

基于补偿和预测的低轨卫星频率同步方法

段相龙¹, 刘 留¹, 苏昭阳¹, 蔡雨尘¹, 高一博¹, 尹 毅², 宁丽鹏¹

(1. 北京交通大学, 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, 是天地一体化融合网络的重要组成部分。LEO 卫星的高移动速度造成了大多普勒频偏与其变化率, 因此需要新的低轨卫星背景下的初始接入和链路跟踪过程中的频偏估计策略。基于该场景, 首先介绍频率同步的相关信号, 并针对 LEO 卫星的特点, 提出基于补偿的初始接入和基于 PTRS 信号的频率跟踪策略。通过仿真验证了所提方案的有效性, 该方案为 LEO 卫星通信系统的设计提供了参考。

关键词: 低轨卫星; 频率同步; 初始接入; 频率跟踪; 神经网络

中图分类号: TN927.2

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025020

Frequency Tracking and Synchronization Strategy for Low Earth Orbit Satellites Based on Compensation and Prediction

DUAN Xianglong¹, LIU Liu¹, SU Zhaoyang¹, CAI Yuchen¹, GAO Yibo¹, YIN Yi², NING Lipeng¹

1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
2. China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China

Abstract: As an important supplement to the ground network, the low earth orbit (LEO) satellite network is an important component of the integrated network of space and earth. Due to the high moving speed of LEO satellites, a large Doppler frequency offset and its rate of change are caused, so a new frequency offset estimation strategy is needed in the initial access and link tracking process under the background of low earth orbit satellites. Based on this scenario, this paper first introduces the related signals of frequency synchronization, and proposes a compensation-based initial access and a PTRS signal-based frequency tracking strategy based on the characteristics of LEO satellites. The effectiveness of the proposed scheme is verified through simulation, this scheme provides a reference for the design of LEO satellite communication system.

Keywords: LEO satellite, frequency synchronization, initial access, frequency tracking, neural network

0 引言

自 2019 年 5G 网络大规模部署以来, 地面通信已迈入 5G 时代。然而, 由于全球约 71% 被海洋覆盖, 30% 陆地已沙漠化^[1], 加之经济和技术限制, 目前地面通信网络仅覆盖约 20% 的陆地面积^[2]。6G 移动通信系统将构建天地一体化融合网络, 实现全场景无缝覆盖^[3]。卫星通信

系统作为该网络的重要组成部分, 在提升网络覆盖范围、满足偏远地区通信等方面发挥关键作用^[4], 将卫星通信作为地面移动通信的生态系统的补充已经成为新一代通信发展的趋势。

常见的通信卫星按轨道高度不同可分为低轨卫星、中轨卫星和地球同步轨道卫星^[5]。目前我国主要使用地球同步轨道卫星实现手机直连^[6], 但其发射成本高、通

收稿日期: 2025-01-11; 修回日期: 2025-05-30

通信作者: 刘留, liuliu@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62341102, No. 62221001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62341102, No. 62221001)

信时延与路径损耗大，难以满足时延敏感型业务的需求^[7]。低轨（Low Earth Orbit, LEO）卫星轨道低，具备更低的传输时延和路径损耗，便于降低终端复杂度与通信成本。随着点波束、频率复用等技术在LEO系统中的应用，LEO已成为构建6G天地一体化融合网络的关键支柱^[8]。

近年来，全球低轨卫星系统建设持续加速。国外的铱星、Starlink等已部署大规模LEO卫星星座，以实现全球覆盖^[9]。其中Starlink计划发射超万颗卫星，打造全球高速低时延通信系统。我国也在加快布局，推动“虹云工程”和“鸿雁星座”建设^[10]，并在2021年成立中国卫星网络集团有限公司，标志着我国低轨卫星互联网建设进入新阶段。

考虑星地通信与地面系统差异，地面移动通信技术不能直接应用到卫星通信中，为增强兼容性，3GPP参考5G新空口（New Radio, NR）标准提出卫星空口设计方案，并将多种信号引入非地面网络（Non-Terrestrial Networks, NTN）场景，使卫星通信逐步融合至5G体系^[11]。在移动通信中，终端开机后需先完成初始同步，再在链路建立后持续跟踪频偏以维持同步，但在低轨卫星场景下面临以下两大技术难点。

（1）星地通信时延大：由于LEO卫星轨道高度远高于地面网络，通信路径可达数千千米，信号传播时延显著，削弱了频偏调整的实时性，尤其在高速动态场景下加剧了链路不稳定性。

（2）多普勒频偏及其快速变化：LEO卫星运行速度超过7 km/s，导致显著的多普勒频偏。以600 km高度为例，频偏最高达24 ppm，变化率达0.27 ppm/s^[12]，此外，地面终端的环境和硬件差异（如晶振）也带来了额外频偏，传统频偏估计算法难以适应这种高动态变化，多普勒频偏的快速变化会增加基站频偏跟踪的复杂性，并显著提高信令开销，对系统资源造成较大压力。

在低轨卫星通信中，频率同步是实现可靠通信的关键技术，现有方法主要包括盲估计和数据辅助（Data Aided, DA）。其中DA算法通过引入训练序列进行时频估计，估计更快速准确，实际应用更广泛。参考文献[13]利用共轭特性和长序列特性完成前导序列设计，并通过基于分数傅里叶变换的上行同步检测方法，提高了同步性能。参考文献[14]在一个正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）符号中引入两段m序列，提出了两级滑动差分相关算法，在增加了复

