

文章编号: 2095-4980(2024)03-0278-08

一种低轨卫星通信的定时提前计算方法

段相龙¹, 刘 留^{*1}, 周 涛¹, 苏昭阳¹, 韩紫杰¹, 尹 毅²

(1.北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044; 2.中国国家铁路集团有限公司, 北京 100844)

摘 要: 低轨(LEO)卫星网络作为地面网络的重要补充, 是未来天地一体化网络的重要组成部分。由于 LEO 卫星的高移动速度以及星地通信的大传播距离造成了高传播时延, 因此需要新的针对 LEO 卫星星地通信背景的上行链路的定时提前量(TA)的计算策略。本文基于 LEO 卫星的星地通信场景, 介绍了 TA 及其在协议中的规定, 并针对 LEO 卫星的特点, 提出一种 LEO 卫星通信的定时提前计算方法。通过仿真分析验证了所提方案的有效性, 为 LEO 卫星星地通信系统的设计提供了参考。

关键词: 低轨卫星; 星地通信; 定时提前量; 计算方法; 神经网络

中图分类号: TN927.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024003

A timing advance calculation method for Low Earth Orbit satellite communication

DUAN Xianglong¹, LIU Liu^{*1}, ZHOU Tao¹, SU Zhaoyang¹, HAN Zijie¹, YIN Yi²

(1.School of Electronic Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2.China State Railway Group Co., Ltd, Beijing 100844, China)

Abstract: As an important supplement to the terrestrial network, the Low Earth Orbit(LEO) satellite network is an important part of the future earth-earth integrated network. However, due to the high moving speed of LEO satellites and the long propagation distance of satellite-ground communication, large propagation delay is caused, therefore a new calculation strategy for the Timing Advance(TA) of the uplink in the satellite-ground communication background of LEO satellites is needed. Based on the satellite-earth communication scenario of LEO satellite, TA and its provisions in the protocol are introduced firstly. Then, according to the characteristics of LEO satellite, a timing advance calculation method of LEO satellite communication is proposed. The effectiveness of the proposed scheme is verified by simulation analysis, which provides a reference for the design of satellite-earth communication system of LEO satellite.

Keywords: LEO satellite; space-ground communication; Timing Advance; calculation method; neural network

5G 从 2019 年开始部署, 实现了高速率、大容量、低延迟和大规模连接。随着 5G 的全面发展和应用, 学术界对于 6G 的研究也逐渐深入。6G 通信网络将不局限于陆地, 而是要打造空天地一体化全场景无缝覆盖的网络^[1]。目前陆地移动通信系统经过数十年的发展已较为完善, 但在深山、森林等偏远地区, 人口稀少, 环境恶劣, 基站建设和后续维护成本大。此外, 地球约 71% 的表面积被海洋覆盖, 陆地面积仅占 29%, 并且陆地面积有 30% 已经沙漠化^[2], 地面通信网络难以覆盖。奥卢大学发布的 5G 旗舰白皮书中指出: 卫星在扩大 5G 覆盖范围和减少流量方面发挥着重要的作用^[3]。卫星通信作为新兴的通信领域, 能够对地面通信网络进行补充, 有效解决移动蜂窝网络覆盖能力不足的问题。

常见的通信卫星按照卫星轨道高度不同可分为 3 类: 低轨卫星、中轨卫星、地球静止轨道卫星。其中地球静止轨

收稿日期: 2024-01-01; 修回日期: 2024-02-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62341102); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划资助项目(N2023G060)

*通信作者: 刘 留 email:liuliu@bjtu.edu.cn

道卫星和中轨卫星由于轨道高度高，传输时延和传输损耗大，难以满足下一代通信系统对于时延和容量的需求^[4]。低轨卫星由于其轨道高度相对较低，具有传播时延小，路径损耗小等优点^[5]，并且通过多颗卫星协同就能实现全球覆盖。随着近年来点波束、频率复用等技术在低轨卫星系统上的应用与发展，低轨卫星系统在移动通信领域拥有了更加广阔的空间，对我国通信的发展至关重要^[6]。

近年来，低轨卫星通信系统发展快速，通过低轨卫星之间的相互协作，实现了与地面的实时通信^[7]。国外低轨卫星系统以“铱星”、“星链”、“全球星”为代表。1987年，美国提出搭建第一代卫星移动通信星座系统——“铱星系统”^[8]，目前已完成了“铱星下一代”的星座组网^[9]。其他星座系统如“全球星”、“一网”等已在太空中部署了几百至上千颗低轨卫星^[10]。国内的低轨星座处于快速发展时期，主要有“虹云”工程和“鸿雁”星座^[11]。“虹云”工程由中国航天科工集团发起，2018年12月，技术验证星发射成功，并计划到2025年左右，实现全部156颗卫星部署，完成星座构建^[12]。“鸿雁”星座计划由300多颗低轨卫星组成，可在恶劣条件下实现实时双向通信功能。2021年中国卫星网络集团有限公司作为新央企正式成立，卫星互联网已成为5G及6G时代实现全球网络覆盖的重要解决方案^[13]。

