



基于 ns-3 的 3GPP NTN 协议仿真平台设计与实现

陶虹妃¹, 孙敬张¹, 杨卫东², 孙军帅³, 曹春杰^{1*}

1. 海南大学网络空间安全学院 (密码学院), 海口 570228

2. 西安电子科技大学杭州研究院, 杭州 311231

3. 中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209

* 通信作者. E-mail: caochunjie@hainanu.edu.cn

收稿日期: 2025–11–01; 修回日期: 2026–01–24; 接受日期: 2026–02–24; 网络出版日期: 2026–03–06

摘要 非地面网络 (non-terrestrial network, NTN) 是 6G 实现全球覆盖与空天地一体化通信的关键. 针对现有仿真工具在 3GPP 标准兼容性与 NTN 动态拓扑建模方面的不足, 本研究设计并实现了基于 ns-3 的高保真 NTN 仿真平台. 具体工作包括: 构建 NTN 专用移动模型以支持卫星等高动态节点轨迹模拟; 依据 3GPP TS 38.331 标准扩展 ns-3 NR 模块的 RRC (radio resource control) 层, 准确模拟 NTN 连接管理流程; 实现物理层到应用层的完整 NTN 协议栈, 支撑端到端性能评估. 实验表明, 该平台可准确模拟卫星动态轨迹与传播时延, 支持完整端到端仿真, 为 6G NTN 关键技术研究提供了重要工具.

关键词 非地面网络 (NTN), RRC, 3GPP 标准, 6G, ns-3

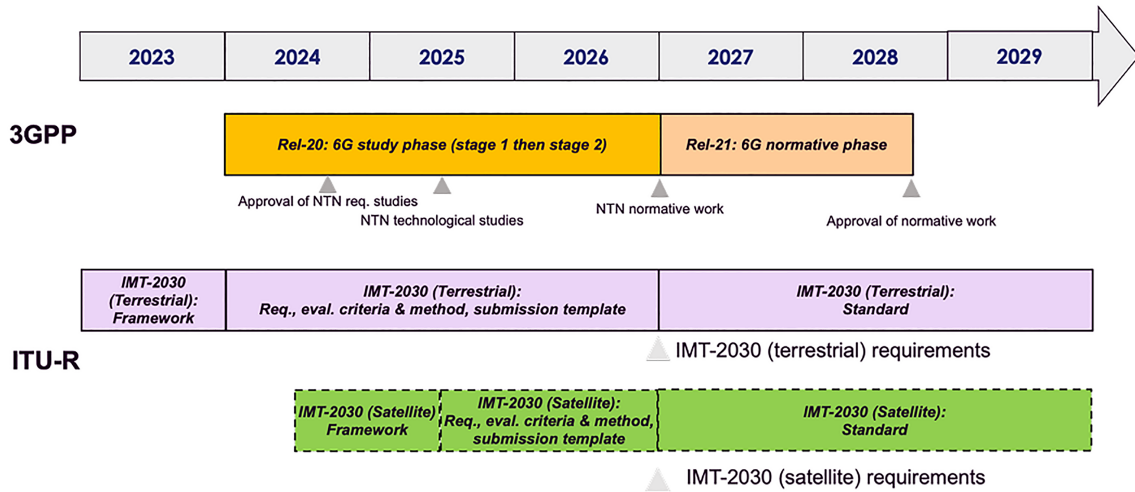
1 引言

随着第六代移动通信 (6G) 技术的快速演进, 非地面网络 (non-terrestrial network, NTN) 已成为实现全球无缝覆盖与空天一体化通信的重要组成部分^[1~3]. 通过将低轨 (LEO)、中轨 (MEO) 及地球静止轨道 (GEO) 卫星与地面蜂窝网络深度融合, NTN 可在偏远地区、海洋、空域及应急灾害场景中提供连续、可靠的连接服务. 根据欧洲 6G-NTN 白皮书 (IMT-2030)^[4] 的愿景, NTN 的原生集成将成为 6G 系统设计的核心目标之一, 为实现“无所不在、韧性化、可持续”的全域连接奠定基础.

在标准化层面, 第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 与国际电信联盟无线电通信局 (International Telecommunication Union-Radiocommunication Sector, ITU-R) 牵头开展了系列 NTN 的标准化研究工作, 如图 1. 3GPP 自 Rel-17 起即启动了对 NTN 的系统性研究, 陆续在 TR 38.811^[5] 和 TR 38.821^[6] 中定义了 NR (new radio) 系统的卫星接入信道模型、架构、随机接入流程 (RACH) 及时延补偿机制. 随着 Rel-18 与 Rel-19 的持续推进, 3GPP 进一步将 NTN 从基础接入验证扩展至协议增强与体系融合. 2025 年 5 月, ITU-R 卫星研究组通过的《5G 卫星无线电接口技术详细规范》进一步明确, 3GPP NTN 技术已成为 5G 卫星通信的唯一标准化方案.

引用格式: 陶虹妃, 孙敬张, 杨卫东, 等. 基于 ns-3 的 3GPP NTN 协议仿真平台设计与实现. 中国科学: 信息科学, 2026, 56: 727–740, doi: 10.1360/SSI-2025-0469

Tao H F, Sun J Z, Yang W D, et al. Design and implementation of 3GPP NTN protocol simulation platform based on ns-3. Sci Sin Inform, 2026, 56: 727–740, doi: 10.1360/SSI-2025-0469

图 1 (网络版彩图) 3GPP 标准化计划与 ITU-R 工作^[4].Figure 1 (Color online) 3GPP standardization timeline and ITU-R work^[4].

然而, 标准化的快速推进也带来了新的挑战. 相较于地面蜂窝系统, NTN 面临星地传播时延大、轨道动态性强、链路中断频繁等特性, 其真实测试成本高、实验周期长且场景复现困难. 研究者亟需一种能够在系统层面复现 3GPP NTN 协议栈行为的仿真平台, 以便在不依赖真实星地链路的前提下对 NTN 系统进行分析与优化. 然而, 现有的网络仿真与协议实现工具在此方面均存在局限: MATLAB, OMNeT++ 等平台更适用于链路级建模或上层网络行为分析, 缺乏与 3GPP NR/NTN 协议级一致性对齐的系统建模能力. OpenAirInterface (OAI) 由欧洲 Eurecom 研究所主导开发¹⁾, 聚焦于 4G/5G RAN 与核心网的实验验证. 2024 年 5 月, OAI NTN 工作组完成了基于 3GPP Rel-17 标准的 5G NR NTN 物理层与 MAC 层实现. 然而, OAI 依赖 USRP 等软件无线电硬件, 适合小规模实验性验证, 但在协议层可控实验与系统级仿真方面仍存在明显不足. 相较之下, ns-3 作为国际主流的网络仿真平台, 已将原 5G-LENA^[7] 模块演化为独立的 NR 模块 (ns-3-nr), 具备完整 5G 协议栈建模能力. 该模块严格遵循 3GPP TS 38.300 系列标准, 实现了灵活帧结构、带宽部件 (BWP) 与波束赋形等关键特性. 2023 年, University of Padova 团队在 Workshop on ns-3 (WNS3) 会议上报告了首个面向 NTN 的信道模型扩展工作^[8], 为 LEO 卫星传播与路径损耗建模提供了标准化支持. 这一成果标志着 ns-3 正式迈入 6G NTN 仿真研究阶段, 并成为与 3GPP TR 38.811^[5]/TR 38.821^[6] 对齐的可扩展、可复现的开源研究平台.