杂度的代价下提高了时频估计精度。参考文献[15]利用主同步信号（Primary Synchronization Signals, PSS）序列的时域对称特性、恒包络特性和卫星的信道特性，设计了在单径和多径衰落信道中的低复杂度频偏估计算法。尽管已有研究在频率同步方面取得进展，但在应对快时变、高动态的低轨场景中仍存在不足。因此，本文围绕频率同步的关键需求，提出技术增强与优化设计以满足系统可靠性需求。在初始同步阶段提出两步初始接入：首先基于星历信息和用户的全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）信息进行几何分析并预补偿，再基于同步信号块对残余多普勒频偏进行修正。在频率跟踪阶段，提出了基于相位跟踪信号（Phase Tracking Reference Signal, PTRS）的3步频率跟踪策略：首先提取PTRS相位差；然后利用长短期记忆（Long Short Term Memory, LSTM）神经网络预测未来相位；最后估计对应的多普勒频偏。仿真结果表明，所提策略可在初始接入和频率跟踪阶段实现多普勒频偏估计。

1 初始接入同步

在NR系统中，终端开机后通过小区搜索和随机接入过程接入小区中，小区搜索是终端与基站建立通信的第一步，其性能直接影响到后续的信号传输。而复杂的信道条件、低信噪比和大载波频偏给小区搜索带来更大挑战。为应对这些挑战，NR引入同步信号块（Synchronization Signal Block, SSB）的设计，SSB传输的时域和频域位置可以灵活配置，还支持波束扫描传输以增强覆盖。这些新特性进一步增加小区搜索的复杂度，用户为与基站取得通信，终端需要在它所支持的频段内搜索可用小区并获得该小区的工作频率，与基站进行时间同步。许多应用场景要求较短的处理时间和较高的实现精度，同时终端对低功耗的需求也更高，因此需要设计更高效的算法以满足性能需求。

1.1 同步流程

3GPP协议定义用户设备（User Equipment, UE）接入网络过程中频率和时间同步可在主同步信号（Primary Synchronization Signal, PSS）和辅助同步信号（Secondary Synchronization Signal, SSS）译码过程中实现，主要过程如下。

（1）终端将接收器射频调谐到指定频率点。

（2）在时域对PSS进行互相关检测，时域同步后获得小区ID2。在同步信号块的第一个OFDM符号中仅包含PSS信号，因此可以通过相关检测获取时域同步信息，同

则, SSS的Gold序列由两个生成多项式决定, 其中 m_1 共有112种取值, 由 N_{ID}^1 确定; m_0 共有9种取值, 由 N_{ID}^1 和 N_{ID}^2 共同确定; m_0 的取值与关联的目的是降低PCI检测错误的概率。

1.4 初始接入增强方案

在低轨卫星星地通信场景中, 由于卫星高速运动, 初始接入阶段面临的多普勒频偏远高于地面通信网络。基站端可以周期性地通过星历数据获取卫星的精确位置, 用户设备则能够通过GNSS获取自身的位置信息, 基于这些位置信息和运动参数, 通过几何模型推导出卫星与用户之间理论上的多普勒频偏值。将该计算值作为预补偿参数导入通信系统, 可以在用户设备接入前对大多普勒频偏进行初步校正, 从而显著降低初始接入阶段的频偏大小。初始接入几何补偿示意如图2所示。

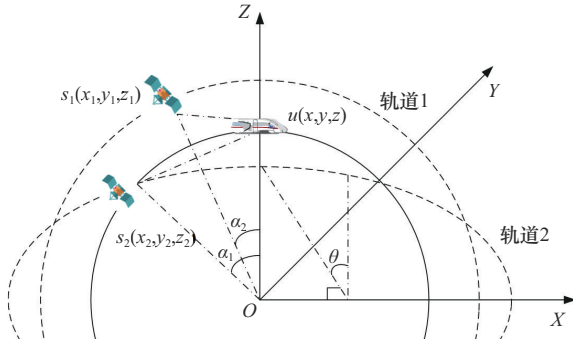


图2 初始接入几何补偿示意

如图2所示, 以地球中心为原点假设用户位置为 $u(x, y, z)$, 能够与该用户建立通信链路的低轨卫星的轨道为 $s_2(x_2, y_2, z_2)$ 位置的低轨卫星所处的轨道, 该轨道与 XZ 平面的夹角为 ϕ_1 , 低轨卫星在初始接入时刻与地球中心的连线与 OZ 轴的夹角为 θ 。当 $\theta = 0$, 此时的低轨卫星会从用户正上方通过, 低轨卫星在初始接入时刻与地球中心的连线与 OZ 轴的夹角为 α_1 。通过计算低轨卫星在该点的速度矢量、轨道切向量以及载频, 可以进一步求得该点的多普勒频偏。其中, 速度大小可由下式计算

$$v = R \sqrt{\frac{GM}{R^3}} \quad (8)$$

式中, G 为地球引力常数, M 为地球质量, R 为卫星到地球中心的距离。

通过坐标变换和几何推导可得, 对于任意轨道倾角为 θ 的低轨卫星轨道, 其轨道方程可简化为

$$\begin{cases} x^2 + (z \cos \theta - y \sin \theta)^2 = R^2 \\ y \cos \theta + z \sin \theta = 0 \end{cases} \quad (9)$$

低轨卫星在该轨道上的任意点位的速度方向矢量为

$$\mathbf{v} = (-2(z \cos \theta - y \sin \theta), -2x \sin \theta, 2x \cos \theta) \quad (10)$$

用户到卫星的矢量为

$$\mathbf{u} = (x_1 - x, y_1 - y, z_1 - z) \quad (11)$$

但由于低轨卫星轨道存在误差以及其他引起多普勒频偏的原因, 在预补偿之后需要通过同步信号块中的同步信号进一步校正。同步信号具备高精度和高时效性, 首先通过计算接收信号与3个PSS候选序列的相关性, 确定最大相关值的位置, 从而获得初步的频率同步和粗略的时间对齐, 同时也锁定当前的主小区标识范围, 在精同步阶段, UE会利用SSS的特性与本地生成的参考序列进行高精度相关运算, 进一步校正因本地振荡器漂移或多普勒效应引起的频率误差, 所以能够针对剩余频偏进行精确补偿, 从而实现用户设备在初始接入阶段的频率同步。

