(t)$  为:

$$\tau_i(t) = \alpha_i t + \beta_i + o(t) \quad (1)$$

其中:  $\alpha_i$  是时钟速率,  $\beta_i$  是时钟初始偏差,  $o(t)$  表示时钟读数的高阶小量, 对于高精度时钟在较短测量周期内可以忽略。

天基时频同步网一致性时钟同步算法的目标是将所有节点的物理时钟通过某种方式校正, 同步到一个虚拟参考时钟  $\bar{\tau}(t)$ :

$$\bar{\tau}(t) = \bar{\alpha} t + \bar{\beta} \quad (2)$$

其中:  $\bar{\alpha}$  是参考时钟速率,  $\bar{\beta}$  是参考时钟初始偏差。

对每个节点  $i$  的时钟读数进行线性变换, 得到修正的时钟读数, 即逻辑时钟读数  $\hat{\tau}_i(t)$ :

$$\hat{\tau}_i(t) = \hat{\alpha}_i(t)t + \hat{\beta}_i(t) = \alpha'_i \tau_i(t) + \beta'_i \quad (3)$$

其中:  $\hat{\alpha}_i$  是节点  $i$  逻辑时钟速率,  $\hat{\beta}_i$  是节点  $i$  逻辑时钟初始偏差,  $\alpha'_i$ 、 $\beta'_i$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  时钟的速率修正系数、初始偏差修正量。

将式 (1) 带入式 (3), 与式 (2) 比较, 可知天基时频同步网时钟同步需要使:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\alpha}_i(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \alpha'_i \alpha_i = \bar{\alpha} \quad (4)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\beta}_i(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [\alpha'_i \beta_i + \beta'_i] = \bar{\beta} \quad (5)$$

一致性时钟同步算法的目标, 即通过修正物理时钟速率和时钟初始偏差, 最终实现每个卫星节点的逻辑时钟速率和读数渐近收敛到同一个虚拟参考时钟<sup>[17]</sup>。

### 1.2 一致性时钟同步方法

天基时频同步网的一致性时钟同步方法在星历信息和星间网络拓扑的基础上建立星间双向测量链路。通过星间链路, 天基时频同步网周期性地星间测量, 在每次双向测量中, 每条星间链路可以获取 4 个测量时间戳。

由于卫星网络节点距离非常远且处于高速运动状态, 星间测量具有较大的误差, 需要通过历元归算进行消除。历元归算通常采用逐项补偿法和多项式插值法, 文献 [18] 通过仿真证明: 当数据采样间隔不大于 5 分钟时, 选取合适的插值阶数时, 使用多项式插值法可以得到优于 1 mm 的历元归算精度。对于一致性时钟同步方法, 通过历元归算可以将星间测量时间戳归算到基于参考时钟的约定发送时刻, 精度可以保证在 0.1 ns 以内。

经过历元归算得到的星间测量时间戳和两次测量间卫星相对运动导致的时差补偿量是一致性时钟同步方法的输入。该方法主要分为三个部分: 相对速率估计、时钟速率同步、时钟相位同步。首先, 利用连续两次获得的星间测量时间戳, 估计节点  $j$  相对于节点  $i$  的相对时钟速率  $\hat{\alpha}_{ij}$ 。其

次, 天基时频同步网中的每个卫星节点时钟利用所有相邻卫星节点的时钟相对速率, 通过动态一致性估计器, 估计时钟速率修正系数  $\alpha'_i(t_k)$ 。然后, 利用时钟速率更新时钟读数, 再通过相邻节点时钟读数的加权平均补偿修正本节点时钟读数  $\hat{\tau}_i(t_k)$ 。最后, 通过判断时钟读数同步误差是否超过阈值, 判断同步算法是否收敛, 若误差较大则重复进行上述步骤迭代更新时钟参数, 若误差在一定范围内表明同步算法收敛可以输出时钟同步结果。该方法主要分为三个部分: 相对速率估计、时钟速率同步、时钟相位同步。算法流程如下。

天基时频同步网的一致性时钟同步方法:

输入: 星间测量时间戳

$$\{\tau_{i,1}(t_k), \tau_{j,1}(t_{k-1}), \tau_{j,2}(t_k), \tau_{i,2}(t_{k-1})\}$$

相对运动时差补偿量  $\Delta\tau_{i,2}(t_k)$

输出: 相对时钟速率  $\hat{\alpha}_{ij}(t_k)$ 、逻辑时钟速率  $\hat{\alpha}_i(t_k)$ 、逻辑时钟读数  $\hat{\tau}_i(t_k)$