尽管当前可基于 ns-3 NR 模块与 NTN 信道模型实现 NTN 通信过程的基础仿, 但其上层 (尤其是 RRC (radio resource control) 层) 仍主要复用 LTE 模块的实现逻辑, 尚无法支持 3GPP TS 38.331^[9] 中定义的 NTN 特有信令 (如 SIB19) 及增强型随机接入流程. 这一限制使得现有仿真平台难以对 NTN 协议进行完整建模与标准一致性验证. 此外, ns-3 原生移动性模型尚不足以精确刻画卫星及高动态节点的轨道特性, 进一步制约了其在 NTN 场景下的应用深度. 基于上述分析, 本文对 ns-3 NR 模块的 RRC 层进行了面向 NTN 的机制增强, 构建起一个符合 3GPP Rel-17/18 规范的系统级 NTN 仿真平台, 从而为 NTN 接入验证、协议优化及 6G 系统设计提供了标准化且可复现的研究工具. 本文主要贡献如下.

(1) 构建了一个对齐 3GPP 标准的 6G NTN 系统仿真平台. 在 ns-3 NR 模块 (5G-LENA 项目) 基础上, 扩展了卫星轨道建模、传播时延与接入信令机制, 建立端到端 6G NTN 仿真环境.

(2) 构建了 6G NTN 移动模型. 针对 ns-3 原生模型无法准确描述卫星及高动态节点运动的问题, 本文实现了支持多轨道卫星的 NTN 移动模型, 可刻画不同卫星星座的时空位置变化及星地链路传播时延.

(3) 实现了 NTN RRC 层状态机标准化改进. 依据 3GPP TS 38.331 规范^[9], 扩展了 ns-3 NR 模块 RRC 层的状态机逻辑, 实现了 NTN 场景下的连接建立、保持与释放的时序控制.

1) OpenAirInterface. <https://openairinterface.org/>.

表 1 仿真工具 NTN 仿真适用性分析.

Table 1 NTN simulation tool applicability analysis.

Tool	NTN simulation advantage	Limitation
MATLAB	Used for algorithm development and theoretical verification	Lacks discrete event scheduling capability
STK	High-precision orbit calculation (SGP4/SGP5)	Non-open-source software; high cost
OPNET	Network simulation based on probabilistic models, supports complex protocol stack configuration	Educational version has simplified functionality; requires extensive custom code modules
OMNET++	Provides proprietary NED language and a graphical interface for defining network topology	Native platform is not adapted to 3GPP NTN standards
ns-3	New 3GPP NTN channel module integrates the 3GPP 38.811 standard channel model; supports 3GPP NTN standard scenarios	Does not fully implement the dynamic features of 3GPP NTN standards; node mobility models require manual extension

本文结构安排如下: 第 2 节综述 NTN 仿真技术的相关研究工作与 3GPP 标准进展; 第 3 节详细阐述基于 ns-3 的 NTN 仿真平台的架构设计; 第 4 节介绍了关键功能的实现方案; 第 5 节通过实验验证平台的正确性与性能, 并分析仿真结果; 第 6 节总结全文工作, 并讨论未来的研究方向.

2 相关工作

2.1 仿真工具现状

近年来, 针对 NTN 场景的系统级仿真研究逐渐增多, 现有主流通信仿真平台如 ns-3, OMNET++, MATLAB Simulink 等如表 1 所示, 已广泛用于地面蜂窝网络的建模与验证. MATLAB 主要用于数值计算与算法开发, 具有灵活的数学建模能力和丰富的通信工具箱. STK 提供了卫星星座轨道设计、覆盖分析、链路预算等功能. OPNET Modeler 适合地面网络 (如 LTE/5G) 的细粒度性能分析, 其教育版功能简化, 需用户自定义大量代码. OMNET++ 支持移动无线网络仿真, 支持分层建模, 适合大规模网络仿真. ns-3 自 3.42 版起支持 3GPP TR 38.811^[5] 标准中的 NTN 信道建模, 提供了 NTN-Urban, NTN-SubUrban, NTN-DenseUrban 和 NTN-Rural 四大场景的信道传输损耗模型. 尽管 ns-3 已支持 NTN 物理层的传播建模, 但其移动模型的动态刻画能力与高层协议栈功能仍有不足, 限制了复杂 NTN 场景的仿真有效性.

2.2 3GPP NTN 开源模拟器研究现状

在通用网络仿真研究基础上, 学术界与工业界基于 ns-3 与 OMNET++ 等开源框架开展了多种 NTN 系统级仿真研究. 为便于梳理已有工作, 本文从仿真抽象层级 (PHY-MAC/RLC-RRC-E2E) 与设计目标 (标准一致性验证 – 协议功能验证 – 路由研究 – 应用评估) 两维进行分类, 表 2 总结了代表性平台. Simu5G^[10], free5GC²⁾, 5G-K-SimNet^[11], 5G-LENA^[7] 以及 5G-Air^[12] 面向 3GPP 5G 技术栈, 重点支持 RAN、核心网与端到端协议仿真. FLoRaSat^[13], FLoRaSat2^[14], LSNS^[15], OpenSAND³⁾ 专注于卫星网络与 IoT 场景. OpenAirInterface 支持 NB-IoT 与 LoRa, 需 License 授权. 5G-LENA^[7] 与 OpenAirInterface 均支持 3GPP 标准, 正扩展 NTN 相关功能以支持 5G RAN 架构.

在基于 ns-3 的研究中, 已有工作围绕不同层级开展拓展. Badini 等^[16] 开发了面向 STIN 的仿真工具, 包括 SGP4 卫星轨道、地面移动性与符合 3GPP TR 38.811^[5] 的信道模型. Sandri 等^[8] 与 Zugno 等^[17] 分别实

2) free5GC. <https://github.com/free5gc/free5gc>.

3) OpenSAND. <https://www.opensand.org/>.

表 2 开源模拟器.

Table 2 Open-source simulators.

Focus	Representative work	Design objective(s)
Satellite mobility + channel	Badini et al. [16], Sandri et al. [8], Zugno et al. [17]	PHY/orbit/link
Routing/SDN	Mao et al. [21], Peng et al. [26]	Network topology and routing
Application/IoT	FLoRaSat [13], FLoRaSat2 [14], LSNS [15]	IoT
Core-centric	free5GC, OpenAirInterface, 5G-Air [12]	R15 core
RAN-oriented (no NTN access)	5G-LENA/NR [7]	NTN-proximate, non-access study

表 3 3GPP NTN 标准文档与本文模块映射关系.

Table 3 Mapping between 3GPP NTN standard documents and the proposed modules.

Standard/specification	Key content	Corresponding module	Validation
TR 38.811 (Rel-15)	NTN propagation conditions, channel parameters, and deployment scenarios	Satellite mobility module + NTN channel model	Mobility model (Subsections 4.1 and 5.2) and link-level calibration cases (Subsection 5.1)
TR 38.821 (Rel-16)	NTN-based NG-RAN architecture, link performance, and scenario constraints	Provides calibration case data	Case verification (Subsection 5.1)
TS 38.331 (Rel-17)	RRC protocol and SIB configuration, state machine, and access control	RRC state machine + SIB module	SIB19 message sequence verification (Subsection 4.2)
TS 38.101-5/TS 38.108 (Rel-17)	RF and protocol capabilities for NTN UE and SAN	NTN time compensation logic + timing model	Module interface conformance analysis (Subsection 4.2)
TS 38.300 (Rel-18)	NG-RAN overall architecture, protocol stack interfaces, and satellite enhancement capabilities	Protocol stack layer division and module interface implementation	Architecture conformance analysis (Section 3)
TS 22.261 (Rel-19)	NTN typical service scenarios and service requirements	E2E service verification and scenario support capabilities	Service layer capabilities and future work (Subsection 5.3, Section 6)

现了 TR 38.811 [5] 与 TR 38.901 [18] 中的卫星信道与天线模型, 为物理层仿真提供支撑. Puttonen 等 [19] 开源了包含 5G-LENA 组件的 NR 系统级仿真模块. 另一方面, Wang 等 [20] 验证了 IoT 协议. Mao 等 [21] 提出了基于 SRv6 的动态路由机制. Chen 等 [22] 设计了模块化的 LEO 卫星仿真平台, 主要针对拓扑与路由. Cornejo 等 [23] 集成 ITU/DVB 标准用于链路衰减分析. Kumar 等 [24] 和 He 等 [25] 实现了软件定义卫星路由算法. Peng 等 [26] 与 Zhu 等 [27] 提出了抗干扰与自组网路由机制.