低轨卫星星地之间稳定可靠的通信需要对传输时延进行准确的估计，并通过基站下发定时提前量(TA)给用户，对上行帧时隙进行调整。但在低轨卫星场景下，TA的计算存在2个技术难点：

1) 星地传输时延大。低轨卫星的运行轨道高度在500~2 000 km，低轨卫星的星地传播的距离远大于地面网络中基站与用户之间的距离，导致低轨卫星星地通信的TA估计时效性降低；

2) 星地传输时延变化率大。星地通信的上行链路的传输时延主要由用户到卫星、卫星到信关站和信关站到基站3部分组成，卫星的高速移动，导致用户设备(User Equipment, UE)和信关站之间的传播时延持续快速变化。第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)的新无线电技术(New Radio, NR)协议中规定：连接态下定时误差不能大于定时误差门限(Timing Error Limit, TEL)。当同步信号块(Synchronization Signaling Block, SSB)的子载波宽度配置为240 kHz时，仅需几毫秒的时间，TA的变化就超过了定时误差门限，若基站持续下发定时提前指令调整TA，会造成巨大的信令开销。

本文基于低轨卫星星地通信的大时延和高时延变化率的特点，提出一种基于迭代的TA计算方法，基于不同轨道高度的卫星速度以及星地之间的传播距离，对卫星到用户的时延进行迭代，降低了低轨卫星的高移动速度对定时估计准确性的影响；利用神经网络对TA进行预估计，基于全连接的神经网络模型对卫星的历史位置信息以及定时提前信息进行学习，并通过时间、位置与TA的关系，对未来一段时间内的TA以及卫星的位置坐标进行预测，降低星地之间大传播时延对定时估计准确性的影响，并通过预测一段时间的TA，降低了基站下发定时提前指令的频率，提高了定时估计的有效性，实现了星地通信上行链路TA的有效可靠的估计。

1 低轨卫星星地通信的TA

通信系统中，TA是指用户在进行上行传输时，用户发送的上行数据的系统帧相比于对应的下行帧所提前的时间。由于基站和用户之间存在一定的距离，上行信息到达基站的时间与上行信息发送的时间存在一个时间差，而上行传输的一个重要特征是不同的用户在时频上的正交多址接入。为保证上行传输的正交性，避免小区内干扰，基站要求来自同一子帧但不同频域资源的不同用户信号到达基站的时间基本上对齐。因此在用户方看来，TA本质上是接收到的下行子帧的起始时间与传输上行子帧时间之间的一个负偏移。基站方能够通过适当控制每个用户的偏移，控制来自不同用户的上行信号到达基站的时间。图1为通过TA调整上行帧发送时间的示意图。

如图1所示，基站发送的下行信号经过 T_{p1} 和 T_{p2} 分别到达了近点和远点的UE。为保证上行帧到达基站的时刻相同，近点UE提前 T_{p1} 时间向基站发送信号，远点UE则提前 T_{p2} 时间向基站发送信号，这样在基站处接收到的近点和远点的上行帧就能够实现同时到达。