2 星地通信频率跟踪方案

低轨卫星的多普勒频偏的变化率远高于地面网络, 并且低轨卫星通信存在较大的星地传播时延, 基站需要频繁向用户设备下发多普勒频偏调整指令, 这不仅导致频繁的信令交互, 显著增加系统的信令开销, 还对有限的系统资源造成较大压力, 进而降低通信效率和整体性能。基于该背景, 本文提出基于相位跟踪信号的频率跟踪策略。PTRS信号具有高时域密度和低频域密度的特点, 所需系统资源少, 其高时域密度的特性适合用于跟踪高动态低轨卫星通信环境下多普勒频偏的快速变化特性, 并且PTRS信号本身用于通信的相位噪声跟踪, 基于该信号进行频率跟踪也可提升通信资源使用率。再结合PTRS信号估计的结果和神经网络的预测, 神经网络可以通过学习低轨卫星通信环境中的多普勒变化规律, 基于历史数据预测未来的频偏变化趋势, 实现多普勒频偏的精确跟踪。

2.1 相位跟踪信号

PTRS是NR新引入的参考信号, 主要作用是跟踪相位噪声的变化。相位噪声源自射频器件在多种噪声(如白噪声、闪烁噪声等)作用下引起的系统输入信号相位的随机变化。频率越高, 相位噪声越高, 因此PTRS主要应用在高频段, 这也符合低轨卫星星地通信的频段要求。由于相位噪声引起的共相位误差在整个频带上具有相同的频域特性, 在时间上具有随机的相位特性, 因此PTRS在时域上密度较高, 但是在频率上的密度较低。PTRS信号的配置主要有两个参数决定: 时域密度(Time Density, TD)参数和频域密度(Frequency Density, FD)参

数。不同调制编码方案 (Modulation and Coding Scheme, MCS) 对应的 PTRS 时域密度见表 2。

表 2 不同调制编码方案对应的 PTRS 时域密度

MCS	时域密度
IMCS ≤ ptrs-MCS1	没有 PTRS
ptrs-MCS1 < IMCS ≤ ptrs-MCS2	4
ptrs-MCS2 < IMCS ≤ ptrs-MCS3	2
ptrs-MCS3 < IMCS ≤ ptrs-MCS4	1

在表 2 中, IMCS 代表当前调度的调制编码方案, UE 通过下行控制信息获得其具体取值, MCS 的值和当前的无线环境的信干噪比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) 相关, SINR 值高, MCS 值也越大。具体门限值在基站配置后, 通过高层参数通知 UE。通过表 2 可知, IMCS 值越大, 时域密度也越大。由于调制阶数越高, 对相位噪声越敏感, 因此在时域上加密 PTRS, 以便更好地跟踪相位变化。

不同 RB 对应的 PTRS 频域密度见表 3, 高层参数配置两个 RB 值, 分别是 NRB0 和 NRB1。UE 根据下行控制信息中的频域资源分配字段获得分配给下行物理共享信道 (Physical Downlink Shared Channel, PDSCH) 的 RB 数, 与门限进行对比, 确定 PTRS 信号的频域密度。

表 3 不同 RB 对应的 PTRS 频域密度

带宽	频域密度
NRB < NRB0	没有 PTRS
NRB ≤ NRB < NRB1	2
NRB1 ≤ NRB < NRB2	4

其中, NRB 代表当前 PDSCH 调度的 RB 数, gNB 配置后, 通过高层参数通知 UE。

2.2 基于 PTRS 信号的频偏估计

考虑在一个 OFDM 符号内有一个时变的多普勒频偏和一个加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 信道, 接收的模拟信号可表示为

$$y_t = x_t \exp \left[j \left(2\pi \int_0^t f_{\text{Doppler}}(\tau) d\tau + \theta_0 \right) \right] + n_t \quad (12)$$

其中, y_t, x_t 和 n_t 分别代表时间 t 处的接收信号、发送信号和噪声。 $f_{\text{Doppler}}(\tau)$ 是时间 τ 处的多普勒频偏, θ_0 是一个初始未知相位。

经过模拟到数字 (A/D) 转换后, 离散信号可表示为

$$y_k \approx x_k \exp \left[j \left(2\pi \sum_{p=1}^k f_{\text{Doppler}}(p) T_s + \theta_0 \right) \right] + n_k \quad (13)$$

其中, $t = kT_s$, T_s 是采样间隔, $k = 0, 1, \dots, N + L - 1$, L 是循环前缀 (Cyclic Prefix, CP) 的长度, N 是一个 OFDM 符号的长度。在开始时刻的多普勒频偏 $f_{\text{Doppler}}(\tau)$ 包含在初始相位 θ_0 中。

定义一个归一化的时间变化多普勒频偏为

$$\varepsilon_p = \frac{f_{\text{Doppler}}(p)}{\Delta f_{\text{subcarrier}}} \quad (14)$$

其中, $\Delta f_{\text{subcarrier}} = \frac{1}{NT_s}$ 是子载波间隔 (Hz)。式 (14) 可重写为

$$y_k = x_k \exp \left[j \left(\frac{2\pi}{N} \sum_{p=1}^k \varepsilon_p + \theta_0 \right) \right] + n_k \quad (15)$$

虽然多普勒频偏在长时间内是非线性变化的, 但由于 PTRS 信号时域密度大, 可以假设在两个 PTRS 信号之间多普勒频偏变化是线性的, 即恒定的多普勒频偏变化率

$$\varepsilon_p = \varepsilon_0 + \alpha p \quad (16)$$

其中, α 是恒定归一化多普勒率。然后接收到的信号可表示为

$$y_k = x_k \exp \left[j \left(\frac{2\pi}{N} \sum_{p=1}^k (\varepsilon_0 + \alpha p) + \theta_0 \right) \right] + n_k \quad (17)$$