1) 初始化。

$$\text{初始化 } \hat{\alpha}_{ij}(0) = 1, \hat{\alpha}_i(0) = 1, \omega_i(0) = 1$$

2) 更新相对时钟速率  $\hat{\alpha}_{ij}(t_k)$ :

$$\hat{\alpha}_{ij}(t_k) = \hat{\alpha}_{ij}(t_{k-1}) + (1 - \rho) \frac{\tau_{j,1}(t_k) - \tau_{j,1}(t_{k-1})}{\tau_{i,2}(t_k) - \tau_{i,2}(t_{k-1}) + \Delta\tau_{i,2}(t_k)} \quad (6)$$

3) 更新逻辑时钟速率修正系数  $\alpha'_i(t_k)$ :

$$\alpha'_i(t_k) = \alpha'_i(t_{k-1}) + T\gamma(1 - \alpha'_i(t_{k-1})) + TK_i \sum_{j \in N_i} (\omega_j(t_k) - \omega_j(t_k) \hat{\alpha}_{ij}(t_k)) - TK_p \sum_{j \in N_i} (\alpha'_i(t_k) - \alpha'_j(t_k) \hat{\alpha}_{ij}(t_k)) \quad (7)$$

$$\omega_i(t_k) = \omega_i(t_{k-1}) - TK_i \sum_{j \in N_i} (\alpha'_i(t_k) - \alpha'_j(t_k) \hat{\alpha}_{ij}(t_k)) \quad (8)$$

4) 更新逻辑时钟读数  $\hat{\tau}_i(t_k)$ 。

$$\hat{\tau}_i(t_k) = \hat{\tau}_i(t_{k-1}) + \alpha'_i[\tau_i(t_k) - \tau_i(t_{k-1})] \quad (9)$$

其中:  $T$  是两节点间多次测量的周期间隔,  $t_k$  分别表示第  $k$  次测量的参考时间,  $\rho$  是 IIR 滤波器系数,  $\gamma$ 、 $K_i$ 、 $K_p$  分别表示分布式控制器参数、比例估计器的增益参数、积分估计器的增益参数,  $N_i$  是与节点  $i$  建链测量的临接节点集合,  $\omega_i$  表示 PI 控制器状态参数。

## 2 天基时频同步网建模与仿真系统软件设计

### 2.1 系统需求分析

天基时频同步网建模与仿真系统主要完成卫星网络场景的模拟、主要误差的建模以及卫星网络节点间的时间同步, 在此基础上, 软件需具备的主要功能如下。

1) 软件控制界面。

软件控制界面完成对天基时频同步网建模与仿真系统的控制管理, 用户通过软件控制界面可顺利实现天基时频同步的整体流程, 不同界面之间可以相互切换, 通过软件控制界面, 可以实现函数调用、参数调整、按钮控制等功能, 可以实时显示天基时频同步网的仿真场景并对仿真结果进行可视化显示。

2) 参数设置与控制功能。

软件需具备对建模与仿真系统中的各项主要参数进行控制和调整的功能, 包括仿真场景参数的设置与控制, 卫星轨道参数的设置与控制, 时钟模型参数的设置与控制、主要误差模型参数的设置与控制, 一致性时钟同步算法参数的设置与控制等。参数设置之后, 需便于修改与查看, 部分参数可以图表的形式显示在软件控制界面中。

3) 模型仿真与分析计算功能。

软件需具备模型仿真和数据计算分析功能。误差模型仿真功能: 软件能够模拟卫星钟差、测量误差、星历误差等主要误差, 可在软件中对各项误差的主要参数进行设置与调整。数据计算分析功能: 软件可以获取卫星位置与速度数据、可见性信息, 并据此进行星间测量时间戳的计算、历元归算以及一致性时间同步算法的仿真, 同时具备仿真结果分析功能。

4) 可视化功能。

软件需具备结果和数据可视化功能, 可显示卫星网络仿真的二维和三维场景、卫星网络拓扑动态变化、星间可见性、卫星时钟特性、一致性时钟同步结果及结果的误差分析。

### 2.2 系统功能组成

按照软件的工作原理, 将天基时频同步网建模与仿真系统分为三个部分: 仿真参数设置部分、仿真计算分析部分以及仿真结果显示部分, 天基时频同步网建模与仿真系统的功能组成如图 1 所示。

