



Rel-19 NR NTN 传输增强技术方案与标准化进展

孙羿^{1,2,3}, 梁梦薇^{1,2,3}, 童建飞^{1,2,3}, 章跃跃^{1,2,3}, 严宏^{1,2,3}, 王闻今⁴

- (1. 上海卫星互联网研究院有限公司, 上海 200120;
2. 上海市卫星互联网重点实验室, 上海 200120;
3. 卫星互联网全国重点实验室, 上海 200120;
4. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210018)

摘要: 第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 非地面网络 (non-terrestrial network, NTN) 通过对 5G 新空口 (new radio, NR) 协议进行增强设计以适应卫星通信场景, 可深度融合地面网络与非地面网络优势, 并具备持续演进能力, 是实现天地互联的关键技术方向。为应对星地传输功率与频谱资源的限制以及对广覆盖与高容量的双重需求, Rel-19 NR NTN 工作组针对下行覆盖增强与上行容量/吞吐量增强两大议题开展了标准化研究。基于此, 首先概述了 NTN 传输的技术挑战, 继而系统分析了上述议题的技术方案及标准化进展, 最后展望了 Rel-20 NR NTN 潜在的传输增强技术演进方向。

关键词: 3GPP NTN; Rel-19; 下行覆盖增强; 上行容量/吞吐量增强

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025175

Key solutions and standardization progress for transmission enhancement in Rel-19 NR NTN

SUN Yi^{1,2,3}, LIANG Mengwei^{1,2,3}, TONG Jianfei^{1,2,3}, ZHANG Yueyue^{1,2,3},
YAN Hong^{1,2,3}, WANG Wenjin⁴

1. Shanghai Satellite Network Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200120, China
2. Shanghai Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 200120, China
3. State Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 200120, China
4. National Key Laboratory of Mobile Communications, Southeast University, Nanjing 210018, China

Abstract: By adaptively enhancing the terrestrial 5G new radio (NR) protocol for satellite communication scenarios, 3GPP non-terrestrial network (NTN) fully integrates the advantages of terrestrial and non-terrestrial networks with continuous evolution capability, which is therefore regarded as an essential enabler for space-ground integration. To

收稿日期: 2025-02-28; 修回日期: 2025-07-14

通信作者: 童建飞, tongjianfei41@163.com

基金项目: 上海市 2024 年度“科技创新行动计划”启明星项目 (扬帆专项) (No.24YF2743100)

Foundation Item: Shanghai 2024 Science and Technology Innovation Action Plan: Rising-Star Program (Sailing Special Project)(No. 24YF2743100)



address the constraints of limited satellite-ground transmission power and spectral resources, alongside the demand for wide coverage and high capacity, two key sub-topics were prioritized in the Rel-19 NR NTN standardization: downlink coverage enhancement and uplink capacity/throughput enhancement. Based on this, the technical challenges of NTN transmission were firstly outlined. Then, the technical solutions and standardization progress involved in these sub-topics were comprehensively introduced and analyzed. Finally, the potential transmission enhancement technologies for Rel-20 NR NTN were prospected.

Key words: 3GPP NTN, Rel-19, downlink coverage enhancement, uplink capacity/throughput enhancement

0 引言

非地面网络 (non-terrestrial network, NTN) 通过卫星、高空平台 (high altitude platform station, HAPS)、无人机等非地面节点与地面网络协同, 可为海洋、偏远山区、灾难应急通信等场景提供无缝连接。相较于传统地面网络, NTN 展现了广域立体覆盖与快速灵活部署的显著优势: 单颗低轨 (low earth orbit, LEO) 卫星即可覆盖直径上千千米的区域; 通过卫星星座组网, 可以突破地理位置与环境对基站的限制, 构建真正意义上的全球泛在连接网络。然而, 考虑星地链路距离远、频谱资源稀缺等因素, 星地下行传输将面临严重的路径损耗与信号衰减, 而上行传输则受限于终端发射功率低、可用资源不足等约束, 给 NTN 的实际部署带来诸多挑战。