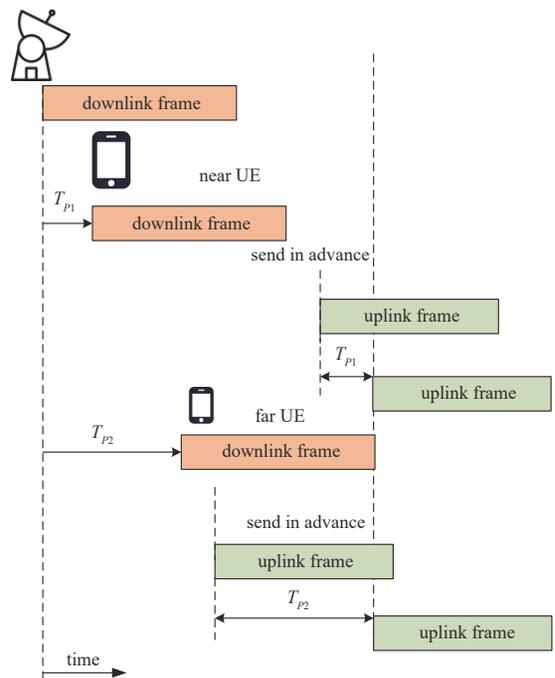


Fig.1 Diagram of adjusting uplink frame sending time by TA
图1 通过TA调整上行帧发送时间示意图

在用户与基站通信的过程中，如果 UE 和基站的传输时延变化超过了定时误差门限 T_c ，则需要基站下发定时提前指令(Timing Advance Command, TAC)对 UE 端的 TA 值进行调整。在低轨卫星背景下，TA 的调整策略有所不同。3GPP 目前致力于探索和推动 5G 网络与卫星互联网融合的可能性与方法，并称其为非地面网络(Non-Terrestrial Networks, NTN)。3GPP 将用户到基站的通信链路分为用户到卫星的服务链路和卫星到信关站的馈电链路，其中在上行信号传输时，由于卫星的高速移动，服务链路的 TA 快速变化，当 TA 变化超过 T_c 时，基站就下发 TAC 指令对用户的 TA 进行调整。由于低轨卫星的高动态特性，相较于地面网络，3GPP 在 NTN 部分对地面网络的定时误差门限以及 TA 的调整策略进行了一些调整^[14]，具体门限值如表 1 所示。

表 1 NTN 的定时误差门限大小

Table1 Timing error limit of NTN

Sub-Carrier Space(SCS) of SSB signals/kHz	SCS of uplink signals/kHz	T_{e-NTN}
15	15	$29 \times 64 \times T_c$
	30	$24 \times 64 \times T_c$
	60	—
30	15	$24 \times 64 \times T_c$
	30	$22 \times 64 \times T_c$
	60	—

表 2 NTN 网络中渐进调整门限的定义

Table2 Definition of progressive adjustment limit in NTN

SCS of uplink signals/kHz	$T_{q,NTN}$	$T_{p,NTN}$
15	$5.5 \times 64 \times T_c$	$5.5 \times 64 \times T_c$
30	$5.5 \times 64 \times T_c$	$5.5 \times 64 \times T_c$
60	$5.5 \times 64 \times T_c$	$5.5 \times 64 \times T_c$

定时误差的调整策略就是渐进时序调整，当基站检测到传输时序的误差超过了表 1 定义的定时误差门限时，会下发定时调整指令对用户端的 TA 进行调整，在调整过程中会遵循渐进调整的原则。NTN 的渐进调整策略相较于地面网络也进行了调整，如表 2 所示。具体如下：

- 1) 除去由于卫星位置更新而导致的 N_{UE} (用户和卫星之间的定时提前值) 的变化以及在上一次传输和当前传输之间的 N_{common} (卫星到信关站的定时提前值) 变化，单次调整的 TA 变化幅度的最大量应为 $T_{q,NTN}$ 。
- 2) 除去由于卫星位置更新而导致的 N_{UE} 的变化以及在一秒内的 N_{common} 变化，TA 的最小调整率为每秒 $T_{p,NTN}$ 。
- 3) 除去由于卫星位置更新而导致的 N_{UE} 的变化以及在前 200 ms 内的 N_{common} 变化，TA 的最大调整率为每 200 ms 调整 $T_{q,NTN}$ 。

从渐进调整策略和具体调整门限可知，由于卫星高动态特性导致的 TA 估计时效性和有效性下降的问题亟待解决。目前针对低轨卫星上行链路定时提前估计算法的研究较少，大部分研究是针对初始随机接入时用户发送的物理随机接入信道前导码开展^[15-16]，通过将多个不同根生成的 Zadoff-Chu 序列级联对 TA 进行估计^[17]，或通过两次前导码估计小数倍时延和整数倍时延进行估计^[18]。但在用户完成初始接入以后，星地之间大传播时延以及低轨卫星的高移动速度会导致估计的 TA 有效性降低，并且定时误差快速超过定时误差门限，而渐进调整策略难以跟踪 TA 的变化速度。

2 定时提前计算方法

低轨卫星星地通信时传输时延大，传输时延的变化率大，影响了上行链路定时提前估计的时效性和有效性。本节基于此背景，提出一种低轨卫星通信的定时提前计算方法，该方法分为两步：第一步为基于迭代的 TA 计算；第二步为基于第一步得到的 TA 以及坐标，利用神经网络对 TA 进行预估计。基于该方法可提高定时估计的有效性。

