



专题：空天地一体化通信技术

基于最大似然估计的低轨通信星座 分布式时间同步方法研究

闫冰¹, 赵亚飞¹, 方一鸣¹, 彭木根¹, 林广荣²

(1. 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876;
2. 银河航天科技(上海)有限公司, 上海 201101)

摘要: 随着低轨巨型星座的快速部署和卫星互联网的快速发展, 由大规模低地球轨道卫星组成的分布式卫星系统是空天地一体化的重要特点。在卫星网络中, 低成本、高精度的时间同步技术是其中的核心技术之一。针对低轨卫星高动态、拓扑结构时变特性因素影响下的低轨通信星座的分布式时间同步问题, 考虑低轨卫星场景下的通信时延特性, 同时为解决现有方法在动态网络拓扑下同步精度和收敛速度方面的不足, 提出了一种基于最大似然估计的低轨卫星时间同步方法, 能有效解决分布式动态网络中的通信时延随机不可预测以及星间距离不对称的问题。仿真结果表明, 低轨卫星动态场景和拓扑结构变化下, 本文提出的基于最大似然估计的时间同步方法同步误差均小于 5 ns。

关键词: 低轨卫星; 分布式卫星系统; 时间同步; 最大似然估计

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024161

Research on distributed time synchronization methods for LEO communication constellations based on maximum likelihood estimation

YAN Bing¹, ZHAO Yafei¹, FANG Yiming¹, PENG Mugen¹, LIN Guangrong²

1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
2. GalaxySpace Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201101, China

Abstract: As the rapid deployment of low earth orbit (LEO) mega-constellations and the swift growth of satellite Internet unfolds, distributed satellite systems composed of a large number of LEO satellites become a significant feature of the space-air-ground integrated networks. In satellite networks, low-cost, high-precision time synchronization technology is one of the core technologies. The distributed timing synchronization problem of LEO communication constellations, influenced by the high dynamics and temporally varying topological structures of low orbit satellites was focused on. Considering the communication delay characteristics in the LEO satellite scenario, and addressing the de-

iciencies in synchronization accuracy and convergence speed of existing methods in dynamic network topologies, a timing synchronization method based on maximum likelihood estimation for LEO satellites was proposed. This method effectively solves the problem of unpredictable random communication delays and asymmetric inter-satellite distances in distributed dynamic networks. The simulation results show that the synchronization error of the time synchronization method based on maximum likelihood estimation is less than 5 ns under the dynamic scenario and topology of LEO satellites.

Key words: low earth orbit satellite, distributed satellite system, time synchronization, maximum likelihood estimation

0 引言

IMT-2030 (6G) 推进组在 2021 年 6 月 6 日正式发布《6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书》^[1], 提出大力建设空天地一体化网络, 旨在构建一个覆盖全球、部署灵活、高速智能、安全可靠的通信网络^[2]。低轨卫星具有发射容易、快速部署、高动态性、全球覆盖以及拓扑结构灵活等特点^[3], 卫星互联网将成为地面通信系统的有效补充和未来 6G 的重要组成部分^[4]。

空天地一体化通信技术是通信网络发展的未来趋势, 受到国内外标准组织和产业界的高度关注^[5]。在标准组织方面, 韩国电子通信研究院强调了立体网络覆盖及其关键技术的需求。日本的 NTT DoCoMo 公司则提出了利用高空平台和卫星实现空间网络覆盖的需求。同时, 瑞典爱立信公司在其 6G 白皮书中明确指出, 非地面网络接入技术将是 6G 网络不可或缺的一部分。在产业界, SpaceX 发布星链 (Starlink) 计划, 预计发射约 40 000 颗低轨卫星, 提供覆盖全球的高速互联网接入服务。为了实现“让所有人在任何地方都能接入互联网”, OneWeb 公司也预计发射约 7 000 颗卫星^[6]。

空天地一体化通信网络架构中, 卫星之间需要实现高可靠的时间同步, 确保用户在接入网络后和星间切换时不断跟踪频偏差以维持同步状态, 确保数据传输能够正常进行^[7]。低轨卫星受限于载荷大小、功率等因素, 一般搭载晶体振荡

器维持本地时频基准, 且不同星座配置的时频设备差异化, 卫星之间的长周期时频同步受到严峻挑战。

卫星间精确的时间同步是确保任务实时性与可靠性的基础, 低轨巨型星座系统中卫星数目的增加, 对星间时间同步方法的稳定性与准确性提出更高要求^[8]。卫星间时间同步要求低同步误差, 快速适应时钟漂移和网络拓扑结构的变化, 并从同步丢失中快速恢复^[9]。文献[10]采用参考广播同步 (reference broadcast synchronization, RBS) 机制进行时间同步, 其主要思想是利用广播信道特性, 通过比较不同节点接收到广播信号的时刻, 实现不同接收节点之间的时间同步, 该方法忽略了传播时间带来的时间偏差, 不适用于大距离的卫星间时间同步。文献[11]提出时延测量时间同步 (delay measurement time synchronization, DMTS) 协议, 通过对同步报文在传输路径上的所有时延进行估计来实现节点间的时间同步, DMTS 算法没有估计时钟的频率偏差, 因此同步精度不高, 不适用于高同步精度要求的卫星网络。文献[12]采用传感器网络时间同步协议 (timing-sync protocol for sensor networks, TPSN) 实现高精度时间同步, 其主要思想是先将所有节点按照层次结构进行分级, 然后每个节点与上一级的一个节点进行时间同步, 最终所有节点都与根节点时间同步, 需要频繁的拓扑管理来维护生成树, 不适用于卫星动态网络。平均时间同步 (average time synchronization, ATS) 协议和最大