第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 将 NTN 作为近年来的核心研究方向之一, 致力于为星地可靠传输提供标准化解决方案, 加速 5G-Advanced 向全域覆盖与万物智联演进。3GPP NTN 借鉴地面 5G 新空口 (new radio, NR) 体制, 根据卫星场景特征进行相应的适配增强设计, 推动地面网络和卫星网络的全方位融合^[1-3]。在 Rel-17 阶段, 3GPP 针对 5G 宽带接入与窄带物联网场景, 形成了首个正式的 NTN 技术规范版本, 标志着星地融合的开端; Rel-18 定义了 NTN 系统的基本框架和技术要求, 进一步完善了卫星组网能力; “Rel-19 NR NTN 第 3 阶段” 工作项目 (Work Item, WI) 于

2023 年年底完成立项, 目前正在积极开展包括下行覆盖增强、上行容量/吞吐量增强、再生负荷支持、多播业务支持, 以及对 RedCap/eRedCap 终端的适配多个子议题的标准化工作^[4]。其中, 针对广覆盖和高容量的上下行传输需求, Rel-18 研究的上行重复传输机制解决了上行链路预算不足等基础覆盖问题, 初步保障了终端接入能力, Rel-19 则在此基础上开展增强研究, 面向更全面的系统性能提升: 一方面, 针对下行链路受卫星功率和波束资源限制导致的覆盖瓶颈, Rel-19 重点攻关下行覆盖增强技术, 以补足星地链路双向覆盖的短板; 另一方面, 在 Rel-18 上行覆盖增强的基础上, Rel-19 进一步聚焦上行容量/吞吐量增强, 旨在提升频谱资源紧张条件下海量用户接入的效率。通过 2 个方面的增强型设计, 为星地传输提供高效可靠的解决方案。

本文首先简要分析了 NTN 传输的关键技术挑战及其与 Rel-19 NR NTN 传输增强工作的关联, 然后聚焦 Rel-19 NR NTN 下行覆盖增强和上行容量/吞吐量增强 2 个核心子议题, 结合技术方案和标准化进展进行了详细的分析与探讨, 最后对 Rel-20 NR NTN 在传输增强方面的技术演进趋势进行了展望。

1 NTN 传输关键技术挑战

NTN 传输在链路特性、信道环境及系统架构层面与地面传输存在显著差异, 主要呈现如下核心特征: (1) 广覆盖: 卫星天然具有极广的覆盖范围, 1 颗卫星即可覆盖地球表面数百万平方千

米, 因此可能同时存在海量的用户接入需求; (2) 强衰减: 星地链路距离远超传统地面链路 (LEO 典型高度为 300~1 500 km^[2]), 且卫星信号需要穿过大气层, 在恶劣天气条件下可能会受到大气衰减和雨衰效应影响, 路径损耗和信道衰变非常严重; (3) 高动态: LEO 相对地面终端高速运动 (如 7.5 km/s), 将引起显著的多普勒频偏和较大的多普勒变化率, 星地链路状态呈动态频繁变化, 且单颗卫星过顶时间短, 终端需要在短时间内实现快速接入和切换, 对同步和移动性管理等机制提出了更高的要求; (4) 大时延: 星地超远距离还会带来较大的传输时延, 以 600 km 轨道高度为例, 星下点往返时延高达 4 ms, 破坏了基站和终端交互的实时性, 尤其不利于接入、切换以及混合自动重传请求 (hybrid automatic repeat request, HARQ) 等需要多次信令交互的流程, 造成通信时延甚至中断等风险。