2.1 基于迭代的 TA 计算

在计算服务链路 TA 时，现有方法是在需要定时估计时，基于当前时刻 t_n 的用户位置与卫星位置计算 TA。由于星地之间的大传播距离以及卫星的高速移动性，当地面发送的信号到达卫星时，卫星已处于 $t_{n+\Delta t}$ 时刻所在的位置，在 t_n 估计的服务链路 TA 与 $t_{n+\Delta t}$ 的真实服务链路 TA 必然存在误差，如图 2 所示。

t_0 时刻 UE 对服务链路 TA 进行估计，由于星地通信距离长，传输时延大，信号经过 Δt 才能被卫星接收。可以基于 t_0 时刻的用户坐标 (u_{x0}, u_{y0}, u_{z0}) 、卫星坐标 (s_{x0}, s_{y0}, s_{z0}) 、卫星的轨道信息以及卫星的运动信息等，计算得到卫星在 $(t_0 + \Delta t)$ 时刻的坐标 (s_{x1}, s_{y1}, s_{z1}) 。基于卫星的位置信息和 UE 的运动信息以及传播时间 Δt ，对 TA

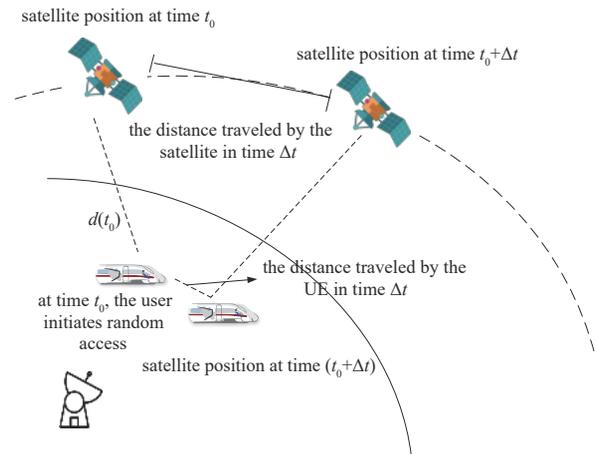


Fig.2 TA error diagram of service link
图 2 服务链路 TA 误差示意图

进行迭代计算：

$$\Delta t_{n+1} = \frac{\|u(t_0 + \Delta t_{n-1}) - s(t_0 + \Delta t_n)\|}{c} \quad (1)$$

式中： $u(t)$ 为 t 时刻UE所在的位置； $s(t)$ 为 t 时刻卫星所在的位置； Δt_n 为第 n 次迭代的时间差； c 为光速。通过上述迭代关系对传播时延进行迭代，并将每一次迭代的 Δt_n 求和，即可得到更精确的TA。

2.2 基于神经网络预测的TA预估计

低轨卫星通信场景中，低轨卫星过大的移动速度导致服务链路距离变化过快，进而导致基站下发的TA有效时间短，且由于星地之间传播时间较长，TA的时效性也会降低。实际应用中，一方面，低轨卫星的服务终端存在非长连接用户，用户开机时可能没有最新的星历表，这时需要根据历史星历数据对TA进行估计；另一方面，基于历史TA对未来一段时间内的TA进行估计，既可增加TA估计的有效时间，也可减小星地之间大传播时间对TA时效性的影响。

基于2.1节得到的位置坐标信息，提出基于神经网络的TA预估计。依据得到的历史星历数据，即卫星的历史位置坐标与时间的关系，通过神经网络学习复杂轨道数据中的模式和关系。神经网络可以很好地处理非线性关系，并在基于历史TA数据对未来的TA进行预测时，可以更好地处理输入和输出之间复杂的非线性关系，还能自动学习输入数据中的特征，捕捉数据的潜在规律。基于此，对未来一段时间内服务链路TA的变化率进行预测，可得到较为准确的定时误差估计结果。

给定一组输入-输出连续变量，采用针对回归的多层感知机方法，在给定新的统计独立的输入数据情况下，预测新的连续输出。如图3所示，多层感知机是一种特定的前馈人工神经网络，它有1个输入层，1个或多个隐藏层和1个输出层，可以根据任务(分类或回归)进行模型构建。在上述网络中输入卫星的坐标信息以及对应的时间点，通过神经网络的学习即可预测未来具体时间点的位置坐标。神经网络的复杂度与其结构的大小与深度有关，训练时使用的超参数会影响训练复杂度，进而影响训练时间与训练结果。本文采用具有2个隐藏层的多层感知器(Multilayer Perceptron, MLP)架构，第1、2个隐藏层分别有128和64个神经元。训练时进行200轮学习，批参数设置为100，通过该神经网络可以对未来的TA进行准确预测。