时间同步 (maximum time synchronization, MTS) 协议, 均独立于拓扑, 对动态网络更加稳健, 可以降低低轨卫星网络拓扑时变性对时间同步性能的影响, 适用于低轨卫星通信网络。但是 ATS 协议和 MTS 协议通常假设在理想环境中实现高精度时间同步, 由于实际低轨卫星场景中存在随机通信时延, 会大幅降低时钟参数估计精度, 进而影响同步性能, 因此需要对算法进行设计。

本文首先介绍两种常用的时间同步方法: ATS 和 MTS, 并分析其在低轨卫星场景下的应用, 在此基础上, 进一步提出基于最大似然估计 (maximum likelihood estimation, MLE) 的低轨通信星座分布式时间同步方法, 对这 3 种时间同步方法性能进行对比分析, 根据低轨卫星场景进行实验验证, 为低轨卫星系统时间同步方法提供理论支撑。

1 系统建模

(1) 传统星间时频传递算法模型简述

当下主要星间时间同步算法的核心原理为双向时间传递 (two-way time transfer, TWTT) 算法, 主要思想为在两个节点间分别实现两次信号收发, 基于收发时间计算两者间的时钟偏移量与传播时延^[13]。TWTT 时间同步原理如图 1 所示, 卫星 j 在 $T_j^i(t_1)$ 时刻向卫星 i 发送同步信息, 卫星 i 在 $T_j^i(t_2)$ 时刻收到同步信息, 经过短暂的星载硬件处理时延后, 在 $T_i^j(t_3)$ 向卫星 j 发送同步信息, 卫星 j 在 $T_i^j(t_4)$ 时刻收到同步信息, 假设卫星 i 和卫星 j 之间的传输路径是对称的, 卫星 i 和卫星 j 之间的时间差为 $\theta_i^j = \frac{(T_i^j(t_4) - T_i^j(t_3)) - (T_j^i(t_2) - T_j^i(t_1))}{2}$ 。

实际低轨卫星场景中, 由于卫星间的相对运动使得卫星间的传输路径不是对称的, 简单地采用 TWTT 方法解算的钟差中, 不仅包含了路径不对称时延, 还有噪声引起的测量误差。文献[14]

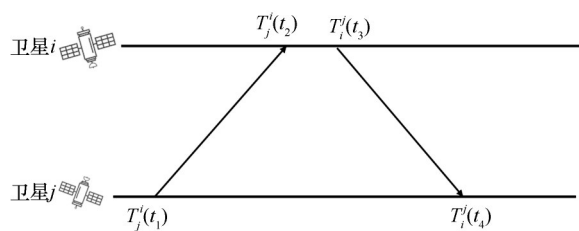


图1 TWTT 时间同步原理

考虑了卫星之间的几何路径不对称造成的同步误差, 并且考虑了在相对论框架下的 TWTT 改进方法。文献[15]采用主从时间同步结构, 主卫星在每个时隙分别与从卫星进行 TWTT, 测量主从卫星之间的相对钟差, 利用 3 种算法来预测直到下一个比对周期内的主从相对钟差, 并且比较了 3 种预测算法的性能。文献[16]采用历元转换的方式, 基于卫星星历信息和伪距观测值对误差进行逐项消除以及插值拟合, 并且提出了基于分布式比例积分 (proportional integral, PI) 控制器的一致性时钟同步方法。文献[17]提出了一种紧凑型时差补偿系统, 根据主从卫星的相对时差动态调整卫星参考频率使从卫星同步到主卫星。

上述同步方法完全基于主从同步结构, 将卫星集群分为主卫星和从卫星, 将从卫星的时间同步到主卫星上, 这不适合大规模的低轨卫星星座, 目前, 关于分布式低轨卫星时间同步算法的研究少之又少, 可以将无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN) 的时间同步算法转换为在分布式低轨卫星场景下进行。

WSN 现有主要同步算法有 ATS 算法和 MTS 算法。其中, ATS 算法基于平均共识的同步方式, 收集周围节点的时间信息进行一致性估计^[18], 其本质是一阶低通滤波器^[19]。MTS 的同步方式与 ATS 类似, 其主要思想是使网络内每个节点的逻辑时钟收敛到整个网络中逻辑时钟偏差最大的节点, 同时同步每个节点的时钟偏移, 因此其相较于 ATS 具有更快的时钟收敛速度^[20]。