受上述特征以及卫星载荷、频谱资源和终端功率等约束的影响, 星地上下行传输面临严峻的系统性挑战, 从而直接驱动了 Rel-19 NR NTN 相关子议题的研究。在下行方面, 卫星依赖多波束技术实现广域覆盖, 但受限于星载载荷 (如功率、天线尺寸), 可同时激活的波束数量及单个波束功率有限, 无法支持上千波位的覆盖; 而终端发射功率较小, 在严重的星地路径损耗下, 链路预算不足以保障下行公共信道和关键数据的传输可靠性。针对此, 在 Rel-19 NR NTN 下行覆盖增强子议题中, 通过同步信号块 (synchronization signal block, SSB) 周期扩展、瓶颈信道重复传输等技术手段应对“广覆盖”和“强衰减”挑战。此外, 通过重复传输机制替代 HARQ 可以减少星地交互次数, 从而也能减少星地链路“大时延”的负面影响。在上行方面, 单颗卫星的“广覆盖”区域内可能同时存在大量终端, 但现有频谱资源紧张, 如何充分利用稀缺的资源支持海量用户连接是亟待解决的问题。同样由于“强

衰减”带来的链路预算问题, NTN 为增强上行传输可靠性采用了大量的重复传输, 导致系统吞吐量/容量受损。为此, Rel-19 NR NTN 上行容量/吞吐量增强子议题引入了正交覆盖码 (orthogonal cover codes, OCC) 方案, 通过码分方式复用多个用户设备 (user equipment, UE), 提高重复传输的资源利用率, 从而实现容量/吞吐量的提升。对于“高动态”带来的同步与切换问题, 主要通过 Rel-18 及更早阶段的基础机制 (如精确同步设计、切换流程优化) 应对, 暂未新增相关优化方案。

2 下行覆盖增强

卫星覆盖范围广, 涉及上千个波位, 但卫星总功率和馈电链路带宽有限, 无法以每个波束的额定等效全向辐射功率 (EIRP) 密度同时并发如此多的波束。因此, 需要增强下行覆盖范围以适应卫星有效载荷的限制, 最大限度地为整个卫星覆盖范围内的 UE 提供可靠通信服务, 提高卫星总体吞吐量。下面分别从系统级和链路级 2 个方面, 对 Rel-19 NR NTN 下行覆盖增强子议题涉及的技术方案和标准化进展进行阐述和分析^[4]。

2.1 系统级增强方案

针对系统级下行覆盖增强研究, 3GPP 工作组重点关注如何在有限卫星总功率和可激活波束数量限制下提高卫星覆盖能力, 相关研究主要围绕 SSB 周期扩展方案和宽波束方案展开。但实际链路预算分析表明, 波束展宽会导致天线增益显著下降, 难以支撑下行公共信道的可靠传输, 因此 3GPP 工作组暂时降低了宽波束方案的讨论优先级, 在 Rel-19 中仅采纳 SSB 周期扩展方案。

SSB 用于帮助 UE 实现下行同步, 其配置将直接影响下行覆盖的性能^[5]。SSB 周期扩展和跳波束示意图如图 1 所示, 本文所提方案通过延长 SSB 扫描周期, 结合跳波束技术, 以时分复用方式完成卫星覆盖范围内所有波位的无缝扫描, 从而显著提升覆盖范围。但可能引入如下问题。

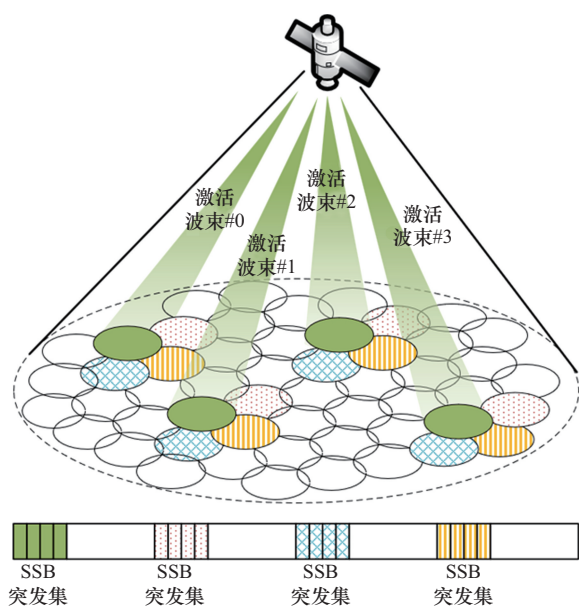


图1 SSB周期扩展和跳波束示意图

(1) 接入时延增加: UE需等待更长时间才能捕获SSB,而在覆盖边缘或信号较差的区域,接入时延将进一步增加,接入失败率也随之上升;