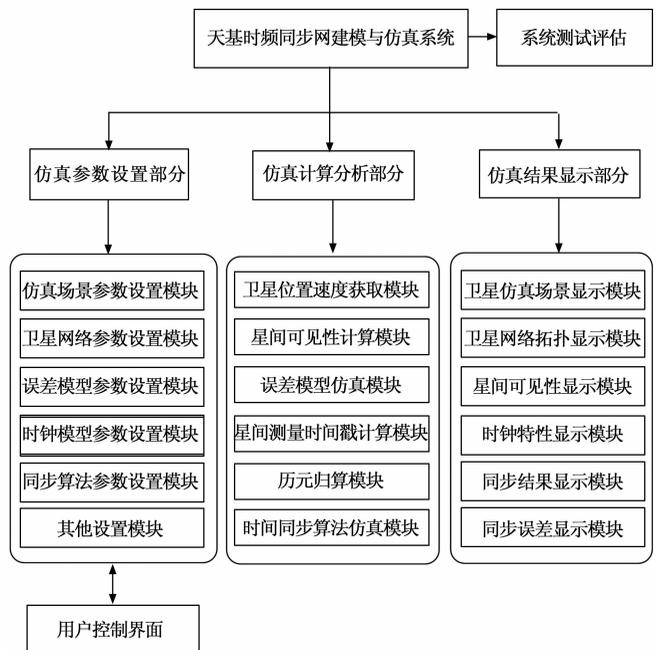


图 1 天基时频同步网建模与仿真系统功能组成

1) 仿真参数设置部分。

仿真参数设置部分包括仿真场景参数设置模块、卫星网络参数设置模块、时钟模型参数设置模块、误差模型参数设置模块、同步算法参数设置模块以及其他设置模块。

仿真场景参数设置模块用于设置仿真运行场景参数, 进行场景动画控制; 卫星网络参数设置模块用于设置卫星网络参数, 包括星座类型、卫星数量、轨道高度等参数; 时钟模型参数设置模块用于设置卫星时钟模型参数, 包括时钟速率、时钟初始偏差以及相噪时间抖动等参数; 误差模型参数设置模块用于设置测量误差影响参数, 设置卫星节点的位置误差和速度误差; 同步算法参数设置模块用于设置同步算法的各项参数。

## 2) 仿真计算分析部分。

仿真计算分析部分包括卫星位置速度获取模块、星间可见性计算模块、误差模型仿真模块、星间测量时间戳计算模块、历元归算模块以及时间同步算法仿真模块。

卫星位置计算模块采用通用卫星分析工具 (STK, satellite tool kit) 中获取的卫星轨道数据, 进行多项式插值, 推算出观测时刻卫星的位置与速度; 星间可见性计算模块获取通过 STK 计算得到的卫星可见性数据, 求取可见性矩阵, 用于卫星网络动态拓扑显示、星间可见性显示以及后续时间同步过程中; 误差模型仿真模块对主要误差源如测量误差、星历误差进行仿真; 星间测量时间戳计算模块建立双向测量链路, 根据卫星的位置速度和卫星节点时钟信息, 迭代计算伪距, 获得星间测量时间戳和卫星网络节点之间的传输时延; 历元归算模块用于消除由于远距离测量和卫星高速运动导致的星间测量误差; 时间同步算法仿真模块利用卫星的坐标速度数据、可见性数据、卫星钟差和传输时延数据, 得到相对运动时差补偿量和星间测量时间戳, 采用一致性时间同步算法进行卫星网络节点间的时间同步。

## 3) 仿真结果显示部分。

仿真结果显示部分包括卫星仿真场景显示模块、卫星网络拓扑显示模块、星间可见性显示模块、时钟特性显示模块、同步结果和误差显示模块。

卫星仿真场景显示模块显示 STK 生成的卫星二维和三维场景, 可控制动画场景的缩放, 可通过按钮调整动画的速度、播放与暂停; 卫星网络拓扑显示模块显示生成的卫星网络在仿真时间内的动态拓扑变化, 卫星网络拓扑可选择全连接或是前后左右四条链连接; 星间可见性显示模块显示卫星之间随时间的可见性; 时钟特性显示模块可显示卫星节点本地时间偏差图, 以及每个节点的时钟参数; 同步结果显示模块显示时钟同步结果。