综上, 现有工作在物理层校准、轨道与拓扑建模、路由与应用评估方面取得显著进展, 但在如下方面仍存在不足: (1) 缺乏覆盖 3GPP NTN Rel-18 接入与连接控制流程的实现; (2) 缺乏面向协议功能一致性验证 (protocol conformance) 的可复用模拟环境; (3) 缺少支持完整 RRC 状态机与 SIB 配置的开源实现. 针对上述不足, 本文构建了基于 ns-3 的 3GPP NTN 协议一致性验证平台, 以支持 Rel-18 NTN RAN 标准化过程中的流程建模与功能验证.

2.3 3GPP NTN 标准

为实现与 3GPP NTN Rel-18 标准的对齐与验证, 本文进一步系统梳理了相关技术文档, 如表 3 所示. 其中, Rel-15 与 Rel-16 主要定义 NTN 架构、传播模型与系统部署参数, 为信道建模与星地移动性提供基础; Rel-17 增强了 NTN RAN 能力, 引入面向卫星接入的射频特性与协议流程; Rel-18 与 Rel-19 持续强化基于卫星的 NG-RAN 功能并扩展典型业务与服务场景.

Rel-15 的 TR 38.811 [5] 定义非地面网络部署场景、传播条件及 3GPP 信道模型适配性要求, 包括时延扩展、

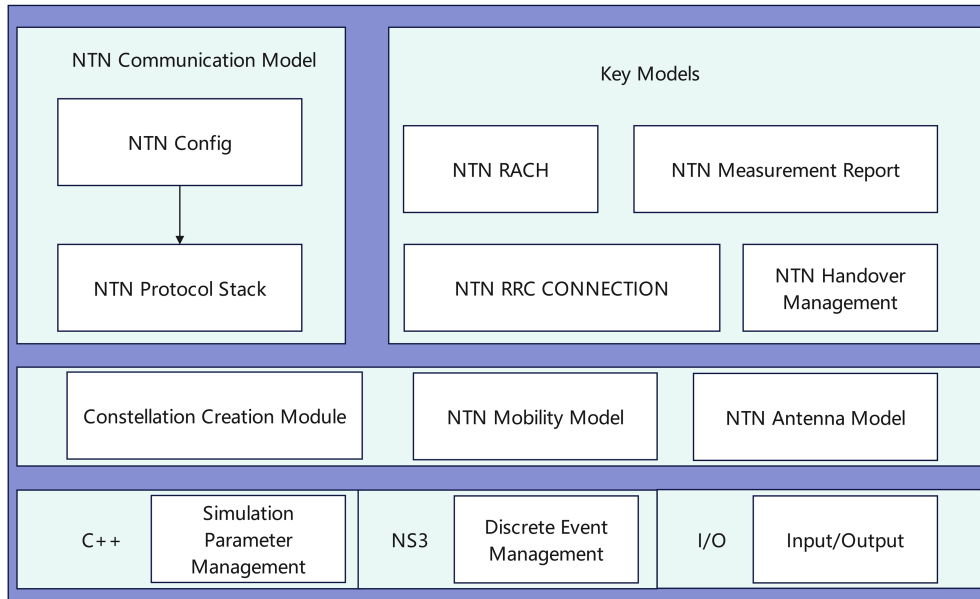


图 2 (网络版彩图) NTN 仿真平台架构图.

Figure 2 (Color online) NTN simulation platform architecture.

多普勒频移与阴影衰落等特性,为基于SGP4模型的卫星移动性与信道建模提供依据. Rel-16的TR 38.821^[6]聚焦NTN-based NG-RAN架构与链路级性能评估,并给出不同NTN接入场景的时延约束. TR 22.822^[28]则明确卫星作为接入节点的5G典型用例与应用需求. Rel-17的TS 38.101-5^[29]与TS 38.108^[30]规定支持卫星接入的NR UE与卫星节点(SAN)的最低射频与协议能力,为接入控制、本地多普勒补偿与时延补偿等流程提供技术基础. Rel-18的TS 38.300^[31]进一步强化NG-RAN架构中卫星接入支持,并更新无线协议栈以适配存储转发与延迟敏感业务. Rel-19的TS 22.261^[32]详细规定了基于卫星接入的服务连续性、业务漫游、资源效率、QoS与定位增强等需求. 上述文档在NTN体系中, Rel-15/16侧重系统参数与信道模型; Rel-17面向RAN层增强,引入NTN接入与连接控制流程; Rel-18/19面向NG-RAN演进与典型业务需求. 本文平台工作目标对齐Rel-18 NTN RAN增强,重点实现SIB配置、RACH过程与RRC连接建立等关键流程,以支持协议功能一致性验证,该能力在现有ns-3与OMNET++平台中仍缺乏可复用支撑.

3 基于 ns-3 的 NTN 仿真平台架构设计

基于前文对3GPP NTN标准与仿真研究现状的分析,本文设计并实现了一个符合标准规范的非地面网络系统级仿真平台. 本节重点介绍该平台的整体架构与协议栈设计,阐述系统组成、模块接口及其在ns-3框架中的集成方式.

3.1 总体架构

本文设计的NTN仿真平台总体架构遵循模块化与可扩展性原则,旨在ns-3原有框架上实现对卫星通信特性的全面支持. 平台架构如图2所示,自下而上可划分为4个层次:底层技术支撑层以ns-3网络仿真框架为核心,使用C++语言进行功能扩展,提供仿真参数管理、离散事件调度等基础服务;基础模型层包含星座创建模块、NTN移动模型与NTN天线模型,为仿真提供卫星拓扑、节点运动轨迹及星地链路传播的建模基础;关键功能层集成了NTN随机接入(RACH)、测量报告、RRC连接与切换管理等核心信令流程处理模块;应用协议层通过NTN配置模块与NTN通信协议栈,配置仿真参数并执行端到端的通信协议. 该架构确保了各功能模块既能独立扩展,又能协同工作,为高保真NTN仿真提供了坚实基础.

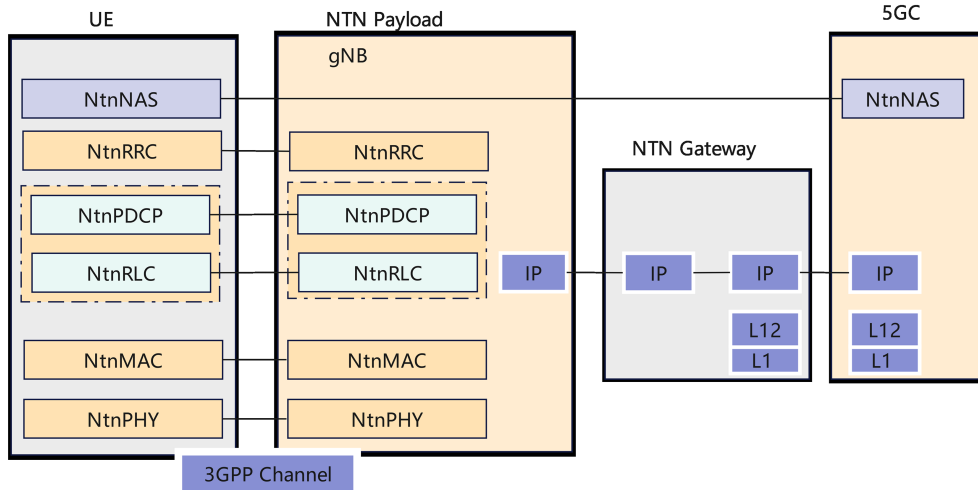


图3 (网络版彩图) NTN 协议栈图.