(2) 功耗增加: UE需要在多个频点上持续搜索SSB,UE射频模块长时间处于激活状态,增加功耗;

(3) 移动性性能下降: UE可能无法及时捕获目标小区SSB,导致切换时延甚至失败,影响用户体验;

(4) 时频同步失准: 在2次SSB之间,UE依赖本地时钟维持同步,由于晶振误差和多普勒效应,时间漂移和频率偏差随时间累积,UE无法及时补偿时频偏,影响后续数据解调。为缓解上述问题,3GPP成员公司提出可以引入时频跟踪参考信号(tracking reference signal, TRS)辅助同步,或要求UE采用更高精度的本地晶振,减少时频误差的累积速度。另一方面,UE在完成初始同步后,如果可以快速获取系统消息块1(system information block1, SIB1)/系统消息块19(system information block19, SIB19)等关键信息,则能够利用SIB19包含的最新星历数据计算多普勒频移,实现快速预补偿。因此,可以安排SIB1/SIB19在时域上紧邻SSB传输,减轻SSB扩展对时频同步的影响^[6]。

关于SSB周期取值,尽管较大的周期可以显著提高覆盖率,但从信令角度而言,大于160 ms的SSB周期对标准的影响较大。例如,NonCell DefiningSSB-r17的ssb-PeriodicityServingCell、测量间隔周期、SMTC配置、ssb-Periodicity-r17可能都需进行调整,同时还可能需要扩展nAndPagingFrameOffset的字段^[7]。出于对时频误差、小区初始搜索复杂度、后向兼容性等多方因素的权衡,3GPP工作组在RAN#106会议上达成共识:支持SSB周期扩展至最大160 ms^[8]。

2.2 链路级增强方案

针对链路级下行覆盖增强研究,3GPP工作组基于前期定义的参数和链路预算,明确对包括物理下行控制信道(physical downlink control channel, PDCCH)、Msg4物理下行共享信道(physical downlink shared channel, PDSCH)、SIB1/SIB19 PDSCH在内的瓶颈信道进行链路级增强以提高链路余量^[9]。

(1) PDCCH增强

在所有待增强的信道中,PDCCH具有较高的优先级,因为PDCCH承载了PDSCH的调度信息,UE需要成功接收PDCCH,才可能解析出PDSCH中的SIB1等必要信息。

考虑可能增加的盲检复杂度以及后向兼容性问题,3GPP工作组在Rel-19中未采纳扩展控制资源集(control resource set, CORESET)的时域长度、下行控制信息(downlink control information, DCI)格式优化等策略^[10],仅考虑引入重复传输机制以提高PDCCH链路余量,增强传输可靠性。PDCCH重复传输方案最早在Rel-17版本多传输接收点(multi transmission and reception point, mTRP)相关议题中引入,但Rel-17仅支持时隙内重复且仅适用于UE专用搜索空间(UE-specific search space, USS)或Type3公共搜索空间(common search space, CSS)。复用Rel-17已有的时隙内重复传输功能可以降低UE实现复杂

度,但由于单个时隙内资源有限,这种方案可能会降低其调度的PDSCH的时域资源分配的灵活性^[11]。经过讨论,3GPP工作组确定采用时隙间重复传输方案用于Type0 CSS PDCCH增强^[12]。时隙间Type 0-PDCCH重复传输示意图如图2所示,假设SSB与CORESET#0复用模式1,可以在时隙 n_0 和时隙 n_1 (n_1 和 n_0 的偏移量预先定义)相同的CORESET#0位置上配置关联的CSS集,并保证关联的PDCCH候选具有相同的聚合等级、候选索引、DCI以及编码比特。传统UE仅监测当前时隙上的PDCCH初次传输,行为不受影响,因此不会引入后向兼容性问题。而Rel-19 UE如果在当前时隙解码失败,则继续监测关联CSS集上的PDCCH重复传输,合并解码以提升性能^[11]。3GPP明确使用物理广播信道(physical broadcast channel, PBCH)负载中的1个保留比特位(即 $\bar{a}_{A+7}$)作为Type0 CSS PDCCH重复传输的使能指示^[13]。根据链路预算结果,PDCCH仅存在2 dB的覆盖差距,因此支持2次重复传输即可,1个使能比特足以同时隐含指示重复传输次数。此外,对于除Type0 CSS和Type3 CSS之外的PDCCH,3GPP工作组支持使用时隙内重复传输方案^[13],要求第2个搜索空间监听时机的起始符号紧接在第1个SS监听时机的结束符号之后。