(2) 系统模型的建立

本文中低轨卫星网络中的卫星集合为 $\mathcal{N}=\{1, 2, \dots, N\}$, 卫星 i 的硬件时钟建模为如下线性函数:

$$H_i(t) = \alpha_i t + \beta_i \quad (1)$$

其中, α_i 为硬件时钟偏差, 表示时钟的频率, β_i 为初始时钟偏移, 理想情况下 α_i 为 1, β_i 为 0。但是由于时钟的频率特性, 每个卫星的 α_i 和 β_i 都与理想值有一定的偏差。在实际场景中, 卫星 i 的实际时钟偏差与偏移是无法测量的。在分布式系统中, 建立一个虚拟的逻辑时钟 $L_i(t)$, 表示为硬件时钟乘以一个相关系数, 调整相关系数的数值大小使网络内的每颗卫星的逻辑时钟读数相同, 以达到同步的目的, 具体表达式如下:

$$L_i(t) = \tilde{\alpha}_i H_i(t) + \tilde{\beta}_i = \tilde{\alpha}_i \alpha_i t + \tilde{\alpha}_i \beta_i + \tilde{\beta}_i \quad (2)$$

其中, $\tilde{\alpha}_i$ 、 $\tilde{\beta}_i$ 分别是卫星 i 逻辑时钟的偏差补偿值和偏移补偿值, 将 $\tilde{\alpha}_i \alpha_i$ 定义为卫星 i 逻辑时钟的时钟偏差, $\tilde{\alpha}_i \beta_i + \tilde{\beta}_i$ 定义为卫星 i 逻辑时钟的时钟偏移, 同理可以得到卫星 i 的相邻节点 $j \in \mathcal{N}, j \neq i$ 的逻辑时钟读数 $L_j(t)$ 的表达式, 同步就是通过调整相关系数 $\tilde{\alpha}_i$ 和 $\tilde{\beta}_i$ 的大小, 使得 $L_i(t) = L_j(t)$, 即:

$$\begin{cases} \tilde{\alpha}_i \alpha_i = \tilde{\alpha}_j \alpha_j \\ \tilde{\alpha}_i \beta_i + \tilde{\beta}_i = \tilde{\alpha}_j \beta_j + \tilde{\beta}_j, \forall j \neq i \end{cases} \quad (3)$$

为了使两颗卫星之间的逻辑时钟保持一致, 需要卫星 i 在连续两个时刻收到相邻卫星 j 的时间戳, 根据两个时刻的时间戳计算出卫星 j 与卫星 i

之间的相对时钟偏差 α_{ij} 后采用相应同步算法解算出相应的逻辑时钟补偿值。相对时钟偏差计算式如下:

$$\alpha_{ij} = \frac{H_j(t_{k+1}) - H_j(t_k)}{H_i(t_{k+1}) - H_i(t_k)} \quad (4)$$

卫星传输误差模型如图2所示。每颗卫星都以一定周期 T_b 向邻近卫星播发带有自身时间戳的数据包 $\tau_l(t_k)$, 表示卫星 l 在 t_k 时刻的硬件时钟读数, d_k 表示通信消息传输过程中的变量通信时延, 由固定通信时延 d_k^{fix} 与变量通信时延 d_k^{var} 组成, 其表示为 $d_k = d_k^{\text{fix}} + d_k^{\text{var}}$, 其中固定通信时延 d_k^{fix} 通常指链路传播时延, 由星间距离与信息传播速率决定, 变量通信时延 d_k^{var} 目前没有确切的统计数据, 通常建模为高斯随机变量。

由图2可知, 卫星 j 在一个同步周期内会有两组时间戳 $\langle \tau_j^u(n), \tau_j^v(n) \rangle$ 和 $\langle \tau_j^v(n), \tau_j^v(n) \rangle$ 。由于存在通信时延, 卫星之间的相对时钟偏差估计为:

$$\tilde{\alpha}_{ij} = \frac{H_j(t_{k+1}) - H_j(t_k)}{H_i(t_{k+1}) - H_i(t_k)} = \frac{\alpha_j(t_{k+1} - t_k)}{\alpha_i(t_{k+1} - t_k) + \Delta d_k^{\text{var}} + \Delta d_k^{\text{fix}}} \quad (5)$$