在发射端发射 PTRS 信号之后, 根据不同时域密度的 PTRS 信号, 可以假设其中占据两个时频资源元素的 PTRS 信号可表示为

$$x(l_s, n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(l_s, k) e^{j \frac{2\pi nk}{N}} \quad (18)$$

$$x(l_{s+t}, n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(l_{s+t}, k) e^{j \frac{2\pi nk}{N}} \quad (19)$$

其中, t 为不同时域密度的 PTRS 配置下对应的两个 PTRS 信号相隔的时间。对应的接收信号即为

$$y(l_s, n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) X(l_s, k) e^{j \frac{2\pi nk}{N}} e^{j \left(\frac{2\pi n \varepsilon_s}{N} + \varphi_s \right)} \quad (20)$$

$$y(l_{s+t}, n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) X(l_{s+t}, k) e^{j \frac{2\pi nk}{N}} e^{j \left(\frac{2\pi n \varepsilon_{s+t}}{N} + \varphi_{s+t} \right)} \quad (21)$$

将发射信号与接收信号做相关可得

$$C_1 = x^*(l_{s+t}, n) y(l_{s+t}, n) \quad (22)$$

$$C_2 = x^*(l_s, n) y(l_s, n) \quad (23)$$

多普勒频偏大小为

$$f_d = \frac{\arg(C_1 C_2^*)}{2\pi t} \quad (24)$$

2.3 基于 PTRS 信号和 LSTM 神经网络的频率跟踪

低轨卫星高速移动导致多普勒频偏快速变化, 为保

障通信质量,基站需频繁下发多普勒频偏校正信息,这将导致较大的信令开销。此外,低轨卫星轨道高度在500~2 000 km,进而影响基站信令的时效性。基于前文内容,使用PTRS信号进行相位和多普勒频偏计算,并通过LSTM学习复杂轨道数据中的模式和关系,从而预测未来的相位和多普勒频偏。LSTM能够有效处理非线性关系,自动学习输入数据中的特征,捕捉潜在规律,从而减少信令下发频率,节省信道资源,并提高频偏估计的准确性。在低轨卫星星地通信过程中,卫星在不同位置和时间点的动态运动导致其相位偏移和多普勒频偏随时间变化呈现复杂的动态特性,进而构成时间序列问题。因此,采用LSTM进行预测具有显著优势。LSTM通过引入记忆单元和门控机制,能够有效捕捉时间序列中的长短期依赖关系,克服传统递归神经网络的梯度消失和爆炸问题。LSTM在处理时间序列数据时表现出较高的灵活性,能够捕捉低轨卫星相位和多普勒频偏与时间的非线性及时变关系,从而提高预测精度。在预测部分,模型输入为当前时刻的相位和多普勒频偏值,本文采用一个两层LSTM模型,模型输出为后续时间点的预测值。通过准确预测相位和多普勒频偏变化,可以显著提高卫星通信系统的稳定性和效率,减少由频率偏移引起的误码率,进一步增强通信链路的可靠性。

3 仿真分析

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轨道、不同位置时的坐标,以及卫星在对应时刻的运动信息。在低轨卫星与地面用户所有可能接入的轨道中,地面用户在低轨卫星的轨道平面上,即低轨卫星过境通过地面用户正上方时,卫星与地面用户之间具有最大的多普勒频偏以及多普勒频偏变化率,针对该最大值情况展开仿真,初始接入几何补偿示意如图3所示。

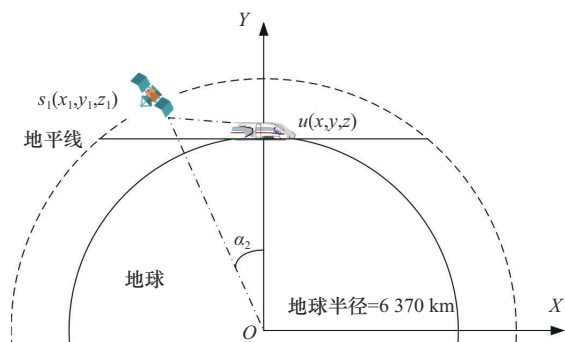


图3 初始接入几何补偿示意

由于低轨卫星的运动高度相较于地球半径较小,可以将卫星轨道和地球简化为圆形进行计算。以地心为坐标原点,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轴且通过原点的直线为X轴,X正半轴指向右侧。仿真参数设置见表4。

表4 仿真参数设置

参数	取值
轨道高度/km	500,1 000,2 000
地球半径/km	6 370
载波频率/GHz	20,30
子载波间隔/kHz	60
采样频率/MHz	50
地球质量/kg	5.965×10^{24}
重力常数/($\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$)	6.67259×10^{-11}
激活函数	ReLU
损失函数	最小均方误差
优化器	Adam 优化器
批大小	100

3.1 初始接入误差分析

在载波频率为20 GHz和30 GHz的条件下进行仿真,低轨卫星的轨道高度分别设为500 km、1 000 km和2 000 km。仿真基于上文中提出的两步初始接入增强策略,卫星从0°仰角运行到90°仰角过程中,几何补偿和真实多普勒频偏对比如图4所示。

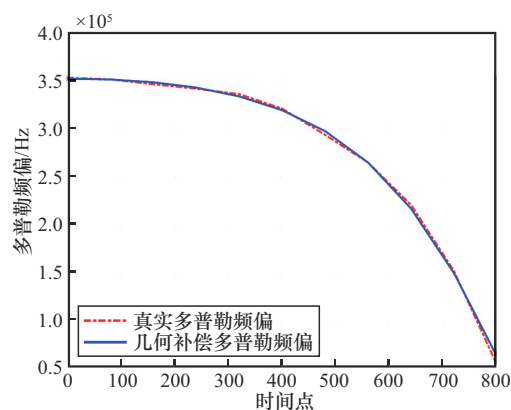


图4 几何补偿和真实多普勒频偏对比

如图4所示,通过星历数据和用户的GNSS定位信息预补偿,可以大幅降低第二步中需要补偿的残余多普勒频偏的大小,但由于还存在由电离层散射、卫星轨道高度衰减、晶振误差、卫星定位不准确等因素造成的额外多普勒频偏,需通过同步信号块对残余多普勒频偏进行补偿。不同条件的初始接入频偏误差如图5所示。