## 3 天基时频同步网建模与仿真系统软件实现

### 3.1 系统总体流程

本文采用 STK 和 MATLAB 联合仿真搭建天基时频同步网建模与仿真系统软件。

STK 是由美国 Analytical Graphics 公司开发的一款在航天领域处于领先地位的卫星系统分析软件。STK 支持航天任务的全过程, 包括设计、测试、发射、运行和任务应用。STK 具有分析功能、轨道生成功能、可见性分析功能、可视化计算结果功能, 可以为用户提供全面的数据报告。

STK/CON 为第三方应用程序提供了一个向 STK 发送

命令和接收 STK 数据的通信工具。CON 具有提供信息的功能, 可按用户规定的各种方式输出错误信息和诊断信息。MATLAB 和 STK 通过 CON 接口进行通信, 通过 CON 接口可以给 STK 发送连接命令和接收从 STK 返回的数据, 当通讯完成后关闭接口。系统总体流程如图 2 所示。

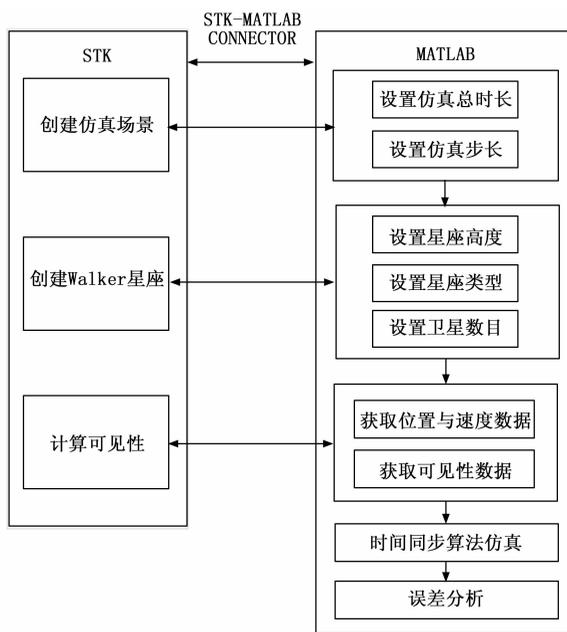


图 2 天基时频同步网建模与仿真整体流程

首先, 在 MATLAB 中设置仿真场景参数 (仿真场景的时间和步长等), 调用 STK 创建仿真场景并显示在 MATLAB GUI 界面中; 其次, 在 MATLAB 中设置卫星网络参数 (星座类型、轨道高度、卫星数目等), 在 STK 创建的仿真场景中创建 Walker 星座并显示; 然后, MATLAB 发送命令计算卫星可见性, STK 计算可见性并将位置速度以及可见性数据传到 MATLAB。最后, 利用上述步骤中获取的数据进行一致性时钟同步算法的仿真以及同步结果的误差分析。

### 3.2 卫星网络仿真场景的实现

卫星网络场景仿真的具体流程如图 3 所示, 由 MATLAB 和 STK 联合仿真实现, MATLAB 通过 STK/CON 模块向 STK 发送命令并接收 STK 生成的数据。

首先, 在 MATLAB GUI 界面中设置仿真开始时间、结束时间以及仿真步长等参数, 向 STK 发送创建场景的命令, 创建仿真场景并显示; 然后, 设置卫星的轨道高度和轨道倾角, 星座类型、轨道面数、每轨星数以及相位因子等卫星星座参数, 向 STK 发送创建 Walker 星座的命令, 生成卫星星座并显示在 GUI 界面中; 最后, STK 计算星间可见性, MATLAB 获取卫星的位置速度数据和可见性数据, 同时在 GUI 界面中可以显示卫星网络的动态拓扑变化和星间可见性。