2 基于MLE的低轨星座时间同步算法

2.1 ATS算法

卫星 j 以同步周期 T_b 向所有邻居发送数据包,

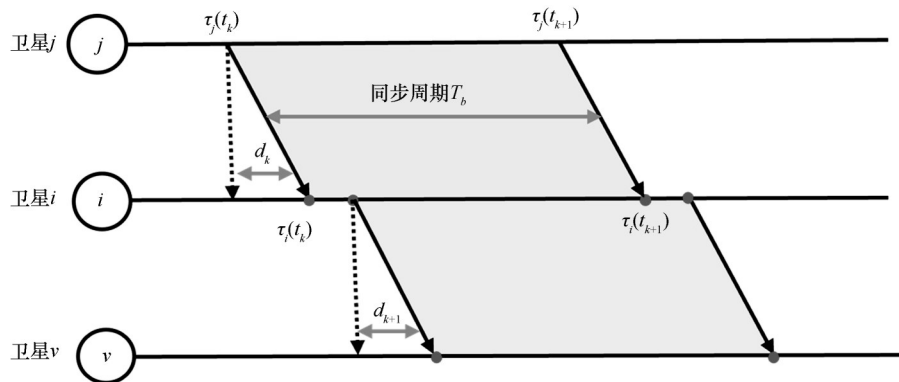


图2 卫星传输误差模型



其传输时刻 t_k^j 定义为:

$$t_k^j = \frac{nT_b - \beta_j}{\alpha_j} \quad (6)$$

其中, n 为时间同步周期数。

卫星 j 向周围卫星播发的硬件时钟读数为 $\tau(t_k^j)$, 逻辑时钟补偿值为 $\tilde{\alpha}_j$ 和 $\tilde{\beta}_j$, 只要相邻卫星 i 在 t_k 时刻接收到时间数据, 立马计算卫星 i 与卫星 j 之间的相对时钟偏差 α_{ij} , 并且根据上一时刻收到的卫星 j 的时钟读数进行相对时钟偏差更新:

$$\alpha_{ij}(t_k^+) = \rho_\eta \alpha_{ij}(t_k) + (1 - \rho_\eta) \frac{\tau(t_k^j) - \tau(t_{k-1}^j)}{\tau(t_k^i) - \tau(t_{k-1}^i)} \quad (7)$$

其中, $\rho_\eta \in (0, 1)$, 是人为设置的调优参数。

每个卫星只存储自身的逻辑时钟偏差估计, 并且根据计算出来的相对时钟偏差更新自身逻辑时钟偏差补偿值 $\tilde{\alpha}_j$, 更新计算式为:

$$\tilde{\alpha}_i(t_k^+) = \rho \tilde{\alpha}_i(t_{k-1}) + (1 - \rho) \alpha_{ij}(t_k^+) \tilde{\alpha}_j(t_k) \quad (8)$$

其中, $\rho \in (0, 1)$, 是人为设置的调优参数。

在更新自身逻辑时钟偏差补偿值 $\tilde{\alpha}_j$ 后, 所有本地逻辑时钟最终将具有相同的时钟偏差, 即它们将以相同的速度运行。在这一点上, 只需要补偿可能的偏移误差。更新计算式如下:

$$\tilde{\beta}_i(t_k^+) = \tilde{\beta}_i(t_{k-1}) + (1 - \rho_v) \{L_j(t_k) - L_i(t_k)\} \quad (9)$$

其中, $\rho_v \in (0, 1)$, 是人为设置的调优参数。

2.2 MTS算法

MTS采用与ATS类似的同步方式。在给定初始条件 $\tilde{\alpha}_j$ 和 $\tilde{\beta}_j$ 的情况下, 为每个卫星设置公共广播周期 T 。若卫星 j 的硬件时钟读数满足 $\tau(t_k^j)/T \in \mathbf{N}^+$, 则卫星 j 向相邻卫星广播其本地硬件时钟读数 $\tau(t_k^j)$ 、 $\tilde{\alpha}_j$ 和 $\tilde{\beta}_j$ 。若相邻卫星 i 在 t_k 时刻接收到数据包, 则它记录其本地硬件时钟读数 $\tau(t_k^i)$, 根据上一时刻收到的卫星 j 的时钟读数,

$$\text{计算 } \alpha_{ij}(t_k) = \frac{\tau(t_k^j) - \tau(t_{k-1}^j)}{\tau(t_k^i) - \tau(t_{k-1}^i)}。$$

在MTS算法中卫星 i 自身逻辑时钟偏差补偿值 $\tilde{\alpha}_i$ 更新计算式为:

$$\tilde{\alpha}_i(t_k^+) = \max \{ \tilde{\alpha}_i(t_{k-1}), \tilde{\alpha}_j(t_k) \alpha_{ij}(t_k) \} \quad (10)$$

而 $\tilde{\beta}_i$ 更新可分为以下两种情况:

(1) 如果 $\tilde{\alpha}_j(t_k) \alpha_{ij}(t_k) = \tilde{\alpha}_i(t_{k-1})$, 则:

$$\tilde{\beta}_i(t_k^+) = \max_{l=i,j} \{ \tilde{\alpha}_l(t_k) H_l(t_k) + \tilde{\beta}_l(t_k) \} - \tilde{\alpha}_i(t_k) H_i(t_k) \quad (11)$$

(2) 如果 $\tilde{\alpha}_j(t_k) \alpha_{ij}(t_k) > \tilde{\alpha}_i(t_{k-1})$, 则:

$$\tilde{\beta}_i(t_k^+) = \tilde{\alpha}_j(t_k) H_j(t_k) + \tilde{\beta}_j(t_k) - \tilde{\alpha}_j(t_k) \alpha_{ij}(t_k) H_i(t_k) \quad (12)$$