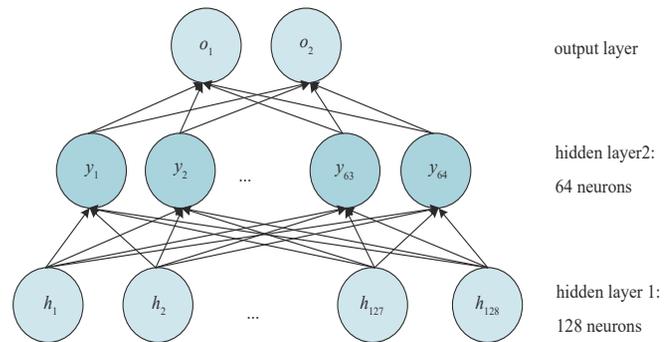


Fig.3 Neural network structure
图3 神经网络结构

实际应用过程中，给定了低轨卫星的相关参数，就可以确定其相对于地面运动的规律，根据该规律即可计算星地通信的TA。首先基于迭代的定时提前计算方法得到更准确的TA，然后基于得到的TA信息与坐标信息，通过神经网络学习位置信息与时间信息的变化关系，对未来一段时间的低轨卫星坐标以及TA进行预测，提升定时估计的有效性。

3 仿真验证与分析

在低轨卫星通信场景中，低轨卫星的轨道可由轨道六根数确定，进而得到卫星处于不同位置时刻的坐标。若考虑卫星和地面用户均在高速移动，在所有轨道中，地面用户在轨道平面上，即卫星过境会通过地面用户正上方，且卫星和用户运动方向相反时，服务链路的TA具有最大的变化率。由于低轨卫星运行高度较低，因此将低轨卫星的轨道和地球都抽象为圆。以地心为坐标原点建立坐标系，以地球球心到用户的连线方向为 y 轴正方向，轨道平面上垂直于 y 轴且过原点的直线为 x 轴，向右为 x 正半轴，如图4所示。仿真具体参数如表3所示。

3.1 TA变化率分析

仿真中的低轨卫星的运行高度为2 000 km、1 500 km和500 km。卫星沿轨道顺时针运行，根据式(2)可计算卫星运动的角速度。

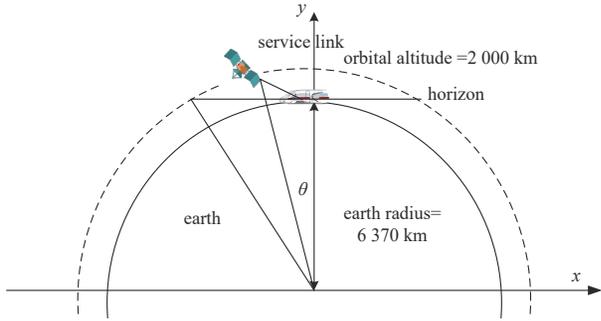


Fig.4 Simulation scene diagram
图4 仿真场景示意图

$$\omega = \sqrt{\frac{GM}{r^3}} \quad (2)$$

式中： G 为地球引力常数； M 为地球质量； r 为卫星到地心的距离。

用户沿着轨道平面和地球表面的交线，从地心正上方开始逆时针运动，速度为 500 km/h。卫星过境时可视为从 0° 仰角运行到 90° 仰角再运行到 0° 仰角，不同仰角的星地通信距离可由式(3)计算：

$$d = \sqrt{R_E^2 \sin^2 \alpha + h_0^2 + 2h_0 R_E \cos \alpha} - R_E \sin \alpha \quad (3)$$

式中： R_E 为地球半径； h_0 为轨道高度； α 为仰角。

不同轨道高度的低轨卫星的星地通信 TA 值随仰角的变化情况如图 5 所示。随着仰角的变化，低轨卫星的星地通信 TA 快速变化。当轨道高度为 500 km，仰角等于 $0^\circ \sim 40^\circ$ 时，TA 从 0.008 s 变化到 0.002 s，变化率较大；当仰角等于 $40^\circ \sim 90^\circ$ 时，TA 的变化趋于平稳，因为此时卫星的运行方向与地平面的夹角逐渐减小。随着轨道高度的增加，平稳变化的仰角范围也逐渐减小，当轨道高度为 2 000 km 时，卫星在 $0 \sim 90^\circ$ 仰角的 TA 变化率均较大。

基于图 4 的仿真场景得到卫星的角速度之后，可以得到服务链路的长度与时间的关系：

$$d_{\text{serve}} = \sqrt{r_{\text{earth}}^2 + r_{\text{sat}}^2 - 2r_{\text{earth}} r_{\text{sat}} \cos \omega t} \quad (4)$$

式中： r_{earth} 为地球半径； r_{sat} 为卫星的轨道半径； ω 为前文计算得到的卫星运动角速度； t 是时间。

两边对 t 求导即可得到服务链路距离变化速度，如图 6 所示，为卫星从 90° 仰角一直运动到右侧 0° 仰角的服务链路距离的变化速率。随着卫星的运动，服务链路的距离变化速率呈增大趋势，并且随着卫星轨道的降低，服务链路的距离变化速率的最大值会增大，TA 的变化率也会增大。当轨道高度为 500 km 时，服务链路的距离变化速率最大可达 7 054.98 m/s，卫星运行过程中会更快达到定时误差门限。当轨道高度为 2 000 km 时，服务链路的距离变化速率最大达到 5 246.58 m/s。因此低轨卫星的高动态特性对轨道更低的卫星影响更大。