### 3.3 卫星网络一致性时钟同步方法的实现

卫星网络一致性时钟同步方法流程如图 4。卫星时钟采用一阶时钟模型, 设置时钟标称频率、本地时钟速率、时

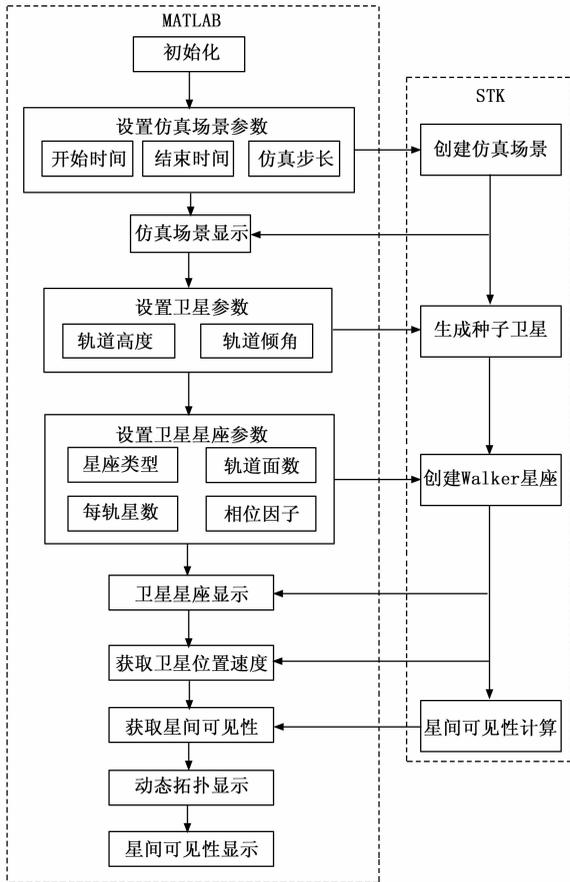


图 3 卫星网络场景仿真流程

钟初始偏差以及相噪时间抖动等时钟模型参数后，结合在卫星场景仿真时获取的卫星位置速度数据以及星间可见性矩阵，建立星间双向测量链路。

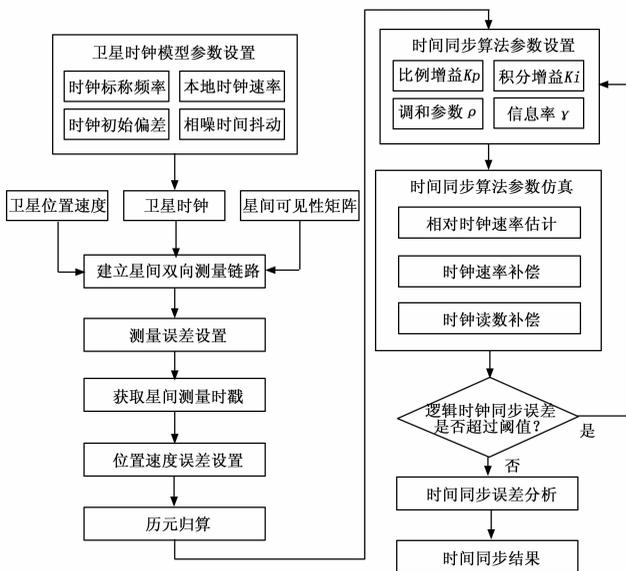


图 4 卫星网络一致性时钟同步方法流程

在星间双向测量链路中，接收节点的信号载噪比越大，时间测量精度越高。在高精度伪码测量中，一般选取比较

小的相关器间隔，那么信号载噪比与时间测量精度  $\sigma$  的关系<sup>[19]</sup>为：

$$\sigma = T_c \sqrt{\frac{B_n}{B_{fc} T_c \frac{C}{N_0}} \left( 1 + \frac{1}{T_{coh} \frac{C}{N_0}} \right)} \quad (10)$$

其中： $T_c$  是码片宽度， $B_n$  是码环噪声带宽， $T$  是积分清零时间， $B_{fc}$  是射频前端带宽， $T_{coh}$  是码环相干积分时间。

同时，接收信号载噪比与发射功率、星间距离等参数有关<sup>[20]</sup>：

$$\frac{C}{N_0} = \frac{P_R}{N_0} = P_T \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d)^2 k T L_A} \quad (11)$$

其中： $P_R$  是卫星天线口接收的信号功率， $P_T$  是卫星基带发射的信号功率， $G_T$ 、 $G_R$  分别是星间链路发射和接收天线的增益， $d$  是传播距离， $\lambda$  是信号波长， $k$  是玻尔兹曼常数， $T$  是热力学温度， $L_A$  是大气损耗。

根据式 (11) 设置测量误差的各项参数，添加测量误差，根据星间双向测量过程获取星间测量时间戳。设置卫星网络节点的位置速度误差之后，采用文献 [10] 中的方法进行历元归算，将经过历元归算得到的星间测量时间戳和相对运动时差补偿量作为一致性时钟同步算法的输入。

在 MATLAB GUI 界面，设置一致性时钟同步方法的主要参数，包括比例增益、积分增益、调和参数以及信息率。设置好参数之后，进行一致性时钟同步算法的仿真，依次为相对时钟速率估计、时钟速率补偿和时钟读数补偿。最后，通过判断逻辑时钟读数的同步误差是否超过阈值来判断同步算法是否收敛，若超过则调整算法参数，重复上述步骤，否则表明同步算法收敛，可以得到时间同步结果，进行时间同步误差分析并显示结果。