Figure 3 (Color online) NTN protocol stack.

3.2 仿真平台协议栈

为确保仿真平台在协议流程与层次划分上与 3GPP 标准保持一致,本研究依据 3GPP TR 38.821^[6]与 TS 38.300^[31]系列规范,设计了面向非地面网络的端到端协议栈结构.该协议栈覆盖从物理层(PHY)到非接入层(NAS)的完整功能模块,并在 NR 模块基础上扩展实现 NTN 特有的信道模型、接入控制与信令流程.平台的协议栈架构如图 3 所示.协议栈包括用户侧(user equipment, UE)、卫星载荷/基站(gNB)、NTN 网关(NTN gateway)和核心网(5GC)4个组成部分.其中,UE与gNB通过3GPP定义的空中接口进行通信,NTN网关实现星地链路的数据中继与协议转换.各层功能设计如下.

- (1) NtnPHY 层: 基于 NR 物理层模型扩展卫星信道特性,支持多普勒频移、长传播时延与路径损耗建模.
- (2) NtnMAC 层: 实现了支持随机接入响应(RAR)窗口弹性补偿的 RACH 流程,以适配 NTN 极长传播时延.
- (3) NtnRLC/NtnPDCP 层: 复用 ns-3 NR 模块原有实现,用于维持协议层数据传输与缓存功能.
- (4) NtnRRC 层: 基于 TS 38.331 Rel-18 扩展了 NTN 特有的 RRC 连接建立、重构与释放流程,特别是对 NTN 特有定时器参数字段进行了标准化对齐.
- (5) NtnNAS 层: 维持与 NR NAS 一致的接入与会话管理逻辑,实现核心网接口对齐.

4 关键功能实现

4.1 NTN 移动模型和星座创建模型

依据 3GPP TR 38.811^[5]的规定,NTN 系统采用地心地固坐标系(earth-centered, earth-fixed, ECEF).地球被近似为半径为 6371 km 的球体,坐标原点 O 位于地球中心, x - y 平面对应赤道平面, x 轴指向经度 0°, y 轴指向经度 90°,而 z 轴则指向地理北极.文献[8]利用 GeographicPositions 类与 GeocentricConstantPositionMobilityModel 类实现了单颗卫星在静止状态下的位置计算.为了进一步支持 NTN 场景的移动特性,本文在此基础上实现了新的卫星移动模型 NtnMobility.该模型基于开普勒轨道力学简化模型,在 ECEF 坐标系下,卫星在时刻 t 的三维位置 (x, y, z) 由轨道高度 h 、倾角 i 和初始相位 θ_0 共同决定.其计算逻辑如下:首先计算卫星在轨道平面内的瞬时相位 $\theta(t) = \theta_0 + \sqrt{\mu/(R_E + h)^3} \cdot t$ (其中 μ 为地球引力常数),随后通过旋转矩阵将轨道平面坐标映射至 ECEF 坐标系.

此外,我们设计了星座创建器 NtnOrbitNodeHelper 类,通过 SetPositionAllocator()与 SetMobilityModel()接口,用户可根据轨道参数灵活生成符合 3GPP TR 38.821 规范 7.3.6 节定义的自定义星座结构.相较于特定时刻的 TLE 数据,该模型更符合 3GPP 标准化研究中对轨道确定性验证的要求,便于评估协议在不同轨道构型下

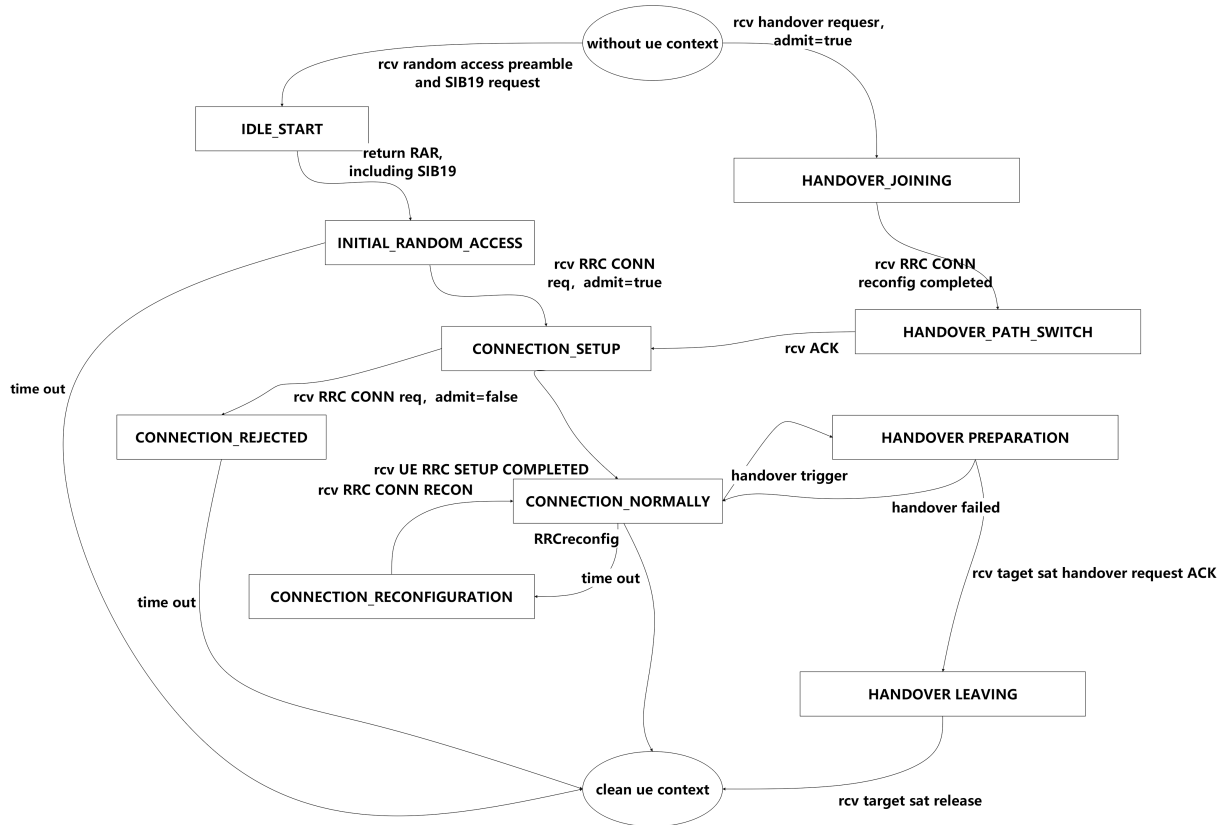


图 4 网络侧 NTN 状态机。

Figure 4 NTN state machine at the network side.