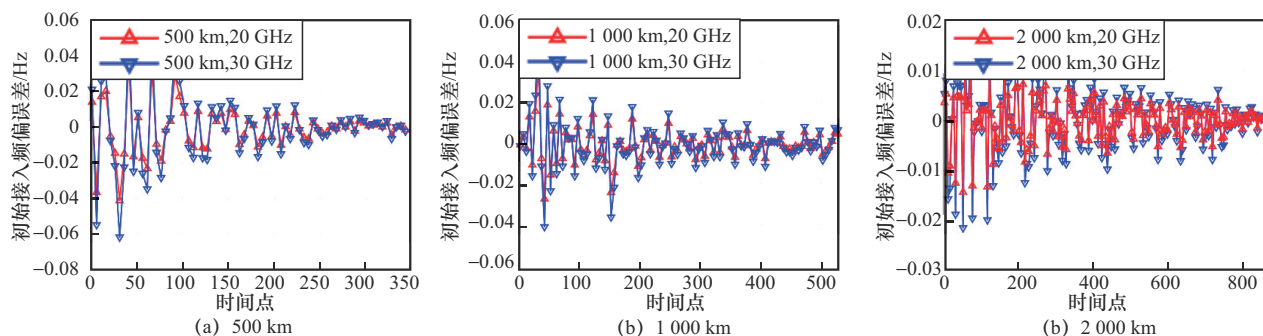


图5 不同条件的初始接入频偏误差

仿真结果表明,随着载波频率的升高,多普勒频偏估计误差增大。这是由于较高的载波频率放大了卫星高速运动和星地传播路径变化引起的多普勒效应。此外,随着卫星运行位置的变化,由于卫星与用户之间夹角的动态变化,真实的多普勒频偏也呈减小趋势,因此估计精度提高。随着低轨卫星轨道高度的降低,卫星的运行速度显著增加,导致更高的多普勒频偏,初始接入阶段多普勒频偏的估计误差也因此增大,符合理论预期。但多普勒频偏的估计误差总体上仍保持在较低水平,表明所提出的几何补偿结合同步信号的两步策略依然能够在较低误差的条件下实现初始接入的多普勒频偏的有效估计。

3.2 频率跟踪误差分析

3.2.1 相位误差分析

在频率跟踪部分,本文通过 PTRS 信号根据收发端信号计算相位以及多普勒频偏,并基于计算的结果和 LSTM 神经网络进行预测。该神经网络是一个时间序列预测模型,包括一个具有 550 个神经元的 LSTM 层和一个全连接层。LSTM 层将接收时间点和相位作为输入特征,利用其内置的记忆单元和门控机制,能够捕获时间序列中短期和长期的依赖关系,从而建模时间点与相位变化之间的动态关系。激活函数采用整流线性单元 (Rectified Linear Unit, ReLU),引入非线性特性以增强模型的能力。全连接层将 LSTM 层的输出映射为一个单一的相位预测值。模型以均方误差 (Mean Square Error, MSE) 作为损失函数,并通过自适应矩估计 (Adaptive Moment Estimation, Adam) 优化器进行优化,进而实现对未来一定时间内的采样点对应的相位以及频偏进行预测,从而实现频率跟踪。PTRS 信号是物理下行共享信道的一部分,本次仿真针对 PDSCH 进行仿真,由于 PDSCH 本身没有固定的周期性,其资源分配是由高层调度器动态决定的。调度器会根据用户信道质量指示 (Channel Quality Indicator, CQI)、服务质量 (Quality of Service, QoS) 和系统负载

等动态分配 PDSCH 资源,所以在本次仿真中 PDSCH 信道的周期为 20 个时隙,时域密度为 4,以研究在最低时域密度条件下该方法的频率跟踪性能,在接近 0° 仰角时展开仿真,不同训练轮数的预测相位误差如图 6 所示。

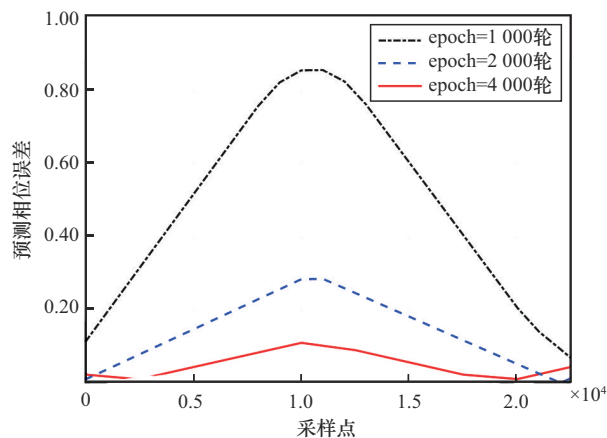


图6 不同训练轮数的预测相位误差

如图 6 所示,本次 LSTM 神经网络训练的轮数分别为 1 000 轮、2 000 轮和 4 000 轮,随着训练轮数的增大,预测得到的相位与真实的相位相比误差显著减小,并且当 epoch=4 000 轮时,相位的误差整体小于 0.10。并且由于还未出现相位误差的拐点,因此进一步提升训练轮数理论上可以进一步降低相位误差的大小。但随着训练的轮数增加,训练的时长也大幅提升,而低轨卫星的高动态特性导致在实际的星地通信过程中,神经网络的训练时间是有限的。所以具体应用需权衡预测时间和误差,仿真结果表明 LSTM 神经网络可以在低误差的结果下预测未来的信号相位。