### 4 实验结果与分析

本文使用 MATLAB 与 STK 联合仿真搭建天基时频同步网建模与仿真系统，软件界面主要分为三个部分：卫星网络仿真场景、模型和算法参数设置以及天基时频同步网仿真结果。

#### 4.1 卫星网络仿真场景

卫星网络仿真场景由卫星网络仿真场景主界面、动态拓扑和星间可见性显示两个界面组成，如图 5、图 6 所示，卫星网络仿真场景主界面可进行仿真场景参数设置、卫星网络参数设置以及场景的动画控制。动态拓扑和星间可见性显示界面显示卫星网络的动态拓扑变化和星间可见性，星间拓扑可选择是全连接（可见即连接）还是每颗卫星只与前后左右四颗卫星建立星间测量链路。

#### 4.2 模型和算法参数设置

模型和算法参数设置由时钟模型参数设置界面和时钟同步算法参数设置界面组成，如图 7、图 8 所示，时钟模型参数设置界面可设置卫星网络节点一阶时钟模型的标称频率、实际相对频率、初始偏差以及相噪时间抖动，同时以表格的形式显示卫星时钟参数，并在坐标轴中显示节点的本地时间偏差。时钟同步算法参数设置界面可进行一致性

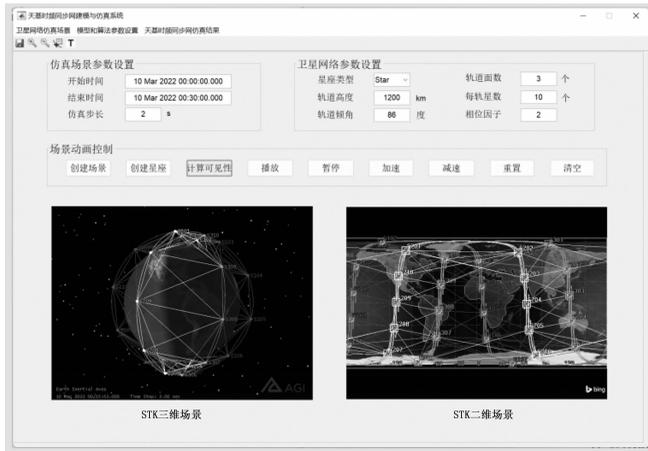


图 5 卫星网络仿真场景主界面

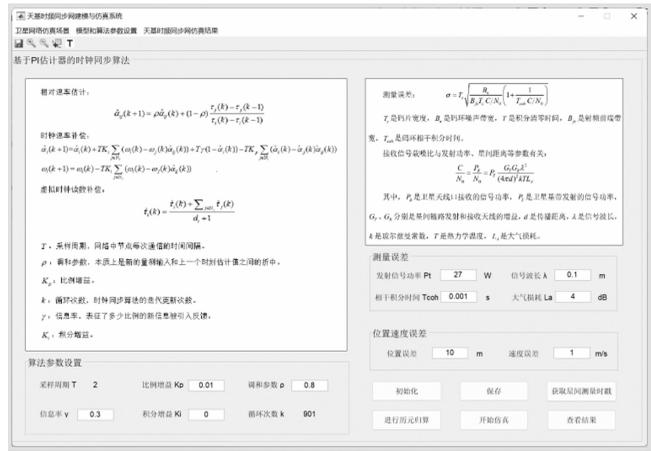


图 8 时钟同步算法参数设置界面

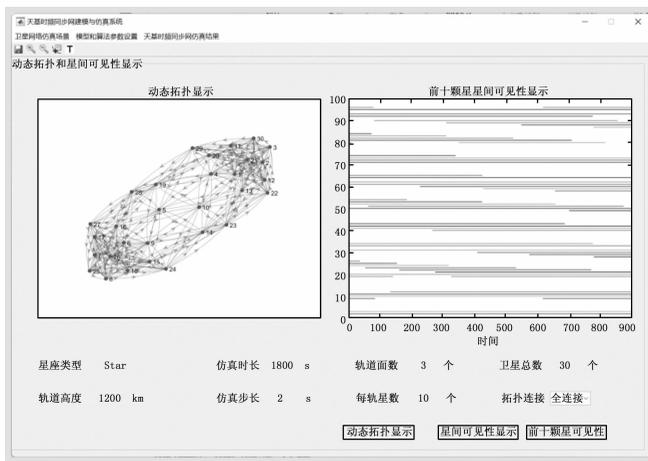