的普适性能。

4.2 RRC 层状态机转移

在 NR NTN 系统中, RRC 层作为控制平面的核心协议, 负责 UE 与 NTN 节点之间的无线资源配置、连接管理以及移动性控制等关键功能. RRC 层不仅在接入与释放过程中承担重要作用, 还直接影响系统的接入时延、切换可靠性以及整体连接稳定性. 目前, 5G-LENA 项目^[7]已实现 NR NTN 系统的 PHY 层与 MAC 层功能, 但其上层协议仍主要复用 LTE 的 RRC 实现. 然而, 根据 3GPP TS 38.331^[9]的规范, NTN 场景下的 RRC 层具有与地面网络不同的特性. 例如, 系统信息 (system information) 的获取方式、接入过程中的随机接入控制, 以及非地面网络相关的定时与窗口机制均需重新定义. 因此, 为了在仿真平台中准确建模 NTN 专属的 RRC 层行为, 本文对 ns-3 NR^[7]框架的 RRC 层进行了扩展与改进, 状态转移过程如图 4 和 5 所示. 具体而言, 我们遵循 TS 38.331^[9]中的 NTN RRC 规范要求, 对 SIB1 的广播信息结构进行了增强, 使其能够携带 NTN 特定字段 (如 cellBarredNTN-r17 等), 并新增了用于 NTN 通信场景的 SIB19, 以支持卫星接入与链路配置过程. 为保证协议实现与标准规范的一致性, 平台在 RRC 层的设计严格遵循 3GPP 定义的信令交互与消息格式. 主要扩展包括: (1) 改进 RRC 层控制消息, 在 SystemInformationBlockType1 结构中增加 NTN 接入相关字段 (如 cellBarredNTN-r17, ConnEstFailureControl, ServingCellConfigCommonSIB) 保持与版本级联机制兼容; (2) 新增控制消息类 SystemInformationBlockType19, 其字段 NTNConfig 为用户提供通过 NTN 接入网所需的配置信息, 包括星历、时延补充等信息; (3) 调整 RRC 状态机逻辑, 使其能够正确处理 NTN 场景下的连接建立、重建与释放流程; (4) 支持 RRC 与 MAC 层的跨层交互接口, 实现 NTN 接入参数 (如 RAR 窗口与 TA 补偿) 的标准化配置与传递. 通过这些扩展, 仿真平台能够在系统接入时为 UE 提供完整的 NTN 参数配置, 包括轨道信息、传播时延补偿以及随机接入窗口.

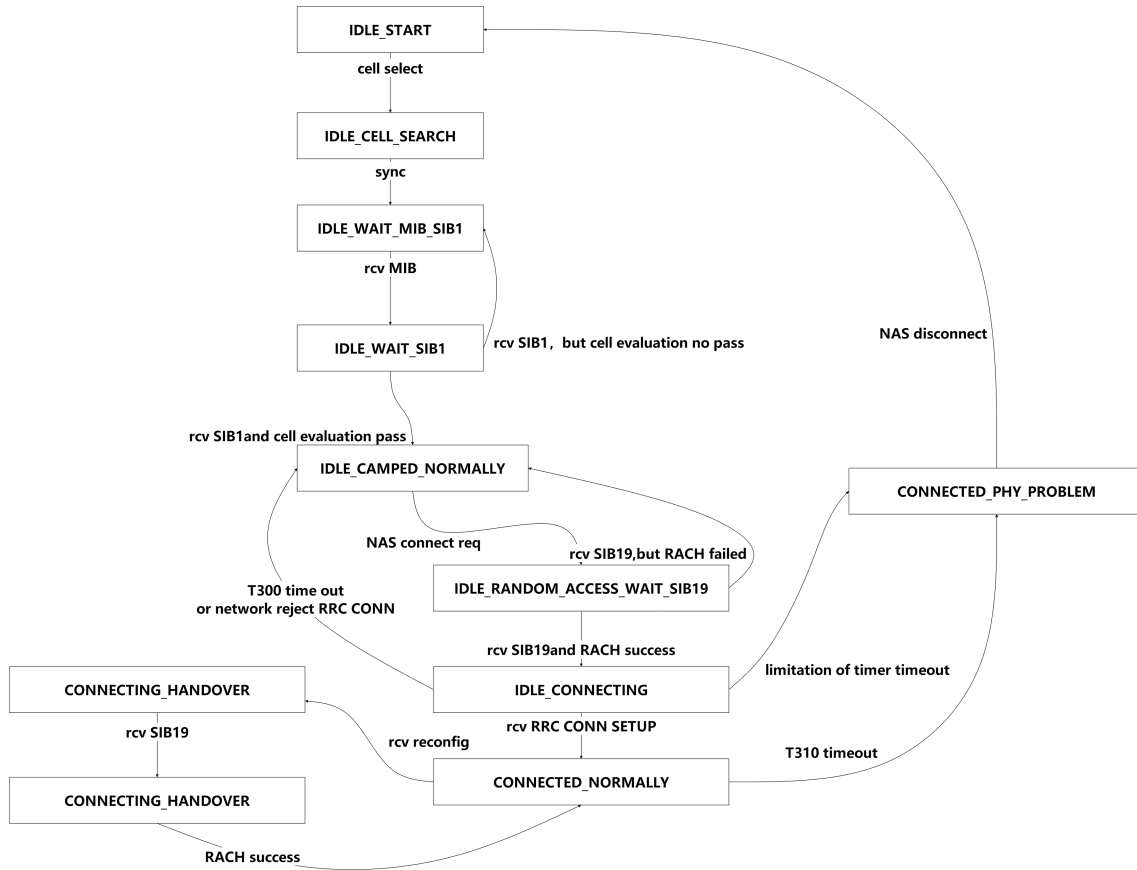


图 5 用户侧 NTN 状态机。

Figure 5 NTN state machine at the user side.

5 仿真验证与性能评估

在本节中, 为验证我们的仿真平台在 3GPP NTN 信道上的性能, 将仿真结果与 TR 38.821^[6] 中报告的校准结果进行了比较. 此外, 我们还提供数值结果来衡量 NTN 移动特性和端到端性能. 我们针对以卫星为节点的 NTN 载体, 为了验证本文提出的基于 ns-3 的 NTN 协议仿真平台的性能, 采用编程语言 C++, 基于 ns-3.42 进行仿真实验. 卫星端仿真参数如表 4 所示, 用户端仿真参数如表 5 所示.

5.1 链路级性能验证

3GPP TS 38.821^[6] 中的表 6.1.1.1-9 定义了 30 个校对案例, 并给出了这 30 个案例在 FSPL, SL, CNR 等指标下的结果数据. 为了验证本文的链路性能, 本文首先在静态单用户场景中对路径损耗 (FSPL) 和接收信噪比 (SINR) 进行了统计分析. 我们选择了其中 6 个案例如表 6, 12 个场景下的链路性能仿真. 具体而言, 包含 GEO, 600 和 1200 km 轨道高度的 LEO 卫星上行链路和下行链路的传输. 链路级性能验证结果如表 7 所示. 尽管存在一定的数据差异, 但整体仍处于可接受范围内, 从而验证了本文仿真平台在链路仿真中的有效性.

5.2 移动性验证

为验证移动模型和星座创建器的准确性, 本节通过几何位置 - 物理损耗的映射关系进行了闭环校验. 我们对比分析了两个星座 (星座 1: 轨道高度 600 km, 倾角 55°, 轨道数 2, 每轨卫星数 10; 星座 2: 轨道高度 1200 km, 倾角 45°, 轨道数 2, 每轨卫星数 10) 在移动过程中的距离 - 仰角 - FSPL 关系.

表 4 卫星端仿真参数配置.

Table 4 Satellite-side simulation parameter configuration.

		GEO	LEO-1200 km	LEO-600 km
DL-S	Antenna radius (m)	22	2	2
	TX EIRP (dBW/MHz)	59	40	34
	Tx max gain (dBi)	51	30	30
DL-Ka	Antenna radius (m)	5	0.5	0.5
	TX EIRP (dBW/MHz)	40	10	4
	Tx max gain (dBi)	58.5	38.5	38.5
UL-S	Antenna radius (m)	22	2	2
	Rx max gain (dBi)	51	30	30
UL-Ka	Antenna radius (m)	3.33	0.33	0.33
	Rx max gain (dBi)	58.5	38.5	38.5

表 5 用户端仿真参数配置.

Table 5 User-side simulation parameter configuration.

		VSAT	Handheld
Frequency		Ka band	S band
Antenna configuration	Directional antenna (radius 0.6 m)	—	
Rx gain (dBi)		39.7	0 per element
Tx gain (dBi)		43.2	0 per element
Tx power (dBm)		33	23
Noise figure (dB)		1.2	7

表 6 Case 参数配置.

Table 6 Case parameter configuration.