3.2.2 预测频偏性能分析

基于预测的相位信息进一步计算预测得到的多普勒频偏结果,图 7 为多普勒频偏的预测值与真实多普勒频偏的对比情况,可知预测所得的多普勒频偏均在真实值附

近波动,但当 epoch=1 000 轮时多普勒频偏的波动幅度数量级达到 10^5 ,而随着训练轮数的增加,预测频偏的波动范围快速减小,当 epoch=4 000 轮时已趋近于真实的多普勒频偏。

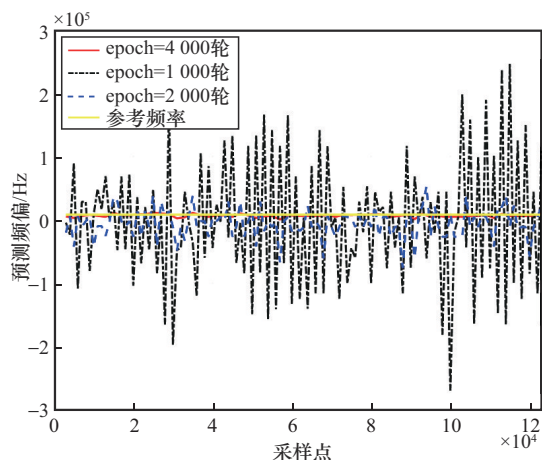


图7 不同训练轮数的预测频偏

进一步计算多普勒频偏的预测误差,图8分别为不同训练轮数在不同采样点上的多普勒频偏的预测误差情况,不同训练轮数误差的统计特性见表5。可以看到在 epoch=1 000 轮时,多普勒频偏的预测误差最大达约 2.3×10^5 Hz,随着训练轮数的增加,多普勒频偏预测误差显著下降,在 epoch=4 000 轮时预测误差除少数极端值约 7.8×10^3 Hz,其余大部分误差均在 2×10^3 Hz 附近波动,有较好的多普勒频偏预测性能。本文采用的 LSTM 神经网络相较于其他网络在预测时间序列模型时有更好的效果,使用多层感知机 (Multilayer Perceptron, MLP) 神经网络进行相同的预测任务训练进行比较,具体训练结果如图9所示。

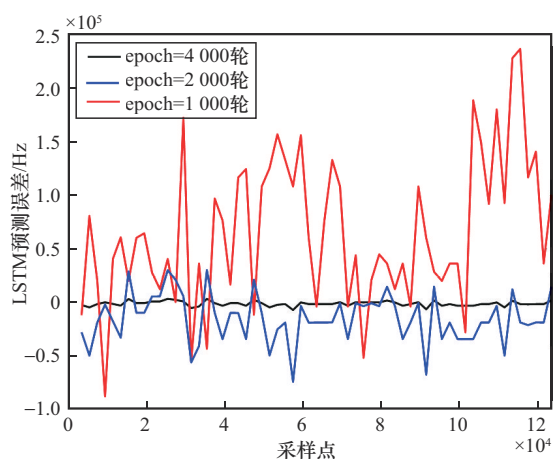


图8 不同训练轮数在不同采样点上的多普勒频偏的预测误差情况

表5 不同训练轮数误差的统计特性

轮数/轮	最大误差/Hz	平均误差/Hz	误差中位数/Hz	误差标准差/Hz
1 000	237 827	65 315	60 303	69 609
2 000	75 010	15 303	19 154	22 905
4 000	7 805	1 539	1 469	2 382

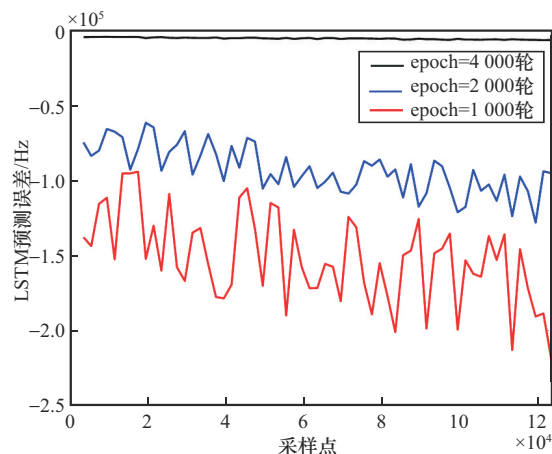


图9 MLP神经网络预测多普勒频偏误差

图9展示了使用 MLP 神经网络进行相同的预测任务时在不同训练轮数时的预测误差,随着训练轮数的增加,预测误差也大幅降低,并在 epoch=4 000 轮时表现出较好效果,进一步对比 LSTM 和 MLP 神经网络在时间序列预测任务中的误差变化趋势,如图10所示。

如图10所示, LSTM 随着训练轮数的增加,预测误差逐渐减小,表现出良好的收敛性及较高的预测精度,特别是在高轮数训练时显著优于 MLP。MLP 模型虽在预测阶段误差波动较小,但其对复杂时间序列关系的捕捉能力有限,导致预测精度提升受限。所以 LSTM 神经网络表现出更好的预测效果。

对 LSTM 和 MLP 神经网络进行进一步仿真,在不限仿真时间的情况下记录训练过程中预测的最优点,如图11所示,由于 LSTM 神经网络能更好地处理时间序列数据,适合处理具有时间依赖性或非线性的特征的时间序列,因此能在多普勒频偏预测任务中具有更好的性能。对 LSTM 神经网络的预测结果进行统计学分析,如图12所示。

图12为不同训练轮数的箱线图,随着训练轮数的增加,预测误差的中位数逐渐趋近于0,并且上下四分位的范围也更小,预测误差的波动范围更小,预测更精确。以上仿真结果表明,所提基于 PTRS 信号和 LSTM 网络的频偏跟踪策略能有效实现通信链路建立后的频偏跟踪。