图 6 动态拓扑和星间可见性显示界面

时钟同步算法的参数设置、星间测量误差的参数设置、卫星位置速度误差设置以及仿真的操作控制。

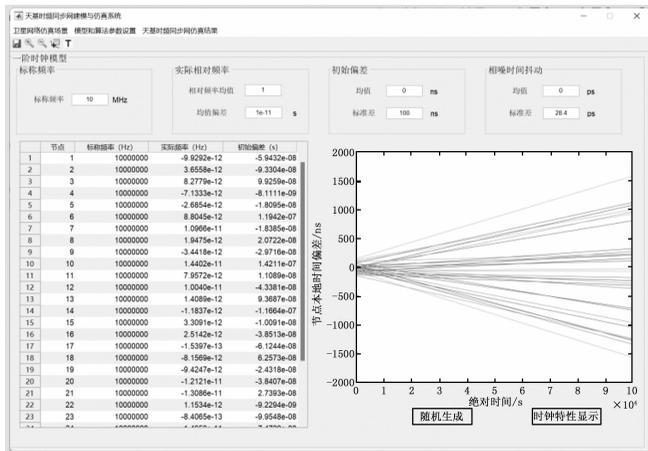


图 7 时钟模型参数设置界面

### 4.3 天基时频同步网仿真结果

天基时频同步网仿真结果由逻辑时钟相对速率偏差和时间偏差时钟界面、同步结果误差分析界面组成。本文对平均分布在 6 个轨道面的 60 颗卫星进行了仿真, 结果如图

9 所示, (a) 为逻辑时钟相对速率偏差和时间偏差 (TE, time error), (b) 分别为逻辑时钟的时间间隔误差 (TIE, time interval error)、TIE 轨迹、时钟间隔误差 (TDEV, time deviation) 和艾伦方差。

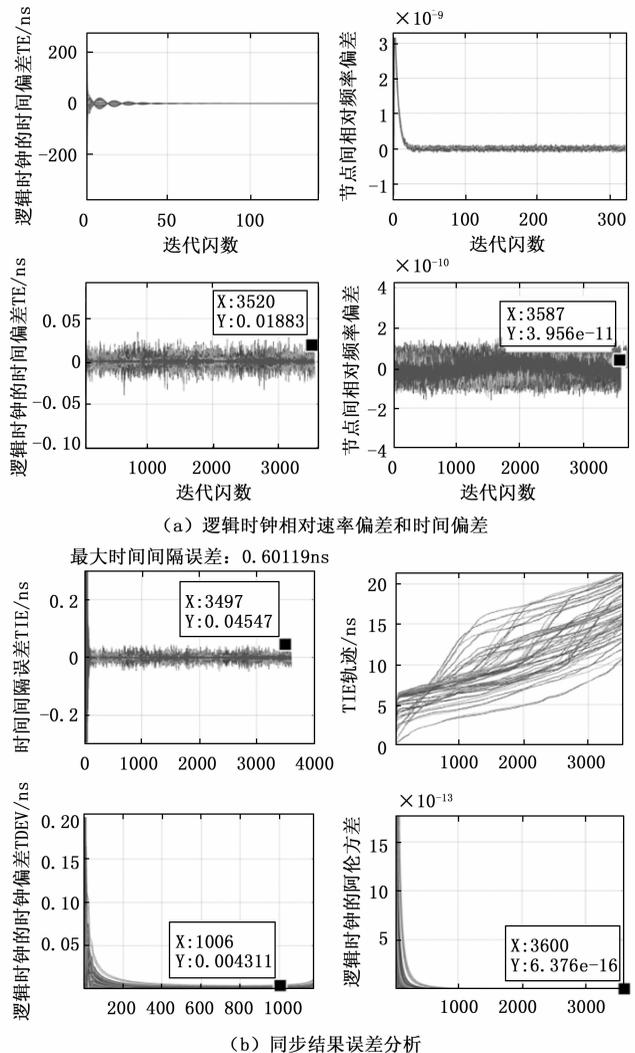


图 9 天基时频同步网仿真结果显示界面

由图 9 可知, 同步结果收敛后, 逻辑时钟的时间偏差小于 0.1 ns, 节点间的相对频率偏差优于  $1e-10$ , 时间间隔误差 TIE 优于 0.1 ns, 时钟偏差 TDEV 优于  $10 \text{ ps}@1\ 000 \text{ s}$ , 艾伦方差优于  $1e-15@1 \text{ h}$ 。