Case	Orbit type	Elevation	Terminal type	Frequency	Bandwidth (MHz)
Case1	GEO	12.5	VSAT	Ka band	DL:400; UL:400
Case4	GEO	12.5	Handheld	S band	DL:30; UL:0.4
Case6	LEO-600 km	30	VSAT	Ka band	DL:400; UL:400
Case9	LEO-600 km	30	Handheld	S band	DL:30; UL:0.4
Case11	LEO-1200 km	30	VSAT	Ka band	DL:400; UL:400
Case14	LEO-1200 km	30	Handheld	S band	DL:30; UL:0.4

验证逻辑如下: 根据 NtnMobility 实时输出的卫星坐标与地面终端坐标, 计算其几何距离 $d(t)$, 并带入 FSPL 理论公式 $L_{fs} = 20\lg(d) + 20\lg(f) + 32.44$. 将仿真输出的动态路径损耗与该理论值进行实时对比. 结果表明 (见图 6), 所设计的移动模型能够准确模拟卫星星座的动态运动特性: 当卫星处于低仰角时, 几何距离最大, 仿真测得的 FSPL 同步达到峰值; 随着卫星向用户天顶方向移动, 仰角增加, 距离减小, FSPL 呈现符合理论预期的下降趋势. 经计算, 仿真轨迹输出的 FSPL 与基于几何公式推导的理论值偏差满足协议栈仿真对位置信息精度的需求.

5.3 端到端性能验证

为验证所构建 NTN 仿真平台在端到端层面的性能表现, 本文在静止用户场景下进行了完整的端到端仿真. 实验基于 ns-3 NR 模块^[7] 构建 NR NTN 协议栈, 星座参数设定为轨道高度 600 km、倾角 55°、轨道数 2、每轨

表 7 3GPP TR 38.821 典型案例链路性能仿真结果.

Table 7 Link performance simulation results for scenarios in 3GPP TR 38.821.

Case	Link direction	FSPL (dB)	SL (dB)	CNR (dB)	Comparison
Case1	DL	210.6	1.1	11.6	3GPP TR 38.821 Table 6.1.3.3-1
	DL	210.578	1.08	11.6	Our platform
	UL	214.1	1.1	0.5	3GPP TR 38.821 Table 6.1.3.3-1
	UL	214.1	1.08	0.1	Our platform
Case4	DL	190.6	2.2	0.0	3GPP TR 38.821 Table 6.1.3.3-1
	DL	190.579	2.19	0.4	Our platform
	UL	190.6	2.2	-10.9	3GPP TR 38.821 Table 6.1.3.3-1
	UL	190.579	2.19	-11	Our platform
Case6	DL	179.1	0.3	8.5	3GPP TR 38.821 Table 6.1.3.3-1
	DL	179.092	0.3	8.6	Our platform
	UL	182.6	0.3	18.4	3GPP TR 38.821 Table 6.1.3.3-1
	UL	182.614	0.3	18.50	Our platform
Case9	DL	159.1	2.2	6.6	3GPP TR 38.821 Table 6.1.3.3-1
	DL	159.093	2.199	6.31	Our platform
	UL	159.1	2.2	2.8	3GPP TR 38.821 Table 6.1.3.3-1
	UL	159.093	2.199	2.61	Our platform
Case11	DL	184.5	0.3	9.1	3GPP TR 38.821 Table 6.1.3.3-1
	DL	184.479	0.3	8.9	Our platform
	UL	188.0	0.3	13.0	3GPP TR 38.821 Table 6.1.3.3-1
	UL	188.02	0.3	13.0	Our platform
Case14	DL	164.5	2.2	7.2	3GPP TR 38.821 Table 6.1.3.3-1
	DL	164.48	2.19	7.3	Our platform
	UL	164.5	2.2	-2.6	3GPP TR 38.821 Table 6.1.3.3-1
	UL	164.48	2.19	-2.9	Our platform

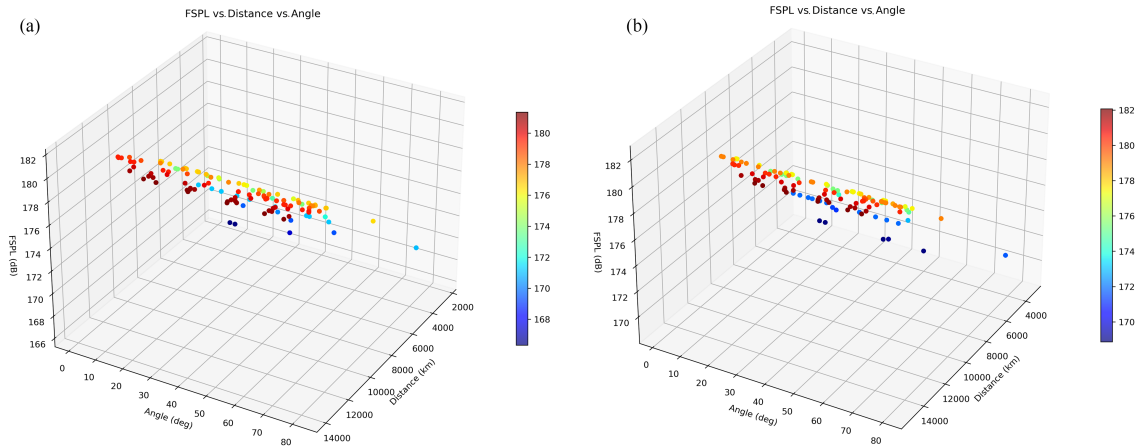


图 6 (网络版彩图) (a) 星座 1 FSPL 与距离关系; (b) 星座 2 FSPL 与距离关系.

Figure 6 (Color online) Relationship between FSPL and distance for (a) constellation 1 and (b) constellation 2.

卫星数 6. 仿真时间 3 s, 系统以 100 Mbit/s 恒定速率向用户传输数据, 用户总数为 18 个, 均为静止用户.

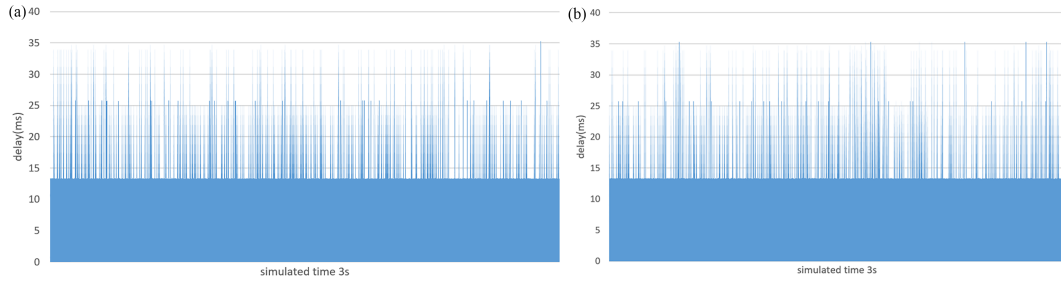
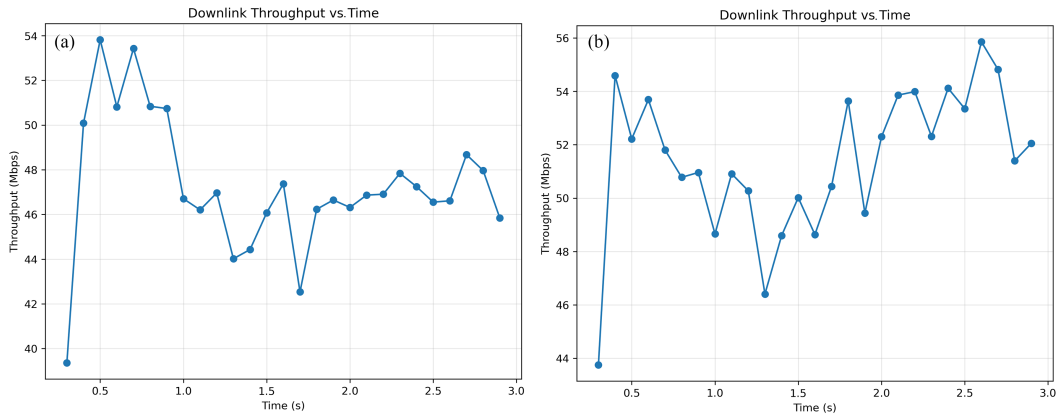
图7 (网络版彩图) (a) 2×6 星座时延; (b) 3×6 星座时延.Figure 7 (Color online) Latency for the (a) 2×6 constellation and (b) 3×6 constellation.图8 (网络版彩图) (a) 2×6 星座吞吐量; (b) 3×6 星座吞吐量.Figure 8 (Color online) Throughput for the (a) 2×6 constellation and (b) 3×6 constellation.