MTS算法的主要思想是使卫星的逻辑时钟收敛到整个网络中逻辑偏差最大的节点, 以实现时间同步。MTS算法的收敛速度相较于ATS算法有较大提升, 其可以在有限时间内实现全局时间同步。

2.3 MLE算法

ATS算法和MTS算法的精度很大程度上依赖卫星 i 和卫星 j 的相对时钟偏差估计精度, 由于卫星 i 和卫星 j 之间存在通信时延 d_k , 由式(5)得到估计值 $\hat{\alpha}_{ij}$ 与实际相对时钟偏差之间存在较大偏差, 将式(5)中的 Δd_k 建模如下:

$$\Delta d_k^{\text{var}} = d_k^{\text{var}} - d_{k-1}^{\text{var}} = \left(\frac{\alpha_{ij}}{\tilde{\alpha}_{ij}(t_k)} - 1 - \frac{\Delta d_k^{\text{fix}}}{\Delta t_k} \right) \Delta t_k \quad (13)$$

本文将通信时延建模为高斯分布, 因此其满足 $d \sim N(\mu, 2\sigma^2)$, 由于 Δt_k 是同步周期, 因此其似然函数为:

$$pf(\Delta d_k) = \left(4\pi\sigma^2 \right)^{-\frac{N}{2}} \cdot \exp \left(-\frac{1}{4\sigma^2} \sum_{l=1}^N \left(\frac{\alpha_{ij}}{\tilde{\alpha}_{ij}(l)} - 1 - \frac{\Delta d_k^{\text{fix}}}{\Delta t_k} \right)^2 \Delta t_k \right) \quad (14)$$

对 α_{ij} 得偏导数为:

$$\frac{\partial \ln f(\Delta d_k^{\text{var}})}{\partial \alpha_{ij}} = -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{l=1}^N \left(\frac{\alpha_{ij} \Delta t_k}{\tilde{\alpha}_{ij}(l)} - \Delta t_k - \Delta d_k^{\text{fix}} \right) \frac{\Delta t_k}{\tilde{\alpha}_{ij}(l)} \quad (15)$$

因此相对时钟偏差得MLE为:

$$\tilde{\alpha}_{ij}(\text{MLE}) = \arg\max[\ln f(\Delta d_k^{\text{var}})] = \frac{\sum_{l=1}^N \frac{1}{\tilde{\alpha}_{ij}(l)} \frac{\Delta t_k + \Delta d_k^{\text{fix}}}{\Delta t_k}}{\sum_{l=1}^N \frac{1}{\tilde{\alpha}_{ij}^2(l)}} \quad (16)$$

基于MLE的时间同步算法的伪代码如下。

步骤1 初始化: 对于任意卫星 j , $\alpha_{ij}(t_0)=1$, $\tilde{\alpha}(t_0)=1$, $\tilde{\beta}(t_0)=0$ 。

步骤2 卫星 j 处于触发任务: 卫星 j 向周围卫星播发时间戳 $\langle H_i(t_k) \ L_i(t_k) \ \alpha_i(t_k) \ \beta_i(t_k) \rangle$ 。

步骤3 卫星 i 一旦接收到卫星 j 的时间戳: 存储此刻时间戳 $\langle H_j(t_k) \ L_j(t_k) \ \alpha_j(t_k) \ \beta_j(t_k) \rangle$, 并且与上一刻存储的时间戳 $\langle H_j(t_{k-1}) \ L_j(t_{k-1}) \ \alpha_j(t_{k-1}) \ \beta_j(t_{k-1}) \rangle$, 估计相对时钟偏差 $\alpha_{ij}(t_k)$; 根据卫星自身最大存储容量 Ω , 存储 N 个连续时刻的相对时钟偏差估计值。

步骤4 根据存储的相对时钟偏差进行MLE:

$$\tilde{\alpha}_{ij}(\text{MLE}) = \left(\frac{\sum_{l=1}^N \frac{1}{\tilde{\alpha}_{ij}(l)}}{\sum_{l=1}^N \frac{1}{\tilde{\alpha}_{ij}^2(l)}} \right) \frac{\Delta t_k + \Delta d_k^{\text{fix}}}{\Delta t_k}, N \in \Omega$$

步骤5 由MLE算法求解的相对时钟偏差代入ATS算法或MTS估计补偿值。

3 实验及结果分析

通过MATLAB软件, 对ATS算法、MTS算法以及基于MLE的ATS修正算法和MTS修正算法的性能进行分析与仿真, 仿真参数设置见表1。

采用星座环形拓扑结构(即每颗卫星只可与相邻两颗卫星进行通信传输), 通过卫星星历给出实时低轨卫星位置坐标消除固定传播时延, 将路径不对称导致的星间距离的偏差值作为额外通信时延的确定性部分。时钟偏差的同步误差表示任意两颗卫星之间采用同步算法生成的逻辑时钟的时钟偏差最大差值, 如图3所示, 由于假定每