3.2 基于迭代的定时提前仿真与分析

卫星过境的过程中，基于迭代的 TA 计算，对服务链路的 TA 进行仿真。仿真过程考虑了卫星和地面用户移动、迭代之后的服务链路时延大小以及是否加入迭代对服务链路 TA 估计影响，仿真结果如图 7 和图 8 所示。

表3 仿真参数设置

Table3 Simulation parameter setting	
parameter	value
orbital altitude/km	2 000, 1 500, 500
earth radius/km	6 370
user speed/(km·s ⁻¹)	500
mass of earth /kg	5.965×10 ²⁴
gravitational constant/(N·m ² ·kg ⁻²)	6.672 59×10 ⁻¹¹
activation function	ReLU
loss function	MSE
optimizer	Adam optimizer
hidden layers	2
number of neurons	128(first layer), 64(second layer)

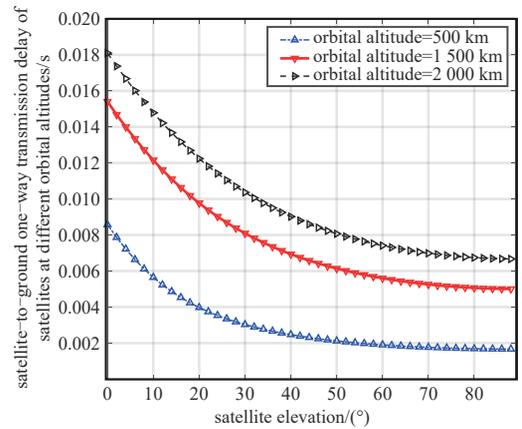


Fig.5 The variation of elevation angle vs. low orbit satellite TA at different altitudes

图5 不同高度的低轨卫星 TA 随仰角的变化

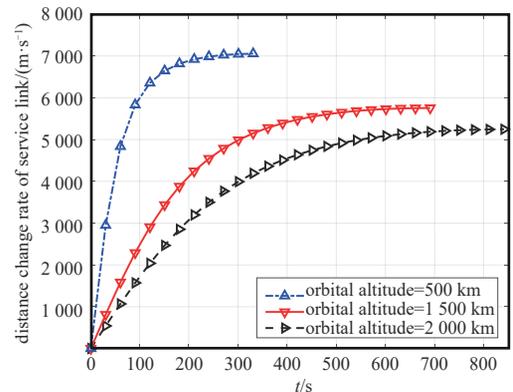


Fig.6 Distance change speed of service link

图6 服务链路距离变化速度

图 7 为星地双动态场景下，考虑了卫星和地面用户的高速移动之后，迭代后得到的服务链路的 TA。从图中可以看出，随着列车和卫星的运动，星地之间的 TA 先快速减小，再快速增大，整体呈“V”字型。当轨道高度为 500 km 时，迭代后的 TA 最小为 0.001 668 s。随着轨道高度的增加，星地之间传输时延增大，对应的用户端的 TA 值也增大，当轨道高度为 2 000 km 时，迭代后的 TA 最小为 0.006 667 s。由于在仿真过程中卫星和地面用户先相向运动，经过星地通信的最近点之后，卫星和用户距离快速增大。由于地面高速移动用户的运动，相较于第 1 次 0° 仰角，第 2 次 0° 仰角时，低轨卫星到地面用户的距离更大，因此 TA 更大，符合理论预期。图 8 为是否考虑移动与迭代的 TA 估计差异，由于 TA 估计的差异主要取决于 t_0 时刻低轨卫星与用户之间的距离，卫星在信号传输该距离的时间内所运行的距离是决定 TA 估计差异的主要因素，因此该差异与服务链路整体 TA 有相同的变化趋势。当轨道高度为 500 km 时，TA 的最大估计差异为 2.25×10^{-7} s；随着轨道高度的增大，TA 的估计差异也随之增大，当轨道高度为 2 000 km 时，TA 的最大估计误差为 4.33×10^{-7} s，符合理论预期。