图7展示了端到端时延的动态演变过程. 结果显示, 整体时延主要分布在 13~25 ms 区间. 该动态波动曲线准确复现了 LEO 卫星 (600 km 轨道) 高速绕地运动引起的几何距离实时偏移. 在该动态过程中, 随机接入 (RACH) 流程均能准确识别时延补偿参数并成功建立连接, 验证了针对长时延优化的接入控制逻辑的有效性. 部分瞬时峰值达到 35 ms, 主要源于离散事件驱动仿真中协议栈处理时延与星地传播时延的叠加效应. 本平台通过精准捕获这种由卫星高速运动产生的“亚毫秒级”时延抖动, 验证了其在星地时延建模方面的高保真度.

图8展示了下行吞吐量的动态特性. 初始阶段吞吐量快速上升, 体现了本平台对 RRC 状态机转换及 RLC 缓存填充过程的保真模拟. 两个星座的吞吐量分别稳定在 45~50 Mbps 左右. 在卫星高速移动导致链路质量动态波动的背景下, 吞吐量依然保持稳定, 这定量验证了接入与连接控制流程在保障数据面连续性方面的稳健性, 也说明 NR NTN 协议栈在数据面调度与资源管理方面运行正常.

图9展示了下行链路初始传输误块率 (initial TBler) 随时间的变化曲线. 结果显示, TBler 整体维持在 0.25~0.35 之间. 需要明确的是, 该指标反映的是物理层在未经重传处理前的原始传输状态. 随着仿真时间的推进, TBler 呈现轻微上升趋势, 这主要源于卫星高速移动引起的多普勒频移残差以及路径损耗的动态变化. 尽管初传误块率处于 0.25~0.35 之间, 但由于系统实现了物理层 HARQ 重传机制, 受损的数据块在 MAC 层经过重传后即可被正确译码. 因此, 应用层的残余丢包率保持在极低水平, 系统整体的端到端通信能力保持稳定且可用.

图10展示了仿真过程中的信噪比 (SINR) 随时间变化曲线. 可以观察到 SINR 在 -20~40 dB 之间波动, 这一现象高度还原了 NTN 复杂信道环境下的动态特性: 较大的波动范围不仅包含了路径损耗的动态变化, 还反映了本平台对多普勒频移残差及随机噪声的精确建模. 这种对宽量级信噪比变化的模拟能力, 体现了平台在底层物理链路保真度方面对标 3GPP TR 38.821 的一致性.

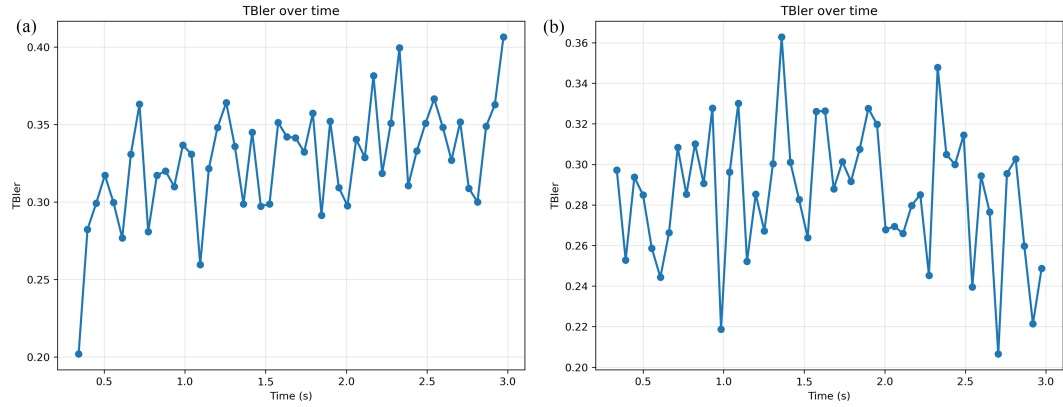


图 9 (网络版彩图) (a) 2×6 星座包损坏率; (b) 3×6 星座包损坏率.

Figure 9 (Color online) TBLER for the (a) 2×6 constellation and (b) 3×6 constellation.

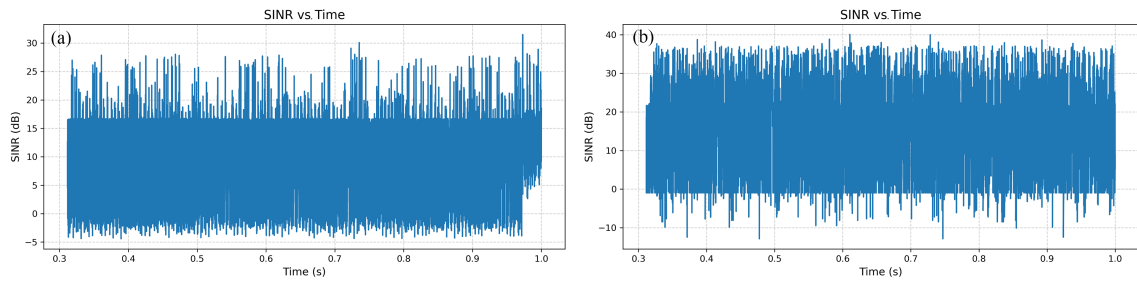


图 10 (网络版彩图) (a) 2×6 星座 SINR; (b) 3×6 星座 SINR.

Figure 10 (Color online) SINR for the (a) 2×6 constellation and (b) 3×6 constellation.

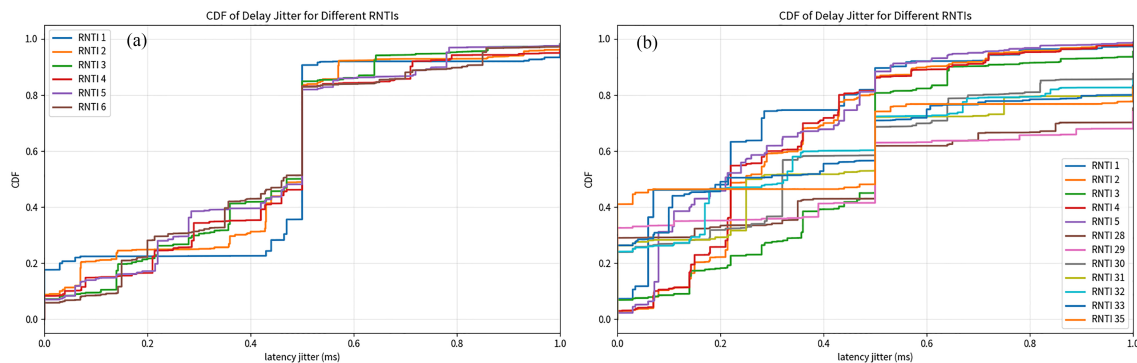


图 11 (网络版彩图) (a) 2×6 星座 UE 时延抖动; (b) 3×6 星座 UE 时延抖动.

Figure 11 (Color online) UE latency jitter for the (a) 2×6 constellation and (b) 3×6 constellation.