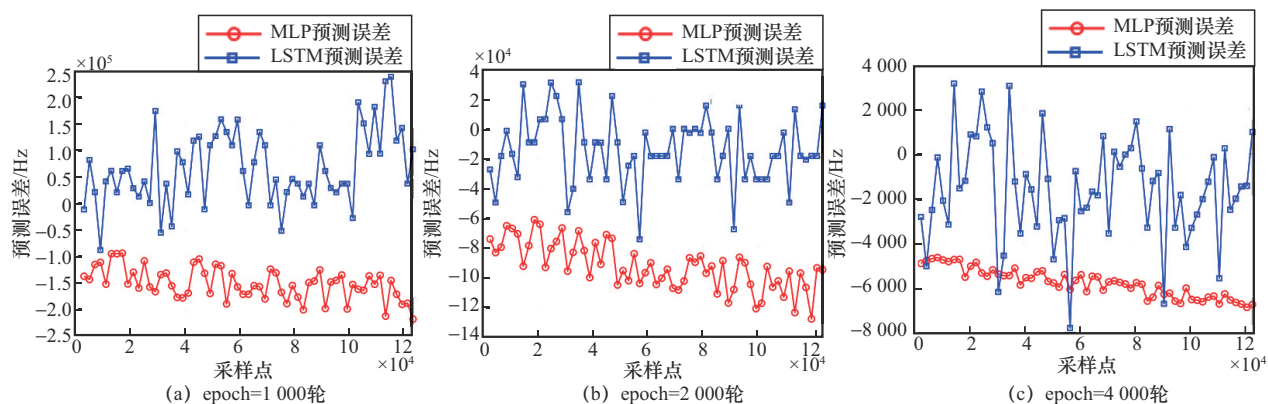


图10 LSTM和MLP神经网络在时间序列预测任务中的误差变化趋势

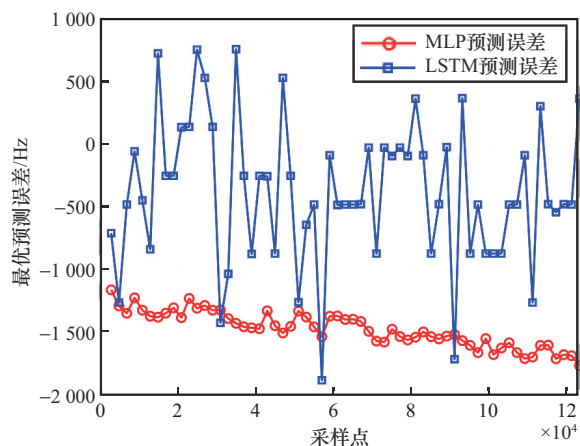


图11 LSTM和MLP神经网络最优预测效果对比

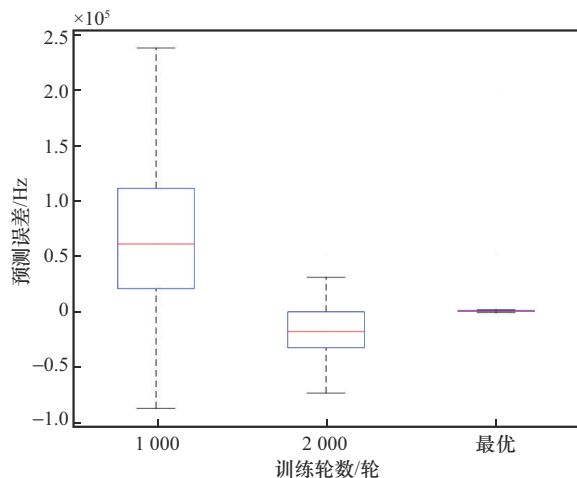


图12 LSTM预测误差箱线图

3.2.3 小频偏性能分析

由于在卫星过境过程中,从仰角 0° 到仰角 90° 再到仰角 0° 的过程中,低轨卫星星地通信的多普勒频偏呈现先减小后增大的Z字形趋势,图4为 0° 仰角到 90° 仰角的

过程中,真实多普勒频偏的变化情况。前文的仿真基于卫星仰角接近 0° 的情况,进一步基于前文的3步频率跟踪策略对仰角接近 90° 时的星地通信进行频率跟踪模拟,小频偏条件频偏跟踪误差分析如图13所示。

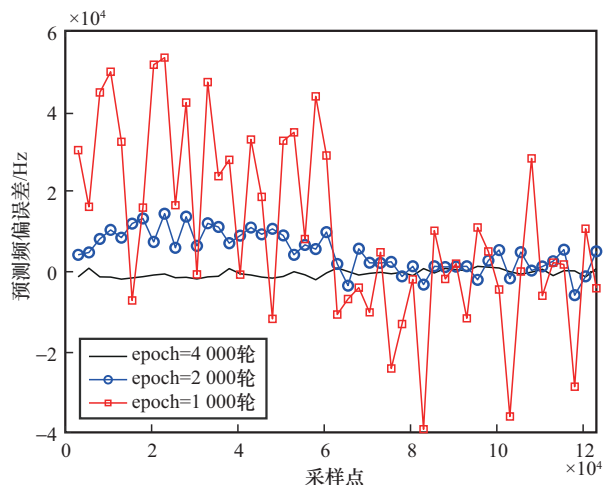


图13 小频偏条件频偏跟踪误差分析

如图13所示,在 90° 仰角的情况下,低轨卫星星地通信的多普勒频偏跟踪误差小于卫星仰角为 0° 时的频偏跟踪误差,这是因为在 90° 仰角时,低轨卫星星地通信的多普勒频偏更小,LSTM神经网络的预测误差也会减小。随着训练轮数的提高,预测频偏的误差显著减小,这是因为随着训练轮数的上升,LSTM神经网络学习时间序列的规律更准确,对未来的多普勒频偏也预测更准,符合理论预期。进一步分析多普勒频偏误差箱线图,如图14所示。