表1 仿真参数设置

参数名	参数值
同步周期 T_b/s	10
硬件时钟偏差	$2 \times 10^{-11}(\text{std.})$
硬件时钟偏移/ns	$20(\text{std.})$
ρ_η	0.4
ρ	0.4
ρ_v	0.6
d_k	$N(2.5 \times 10^{-5}, 2 \times 10^{-9})$
卫星数量/颗	12

颗卫星硬件时钟偏差与偏移是恒定的, 因此两卫星之间的硬件时钟偏差最大差值是恒定的。从图3可以对比发现, 低轨卫星之间的通信时延的影响, 导致ATS算法生成的卫星之间的逻辑时钟偏差是不收敛的, 基于MLE修正的ATS算法表示为MLE-ATS算法, 该算法在大约4 min后逐渐收敛, 同步误差范围为 $[1.2 \times 10^{-11}, 1.5 \times 10^{-11}]$, 并且MLE-ATS算法在时钟偏差的同步误差收敛的情况下, 降低了卫星之间的时钟偏差最大差值, 提高了时间精度。

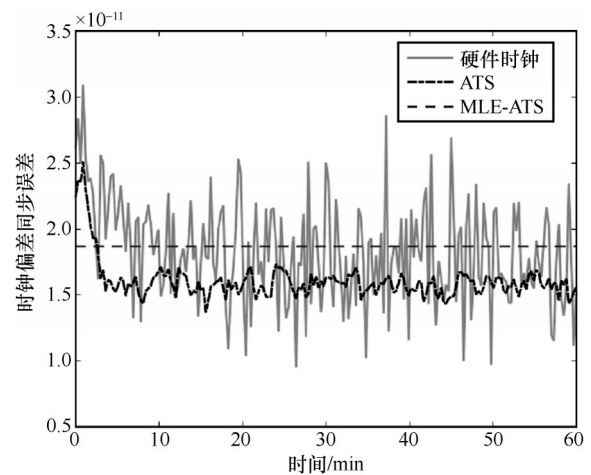


图3 ATS算法与MLE-ATS算法时钟偏差同步误差仿真

ATS算法与MLE-ATS算法同步误差仿真如图4所示, 同步误差表示采用同步算法生成任意



两颗卫星逻辑时钟之间的时钟最大差值，图4中虚线为卫星硬件时钟之间的最大差值，可以看出，ATS算法与MLE-ATS算法生成的逻辑时钟的同步误差均小于硬件时钟的同步误差。但是由于ATS算法没有考虑额外通信时延的影响，仿真时间之内没有收敛，同步误差曲线波动较大。相比之下，MLE-ATS算法同步误差曲线波动较小，趋于直线，并且同步误差在仿真时间内小于5 ns，因此更适合应用在高通信时延场景。

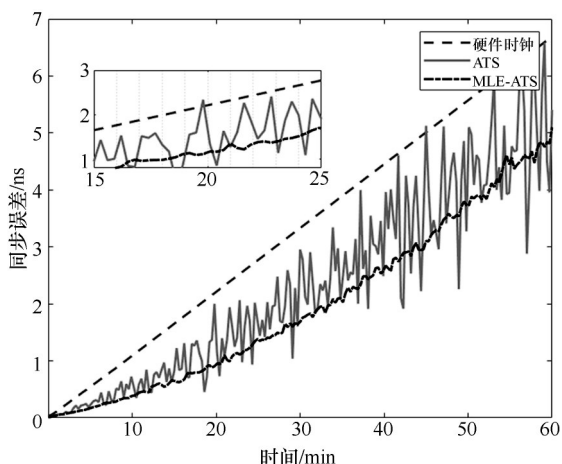


图4 ATS算法与MLE-ATS算法同步误差仿真

MTS算法和MLE-MTS算法时钟偏差同步误差仿真如图5所示，MLE-MTS表示基于MLE修正的MTS算法，MTS与MLE-MTS算法在时钟偏差同步上都没有很好的收敛效果，这是因为MTS算法的主要思想是将所有卫星逻辑时钟同步至整个网络中逻辑时钟偏差最大的卫星上，MTS算法与ATS算法不同的是MTS算法主要通过对时钟偏移进行补偿来达到同步的目的。MTS算法和MLE-MTS同步误差仿真如图6所示，MTS算法与MLE-MTS算法在卫星逻辑时钟同步方面都具有良好的效果，两种算法都大幅度降低了网络内卫星逻辑时钟之间的误差，但由于存在额外通信时延以及卫星运动导致的额外传播时延，MTS算法在仿真时间内发散，同步误差曲线在30 min之后波动较大，与之相比，MLE-MTS算法通过很