图 11 展示了在 3 s 仿真时长内, 卫星高速轨道运动引起的终端侧传播时延动态波动情况. 结果显示, 尽管地面终端处于静止状态, 但由于 LEO 卫星以约 7.6 km/s 的速度掠过用户天顶, 星地间的物理距离在毫秒量级内发生连续偏移, 导致观测到的传播时延呈现显著的动态抖动 (delay jitter) 特征. 利用卫星移动特性下 UE 的时延抖动情况验证了平台能够处理 NTN 复杂链路特性时的亚毫秒级能力, 是本平台区别于传统静态仿真器的关键.

6 结论与展望

本文面向 3GPP NTN 标准化需求, 基于 ns-3 框架设计并实现了 3GPP 标准对齐的 NTN 仿真平台. 平台在保持 NR 模块兼容的基础上, 扩展了 NTN 专用移动模型与 RRC 层信令流程, 实现了从物理层到 RRC 层的完整仿真功能. 实验结果表明, 该平台可准确复现 NTN 场景下的动态链路与管理特性, 为标准验证与协议性能分析提供了有效支撑. 当 NTN 接入协议栈实现进入成熟阶段, 未来可与卫星路由层和星座规划层模型协同, 支持千级节点规模的完整 NTN 系统仿真, 从而实现从标准一致性验证到系统级性能评估的拓展.

参考文献

- Jiao J, Zhang Q Y, Wang Y, et al. Special topic: cohesive clustered satellites system for 5GA and 6G networks. *Sci Sin Inform*, 2025, 55: 2397–2399 [焦健, 张钦宇, 王野, 等. 面向 5GA 和 6G 网络的分布式卫星系统专题简介. *中国科学: 信息科学*, 2025, 55: 2397–2399]
- Chen S Z, Sun S H, Kang S L, et al. Key technologies for 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication. *Sci Sin Inform*, 2024, 54: 1177–1214 [陈山枝, 孙韶辉, 康绍莉, 等. 6G 星地融合移动通信关键技术. *中国科学: 信息科学*, 2024, 54: 1177–1214]
- Giordani M, Zorzi M. Non-terrestrial networks in the 6G era: challenges and opportunities. *IEEE Netw*, 2021, 35: 244–251
- Thales Alenia Space France, Ericsson Sweden and Ericsson France, Qualcomm France, et al. Vision on non-terrestrial networks in 6G system. In: *Proceedings of ETSI Conference*, 2024
- 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15). TR 38.811, 2018
- 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16). TR 38.821, 2023
- Patriciello N, Lagen S, Bojovic B, et al. An E2E simulator for 5G NR networks. *Simul Model Pract Theory*, 2019, 96: 101933
- Sandri M, Pagin M, Giordani M, et al. Implementation of a channel model for non-terrestrial networks in ns-3. In: *Proceedings of the Workshop on ns-3 (WNS3'23)*, 2023. 28–34
- 3GPP. Radio resource control (RRC) protocol specification (Release 18). TS 38.331, 2025
- Nardini G, Sabella D, Stea G, et al. Simu5G—an OMNeT++ library for end-to-end performance evaluation of 5G networks. *IEEE Access*, 2020, 8: 181176
- Choi S, Kang S, Bahk S, et al. 5G K-SimNet: network simulator for evaluating end-to-end performance of 5G cellular systems. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, 2018. 1–2
- Martiradonna S, Grassi A, Piro G, et al. 5G-air-simulator: an open-source tool modeling the 5G air interface. *Comput Netw*, 2020, 173: 107151
- Fraire J A, Madoery P, Mesbah M A, et al. Simulating LoRa-based direct-to-satellite IoT networks with FLoRaSaT. In: *Proceedings of the 23rd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, 2022. 464–470
- Choquenaira-Florez A Y, Ohs R, Fraire J A, et al. FLoRaSat 2: simulating cross-linked direct-to-satellite IoT LEO constellations. In: *Proceedings of the 12th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 18th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC)*, 2025. 1–8
- Liu M, Gui Y, Li J, et al. Large-scale small satellite network simulator: design and evaluation. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Hot Information-Centric Networking (HotICN)*, 2020. 194–199
- Badini N, Patrone F, Zanon A M, et al. Evaluating performance in satellite communication networks: an NS3-based simulation study. In: *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, 2025. 1–8
- Zugno T, Polese M, Patriciello N, et al. Implementation of a spatial channel model for ns-3. In: *Proceedings of the Workshop on ns-3 (WNS3 '20)*, 2020. 49–56
- 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 18). TR 38.901, 2024
- Puttonen J, Sormunen L, Martikainen H, et al. A system simulator for 5G non-terrestrial network evaluations. In: *Proceedings of the 22nd International Symposium on a World of Wireless*, 2021. 292–297
- Wang Z, Cui G, Li P, et al. Design and implementation of NS3-based simulation system of LEO satellite constellation for IoTs. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, 2018. 806–810
- Mao S, Ouyang Y, Yang C, et al. Intent-driven segment routing design for large-scale LEO satellite networks. In: *Proceedings of the International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, 2025. 138–143
- Chen J L, Wang C, Zhao X Y, et al. Design and implementation of congestion-control strategy for LEO satellite based on NS3. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, 2021. 1930–1936

- 23 Cornejo A, Landeros S. Simulation model and comparison for satellite links in Ku and Ka bands for standards-based on DVB-S2 and NS3. *IEEE Latin Am Trans*, 2016, 14: 1689–1697
- 24 Kumar P, Bhushan S, Halder D, et al. fybrrLink: efficient QoS-aware routing in SDN enabled future satellite networks. *IEEE Trans Netw Ser Manage*, 2022, 19: 2107–2118
- 25 He Y Z, Niu Z Y, Liu J C. A QoS guaranteed routing framework based on software-defined satellite networks. In: *Proceedings of the 24th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, 2024
- 26 Peng S Q, Liu J, Weng H Y. An anti-interference on-demand routing algorithm for LEO satellite networks. In: *Proceedings of the 95th Vehicular Technology Conference*, 2022. 1–5
- 27 Zhu H W, Jin Z H. Routing algorithm for AD Hoc networks of LEO satellites based on OSPF. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Computer Technology and Information Science (ISCTIS)*, 2023. 7–9
- 28 3GPP. Study on using satellite access in 5G (Release 16). TR 22.822, 2018
- 29 3GPP. Satellite access radio frequency (RF) and performance requirements (Release 17). TS 38.101-5, 2022
- 30 3GPP. Satellite access node radio transmission and reception (Release 17). TS 38.108, 2022
- 31 3GPP. NR and NG-RAN overall description (Release 18). TS 38.300, 2024
- 32 3GPP. Service requirements for the 5G system (Release 19). TS 22.261, 2025

Design and implementation of 3GPP NTN protocol simulation platform based on ns-3

Hongfei TAO¹, Jingzhang SUN¹, Weidong YANG², Junshuai SUN³ & Chunjie CAO^{1*}

1. *School of Cyberspace Security (School of Cryptology), Hainan University, Haikou 570228, China*

2. *Hangzhou Institute of Technology, Xidian University, Hangzhou 311231, China*

3. *Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Beijing 102209, China*

* Corresponding author. E-mail: caochunjie@hainanu.edu.cn

Abstract Non-terrestrial network (NTN) is a key enabler in 6G for achieving global coverage and integrated satellite-terrestrial communications. To address the limitations of existing simulation tools in 3GPP standards compliance and dynamic topology modeling, this study designs and implements a high-fidelity NTN simulation platform based on the ns-3 framework. The main contributions include: developing a dedicated NTN mobility model to support high-dynamic node trajectories such as satellites; extending the RRC (radio resource control) layer in the ns-3 NR module in accordance with 3GPP TS 38.331 to accurately emulate NTN connection management procedures; and implementing a full NTN protocol stack from the physical to the application layer to support end-to-end performance evaluation. Experimental results demonstrate that the platform can accurately simulate satellite constellation dynamics and NTN propagation delays, providing a reliable tool for research on key 6G NTN technologies.

Keywords NTN, RRC, 3GPP standaration, 6G, ns-3