3.3 基于神经网络的 TA 预测仿真与分析

基于迭代后的 TA 及卫星的坐标结果，进一步基于神经网络对未来的卫星坐标和对应的 TA 进行预估计。神经网络模型为基于 2 层隐藏层的 MLP 架构，第 1 个隐藏层包含 128 个神经元，第 2 个隐藏层包含 64 个神经元，采用 Adam 优化器，并采用整流线性单元(Rectified Linear Unit, ReLU)作为激活函数以及均方误差(Mean Square Error, MSE)作为损失函数来衡量预测值与真实值之间的差异。仿真使用的数据集包含了卫星轨迹信息和时间信息，每 0.1 s 记录一次卫星的坐标数据，这些数据代表了卫星在特定时间点的位置信息，为学习运动规律提供了基础。在数据处理阶段对原始数据进行预处理以适应神经网络的输入要求，然后将数据集分割为训练集和测试集，确保模型能够进行有效的测试和验证。仿真中输入的数据集为前 100 s 的卫星位置坐标，进行 200 轮学习，批处理参数设置为 100。输出层包含 2 个神经元，分别对应卫星位置的 X 坐标与 Y 坐标。

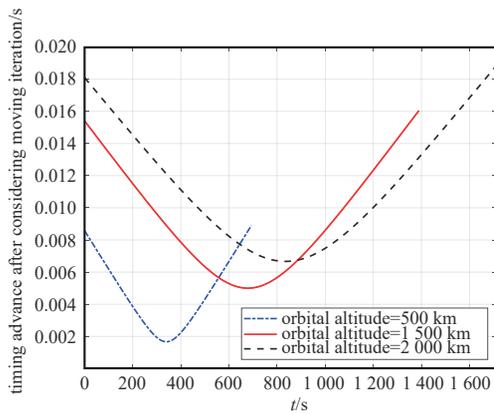


Fig.7 TA result after iteration
图 7 迭代后的 TA 结果

通过上述网络对未来 10 s，即卫星运行的 100~110 s 的坐标进行预测，计算卫星的速度、加速度以及加速度的变化率，再计算预测的位置坐标的 TA 并与仿真背景中计算得到的真实的 TA 进行对比，二者的差值如图 9 所示。

从图中可以看出，随着预测时间的增长，服务链路 TA 的预测误差逐渐增大，在第 110 s 时，最大误差值为 4.806×10^{-5} s。这是由于神经网络无法完全准确地预测真实位置坐标，随着预测的时间点距离输入数据集的最终时间越远，一方面由于误差的累积，另一方面在基于已有数据的学习后，随着预测时间的延长，数据的外推导致的不确定性也会增大，因此误差会随着预测时间的延长而增大。但 10 s 内总体的预测误差维持在 10^{-5} 数量级，当低轨卫星的轨道高度为 2 000 km 时，星地最大传输时延为 0.018 s，估计得

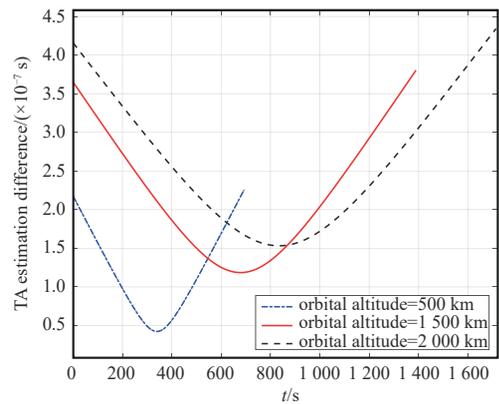


Fig.8 The difference of TA estimation between iterative algorithm and non-iterative algorithm
图 8 迭代算法与非迭代算法得到的 TA 估计的差异

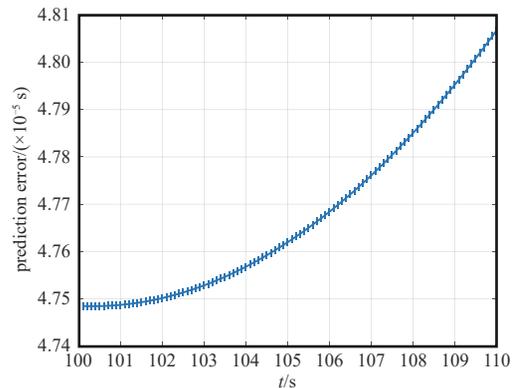


Fig.9 Prediction error of service link TA
图 9 服务链路 TA 的预测误差

到的 TA 值远小于星地通信的传输时延。因此基于历史星历信息结合神经网络的预测可以获得较为准确的卫星坐标,并通过基站下发或用户自主估计变化率的方式,提高 TA 估计的有效性。

4 结论

本文基于低轨卫星星地通信的背景,针对低轨卫星高动态的特点,提出一种低轨卫星通信的定时提前计算方法,并通过仿真分析验证了所提方案的有效性。下一步的研究工作将基于实际的卫星轨道和地面站信息,对所提出的算法做进一步的完善。

参考文献:

- [1] IMT-2030(6G)推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 北京:IMT-2030(6G)推进组, 2021. (IMT-2030(6G) Promotion Group. 6G overall vision and potential key technologies white paper[R]. Beijing:IMT-2030(6G) Promotion Group, 2021.)
- [2] 林楠. 威胁绿色地球:十大环境问题[EB/OL]. [2023-12-30]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/22837937>. (LIN Nan. Threatening the green earth:top ten environmental issues[EB/OL]. [2023-12-30]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/22837937>.)
- [3] LABIDI W, DEPPE C, BOCHE H. Secure identification for Gaussian channels and identification for multi-antenna Gaussian channels[DB/OL]. (2020-11-20)[2023-12-30]. <https://arxiv.org/abs/2011.06443>.
- [4] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学, 2020,36(6):1-13. (CHEN Shanzhi. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020,36(6): 1-13.)
- [5] 高时汉,王全振,熊韬. 低轨卫星互联网系统星间回传链路研究[C]// 第十七届卫星通信学术年会. 北京:中国通信学会, 2021:5. (GAO Shihan,WANG Quanzhen,XIONG Tao. Research on inter satellite return link of LEO satellite internet[C]// The 17th Academic Annual Conference on Satellite Communications. Beijing:China Institute of Communications, 2021:5.)
- [6] 方应勇,李晴飞. 低轨卫星互联网系统应用服务的研究[J]. 无线互联科技, 2020,17(22):11-13,28. (FANG Yingyong,LI Qingfei. Analysis on application services of LEO satellite Internet system[J]. Wireless Internet Science and Technology, 2020,17(22):11-13,28.) doi:10.3969/j.issn.1672-6944.2020.22.005.
- [7] 王子剑,杜欣军,尹家伟,等. 低轨卫星互联网发展与展望[J]. 电子技术应用, 2020,46(7):49-52. (WANG Zijian,DU Xinjun,YIN Jiawei,et al. Development and prospect of LEO satellite Internet[J]. Application of Electronic Technique, 2020,46(7):49-52.) doi:10.16157/j.issn.0258-7998.200344.
- [8] 百度百科. 铱星[EB/OL]. [2023-12-30]. <https://baike.baidu.com/item/%E9%93%B1%E6%98%9F/2943932>. Baidu Baike. Iridium satellite[EB/OL]. [2023-12-30]. <https://baike.baidu.com/item/%E9%93%B1%E6%98%9F/2943932>.
- [9] 测绘学报. "下一代铱"组网发射,首个互联网星座完成部署|评论[EB/OL]. (2019-01-18)[2023-12-30]. https://www.sohu.com/a/289925507_772793. (Acta Geodaetica et Cartographica Sinica. "Next generation Iridium" networking launch,deployment of the first Internet constellation completed|Comment[EB/OL]. (2019-01-18)[2023-12-30]. https://www.sohu.com/a/289925507_772793.)
- [10] 苏昭阳,刘留,张嘉驰,等. 面向智能高铁的低轨卫星通信发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2023,4(3):88-98. (SU Zhaoyang,LIU Liu,ZHANG Jiachi,et al. Review of the development of low earth orbit satellite communication for smart high-speed railway[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023,4(3):88-98.) doi:10.11959/j.issn.2096-8930.2023034.
- [11] SU Mudan,SU Xing,ZHAO Qile,et al. BeiDou augmented navigation from low earth orbit satellites[J]. Sensors, 2019,19(1):198. doi:10.3390/s19010198.
- [12] 左赛春,曹世博,王阳阳. 全球低地球轨道互联网卫星星座竞争格局与面临的挑战[J]. 中国航天, 2018(5):42-45. (ZUO Saichun,CAO Shibo,WANG Yangyang. Competitive landscapes and challenges of LEO Internet satellite constellations[J]. Aerospace China, 2018(5):42-45.) doi:10.3969/j.issn.1002-7742.2018.05.013.
- [13] 苏昭阳,刘留,郭志斌,等. 面向低轨卫星的星地信道特性研究与仿真[J]. 无线电通信技术, 2023,49(5):866-874. (SU Zhaoyang,LIU Liu,GUO Zhibin,et al. Research and simulation of satellite-ground channel characteristics for LEO satellites[J]. Radio Communications Technology, 2023,49(5):866-874.) doi:10.3969/j.issn.1003-3114.2023.05.011.
- [14] 3GPP. Requirements for support of radio resource management(FDD):TS 25.133 V2.3.0 (1999-12)[S]. Geneva:3GPP, 2023.
- [15] 方红雨. 基于 5G 的低轨卫星随机接入方案的研究与设计[D]. 北京:北京邮电大学, 2021. (FANG Hongyu. Research and design on random access scheme for 5G based LEO satellite communication system[D]. Beijing, China: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.) doi:10.26969/d.cnki.gbydu.2021.000932.