好地消除额外时延使得同步误差在仿真时间内小于1 ns。

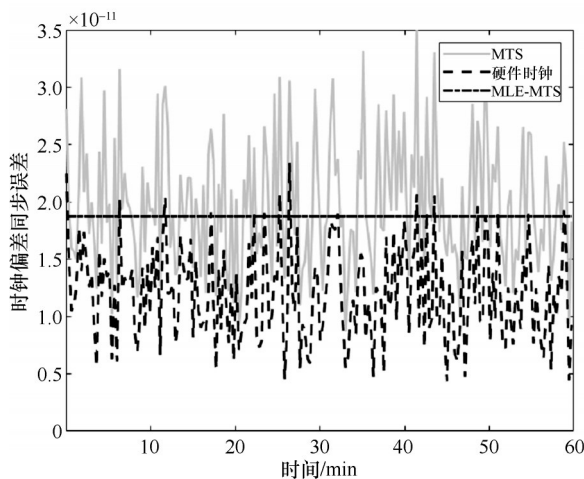


图5 MTS算法和MLE-MTS算法时钟偏差同步误差仿真

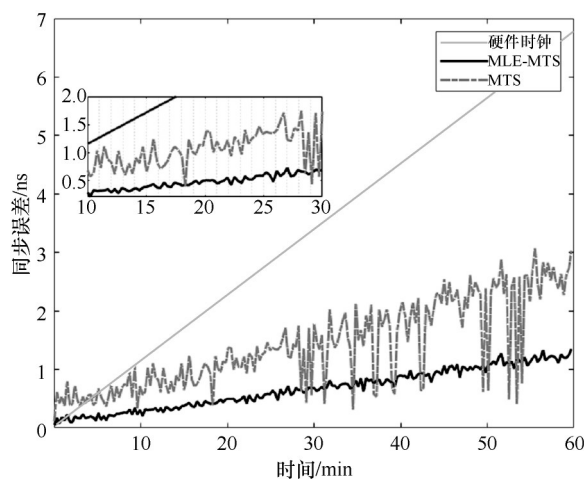


图6 MTS算法和MLE-MTS同步误差仿真

考虑实际低轨卫星场景中的拓扑结构时变性和对时间同步的影响，前述仿真结果证明了基于MLE的时间同步方法的同步精度以及收敛速度更具优势。此外，本文对MLE-ATS和MLE-MTS这两种基于MLE的时间同步方法也进行了仿真分析，仿真条件设置为在20 min时将卫星星座的拓扑结构从环形拓扑结构切换至网格拓扑结构，并且在50 min时，随机关闭其中4颗卫星的通信链路。动态拓扑场景下的时间同步算法仿真结果如图7所示，拓扑结构的变化使得星座内短期同步

出现较大偏差, 其原因是基于MLE需要累积多个时刻时间戳信息进行通信时延的修正, 但是拓扑结构的变化使得时间戳信息呈现不连续性, 在20 min之后, 由于拓扑结构的稳定, 基于MLE算法很好地修正通信时延, 使得星座内具有良好的同步精度, 并且开始收敛, 在50 min时, 由于关闭了4颗卫星的通信链路, 基于MLE的MTS算法的统一基准出现偏差, 因此算法出现了发散情况。

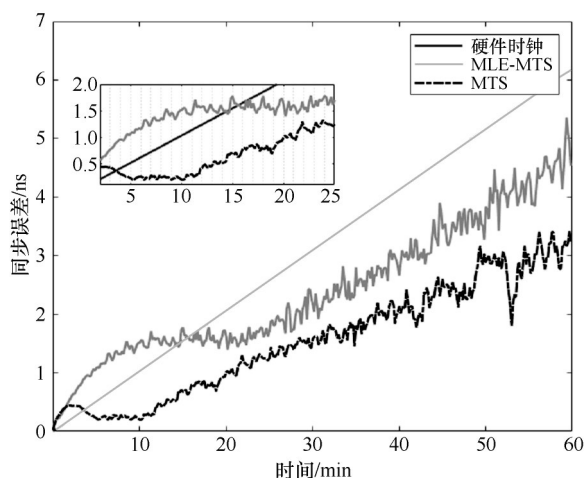


图7 动态拓扑场景下的时间同步算法

4 结束语

本文针对应用于未来低轨分布式卫星系统的时间同步算法, 借鉴了WSN时间同步方法, 在低轨卫星通信场景下, 考虑了低轨卫星的通信时延和动态拓扑等特性, 在现有同步方法基础上, 提出了基于MLE的修正方法, 从而有效地抑制了随机通信时延造成的影响。该算法的主要思想是, 首先利用星历信息补偿星间距离变化导致的额外传播时延, 其次利用MLE方法消除卫星间的随机通信时延, 估计出卫星接收时间信息的实际时间后, 采用ATS算法和MTS算法实现分布式低轨卫星时间同步, 仿真分析对比了ATS算法和MTS算法以及基于MLE同步算法的收敛性以及同步性能, 证明了基于MLE的时间同步方法可以有效降低低轨卫星星间时间同步误差, 更加

适合低轨星座卫星时间同步系统, 为未来低轨卫星时间同步方法研究提供了一种可行的解决思路。

参考文献:

- [1] 王丰. 面向动态可持续的天地一体化融合通信关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
WANG F. Research on key technologies of dynamic and continuous space-terrestrial integrated communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [2] 刁兆坤, 杨丽, 王振章. 6G空天地一体化网络架构及其构建[J]. 通信世界, 2024(4): 36-39.
DIAO Z K, YANG L, WANG Z Z. 6G integrated network architecture of space, space and earth and its construction[J]. Communications World, 2024(4): 36-39.
- [3] 赵亚飞, 闫冰, 孙耀华, 等. 低轨星座通导一体化: 现状、机遇和挑战[J]. 电信科学, 2023, 39(5): 90-100.
ZHAO Y F, YAN B, SUN Y H, et al. Communication and navigation integration for LEO constellations: status, opportunities, and challenges[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(5): 90-100.
- [4] 贵重, 李艳, 李云翔, 等. 卫星通信发展趋势与展望[J]. 电信工程技术与标准化, 2023, 36(11): 82-85.
GUI Z, LI Y, LI Y X, et al. Development trend and prospect of satellite communications[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2023, 36(11): 82-85.
- [5] 康绍莉, 缪德山, 索士强, 等. 面向6G的空天地一体化系统设计和关键技术[J]. 信息通信技术与政策, 2022(9): 18-26.
KANG S L, MIAO D S, SUO S Q, et al. System design and key technologies for the integrated air-space-terrestrial communication toward 6G[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2022(9): 18-26.
- [6] 刘家祥, 彭硕, 蒋峥, 等. 空天地一体化网络运营方法分析与挑战[J]. 移动通信, 2022, 46(9): 45-50.
LIU J X, PENG S, JIANG Z, et al. Analysis and challenge of operation method for space-air-ground integrated network[J]. Mobile Communications, 2022, 46(9): 45-50.
- [7] 崔新雨, 伍杰, 周一青, 等. 空天地一体化融合组网的挑战与关键技术[J]. 西安电子科技大学学报, 2023, 50(1): 1-11.
CUI X Y, WU J, ZHOU Y Q, et al. Challenges of and key technologies for the air-space-ground integrated network[J]. Journal of Xidian University, 2023, 50(1): 1-11.



- [8] BARTON R J. Distributed MIMO communication using small satellite constellations[C]//Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE). Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-7.
- [9] SHI F R, TUO X G, YANG S X, et al. Rapid-flooding time synchronization for large-scale wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(3): 1581-1590.
- [10] ELSON J, GIROD L, ESTRIN D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2002, 36: 147-163.
- [11] PING S. Delay measurement time synchronization for wireless sensor networks[J]. Intel Research Berkeley Lab, 2003(6): 1-10.
- [12] GANERIWAL S, KUMAR R, SRIVASTAVA M B. Timing-sync protocol for sensor networks[C]//Proceedings of the 1st International Conference On Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2003: 138-149.
- [13] KIRCHNER D. Two-way time transfer via communication satellites[J]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79(7): 983-990.
- [14] TRAINOTTI C, DASSIÉ M, GIORGI G, et al. Autonomous satellite system synchronization schemes via optical two-way time transfer and distributed composite clock[C]//Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022). 2022: 3646-3661.
- [15] ZHANG S K, ZHANG L, YANG Y J. Ultra-short term clock offset prediction for two-way satellite time synchronization[C]//Proceedings of the 2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC). Piscataway: IEEE Press, 2013: 335-338.
- [16] QU Z, CHEN J Y, WU N J. Consensus clock synchronization for distributed satellite system based on distributed PI controller[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 15th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). Piscataway: IEEE Press, 2021: 114-119.
- [17] XU J L, ZHANG C J, WANG C H, et al. Approach to inter-satellite time synchronization for micro-satellite cluster[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(4): 805-815.
- [18] SCHENATO L, FIORENTIN F. Average TimeSynch: a consensus-based protocol for clock synchronization in wireless sensor networks[J]. Automatica, 2011, 47(9): 1878-1886.
- [19] TIAN Y P, ZONG S H, CAO Q Q. Structural modeling and convergence analysis of consensus-based time synchronization algorithms over networks: Non-topological conditions[J]. Automatica, 2016, 65: 64-75.

- [20] HE J P, CHENG P, SHI L, et al. Time synchronization in WSNs: a maximum-value-based consensus approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(3): 660-675.

[作者简介]



闫冰 (1999-), 男, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室硕士生, 主要研究方向为低轨卫星时频基准建立与维持。



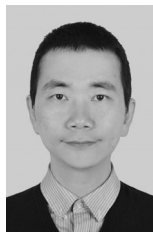
赵亚飞 (1987-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室副研究员, 主要研究方向为低轨星座通信导航一体化、星地融合网络等。



方一鸣 (2000-), 男, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室硕士生, 主要研究方向为空间目标探测识别。



彭木根 (1978-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室教授, 主要研究方向为空间信息通信、通感算一体化、雾无线电接入网络等。



林广荣 (1980-), 男, 博士, 银河航天科技(上海)有限公司高级工程师、星座通信系统架构师, 主要研究方向为卫星通信网络。