图14为不同训练轮数的箱线图,随着训练轮数的增加,预测误差的中位数逐渐大幅降低,并且上下四分位的范围也更小,预测误差的波动范围更小,预测更精确。

以上仿真结果表明,所提基于PTRS信号和LSTM神经网络的频偏跟踪策略能在卫星过境的大小频偏条件下,对于不同轨道高度的低轨卫星都能有效实现通信链路建立后的频偏跟踪。

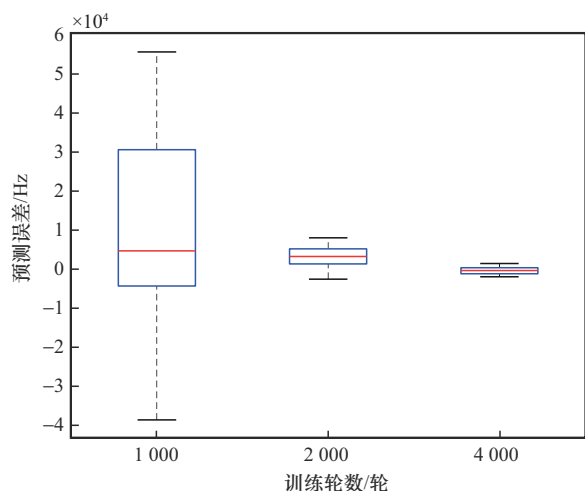


图14 小频偏条件不同训练轮数的箱线图

4 结束语

本文基于低轨卫星星地通信背景,针对低轨卫星的高动态特性,提出了两步初始接入策略和3步频率跟踪策略。在初始接入阶段,通过几何补偿显著减小了残余多普勒频偏的幅度,并结合同步信号块实现了精确的初始频率同步。然后在建立链路之后基于PDSCH信道中的PTRS信号结合LSTM神经网络对频偏变化情况进行预测,并实现了低误差情况下的频率跟踪。本文通过预补偿机制和高时域密度的PTRS信号实现了星地通信过程中的频率同步。

参考文献:

- [1] 林楠. 威胁绿色地球十大环境问题[EB]. 2016.
LIN N. Ten environmental problems threatening the green earth [EB]. 2016.
- [2] CHEN S Z, SUN S H, KANG S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication: the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. China Communications, 2020, 17(12): 156-171.
- [3] IMT-2030(6G)推进组. 6G总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 2021.
IMT-2030(6G) Promotion Group. 6G white paper on overall vision and potential key technologies[R]. 2021.
- [4] LABIDI W, DEPPE C, BOCHE H. Secure identification for Gaussian channels and identification for multi-antenna Gaussian channels [EB]. 2020.
- [5] 苏昭阳, 刘留, 艾渤, 等. 面向低轨卫星的星地信道模型综述[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(5): 1684-1702.
SU Z Y, LIU L, AI B, et al. Survey of satellite-ground channel models for low earth orbit satellites[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(5): 1684-1702.
- [6] 运营商财经网. 天地一体化新路径:手机直连卫星发展热点、挑战与关键技术[EB]. 2024.
Operator's Financial Network. A new path of integration of heaven and earth: development hotspots, challenges and key technologies of mobile phone direct-connected satellites[EB]. 2024.
- [7] 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 S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.
- [8] 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.
FANG Y Y, LI Q F. Analysis on application services of LEO satellite Internet system[J]. Wireless Internet Technology, 2020, 17(22): 11-13.
- [9] MCDOWELL J C. The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX starlink constellation[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2020, 892(2): L36.
- [10] SU M D, SU X, ZHAO Q L, et al. BeiDou augmented navigation from low earth orbit satellites[J]. Sensors, 2019, 19(1): 198.
- [11] 周文慧. 面向新一代低轨卫星的时频同步设计及同步算法研究[D]. 北京市: 北京邮电大学, 2022.
ZHOU W H. Research on time-frequency synchronization design and synchronization algorithm for a new generation of LEO satellites[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [12] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks(NTN) (Release 16): TR 38.821[S]. 2023.
- [13] 刘鑫. 低轨移动通信卫星多普勒预补偿及同步算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
LIU X. Research on Doppler pre-compensation and synchronization algorithm of LEO mobile communication satellite[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [14] NASRAOUI L, NAJJAR ATALLAH L, SIALA M. An efficient reduced-complexity two-stage differential sliding correlation approach for OFDM synchronization in the AWGN channel[C]//Proceedings of the 2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [15] HUANG M N, CHEN J, FENG S L. Synchronization for OFDM-

based satellite communication system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(6): 5693-5702.

[作者简介]



段相龙 (2001-), 男, 北京交通大学电子信息工程学院硕士生, 主要研究方向为卫星移动通信。

刘留 (1981-), 男, 博士, 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为无线信道测量与建模、时变信道信号处理、5G 关键技术、高铁宽带接入物理层关键技术等。

苏昭阳 (1998-), 男, 北京交通大学电子信息工程学院博士生, 主要研究方向为卫星通信、无线信道建模等。

蔡雨尘 (2001-), 女, 北京交通大学电子信息工程学院博士生, 主要研究方向为卫星通信。

高一博 (2002-), 男, 北京交通大学电子信息工程学院博士生, 主要研究方向为无线环境重构和卫星通信。

尹毅 (1981-), 男, 硕士, 主要研究方向为数字移动通信、调度通信。

宁丽鹏 (1980-), 男, 北京交通大学电子信息工程学院博士生, 主要从事卫星通信、通导融合通信的工程总体和实施工作, 全程参加多项重要工程, 具有丰富的工程设计、论证、实施经验。