## 5 结束语

本文针对天基信息网络的高精度时频同步问题, 搭建了基于一致性时钟同步方法的天基时频同步网建模与仿真系统。该方法为每个卫星节点设置一个逻辑时钟, 通过相邻卫星节点间的星间测量链路, 采用一致性的时钟同步方法, 最终使每个节点逻辑时钟速率和读数的渐近收敛到同一个虚拟参考时钟。仿真结果表明, 该系统实现了 0.1 ns 量级的时钟同步, 满足天基时频同步网的需求。

### 参考文献:

- [1] 李德仁, 沈欣, 李迪龙, 等. 论军民融合的卫星通信、遥感、导航一体天基信息实时服务系统 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2017, 42 (11): 1501-5.
- [2] 李德仁. 论军民深度融合的通导遥一体化空天信息实时智能服务系统 [J]. 军民两用技术与产品, 2018, (15): 14-7.
- [3] 李德仁, 沈欣. 我国天基信息实时智能服务系统发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22 (2): 138-43.
- [4] TAYLOR J. The GPS operational control system Kalman filter description and history [C] //Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2010), 2010: 2329-2366.
- [5] BERTIGER W, BAR-SEVER Y, HARVEY N, et al. Next generation GPS ground control segment (OCX) navigation design [C] //Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2010). 2010: 964-977.
- [6] REVNIVYKH S. GLONASS status and progress [C] //Proc. ION GNSS. 2010: 609-633.
- [7] CHATRE E, VERHOEF P. Galileo programme status update [C] //Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018). 2018: 733-767.
- [8] MARTOCCIA D, BERNSTEIN H, CHAN Y, et al. GPS satellite timing performance using the autonomous navigation (autonav) [C] //Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1998). 1998: 1705-1712.
- [9] HAMMESFAHR J, HORNBOSTEL A, HAHN J, et al. Usage of Two-Directional Link Techniques for Determination of the Satellite State for GNSS-2 [C] //Proceedings of the 1999 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. 1999: 531-540.
- [10] 宋小勇. COMPASS 导航卫星定轨研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [11] 周善石, 胡小工, 刘利, 等. 导航卫星精密定轨与时间同步技术进展 [J]. 天文学报, 2019, 60 (4): 57-66.
- [12] UBOLKOSOLD P, KNEDLIK S, LOFFELD O. Clock synchronization protocol for distributed satellite networks [C] //Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS'05, IEEE, 2005, 1: 4.
- [13] GUN L, FEIJIANG H. Precise two way time synchronization for distributed satellite system [C] //2009 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22nd European Frequency and Time forum. IEEE, 2009: 1122-1126.
- [14] 蔚保国, 鲍亚川, 魏海涛. 面向时间同步业务的空间信息网络拓扑聚合图模型 [J]. 电子与信息学报, 2017, 39 (12): 2929-2936.
- [15] JIULING X U, CHAOJIE Z, CHUNHUI W, et al. Approach to inter-satellite time synchronization for micro-satellite cluster [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29 (4): 805-815.
- [16] 马久龙. 空间信息网络优化与抗毁性研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [17] QU Z, CHEN J, WU N. Consensus Clock Synchronization for Distributed Satellite System Based on Distributed PI Controller [C] //2021 IEEE 15th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). IEEE, 2021: 114-119.
- [18] 吕宏春, 卢晓春, 武建锋. 星间链路对地伪距观测量历元归算及分析 [J]. 时间频率学报, 2018, 41 (2): 103-110.
- [19] 李天文, 等. GPS 原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [20] 谢钢. GPS 原理与接收机设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [16] 陈立奇. 基于单片机的嵌入式多电机智能控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (5): 6.
- [17] 王青. 基于 PT100 的温度测控系统的设计与仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (9): 47-50, 56.
- [18] RIE TANABE, THAO T. P. NGUYEN, TAKAHIRO SUGIURA, et al. Bubble dynamics in metal nanoparticle formation by laser ablation in liquid studied through high-speed laser stroboscopic videography [J]. Applied Surface Science, 2015, 351: 327-331.
- [19] MATEVZ DULAR, TOMAZ POZAR, JURE ZEVNIK, et al. High speed observation of damage created by a collapse of a single cavitation bubble [J]. WEAR, 2019, 418: 13-23.
- [20] 林振钰, 张志杰, 刘佳琪. 基于 ZYNQ 的高清图像显示及检测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (2): 30-34.

(上接第 118 页)