(2) Msg4 PDSCH 增强

在地面通信系统中,HARQ机制可以凭借多次重传副本的软合并增益,有效降低Msg4的解调门限^[14]。然而,传统HARQ重传依赖反馈触发,在往返时延很高的NTN场景中存在重传间隔过长的问题,UE可能无法在竞争解决计时器结束前

完成Msg4解码,导致接入失败。

为减少星地传输时延的影响,3GPP工作组通过了基于重复传输的Msg4 PDSCH增强方案,并支持基于DCI格式1_0的UE专用的配置策略^[15]。Rel-19 UE通过Msg3物理上行共享信道(physical uplink shared channel, PUSCH)上报相关能力或请求,网络侧通过重新定义DCI中最高有效位(most significant bit, MSB)为1的含义来表示Msg4重复传输功能的激活^[13]。重复传输次数限定为2或4,由网络侧通过系统消息SIB1通知UE,尽可能减少信令开销。当SIB1中配置了重复因子,也可隐式使能Msg4 PDSCH重复。

(3) SIB1/SIB19 PDSCH 增强

尽管现有标准支持SIB1周期性重复发送以提升接收成功率,但由于SSB周期扩展,波位的重访时间大大延长,无法实现在1个周期内对同一波位多次发送SIB1。因此,在单次SIB1发送中引入重复传输机制是必要的增强手段^[14]。类似地,对于SIB19 PDSCH,同样需要重复传输以增强可靠性。

3GPP工作组对于支持20 ms内的SIB1 PDSCH重复传输已经达成了统一意见,并将重复次数固定为2次。对于SIB1 PDSCH重复指示,通过关联Type0 PDCCH CSS重复传输来隐式指示,也即,如果启用了Type0-PDCCH重复传输,则自动启用SIB1 PDSCH重复传输,从而有效节约信令开销^[16]。

3 上行容量/吞吐量增强

NTN面临频谱资源有限与卫星覆盖范围内大

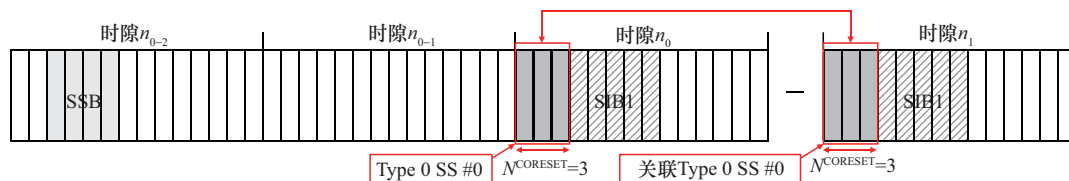


图2 时隙间Type 0-PDCCH重复传输示意图



量UE接入需求的矛盾。考虑终端射频能力受限而星地链路路径损耗严重, NTN借鉴了地面的重复传输技术提升上行传输可靠性, 但以额外的资源消耗为代价^[17]。Rel-19 NR NTN上行容量/吞吐量增强子议题以通过OCC提高基于离散傅里叶变换扩频正交频分复用 (discrete Fourier transform-spread orthogonal frequency division multiplexing, DFT-s-OFDM) 的PUSCH重复传输效率为工作目标, 在相同的时频资源上尽可能复用多个UE, 从而在保证上行覆盖性能的同时提升系统上行容量/吞吐量^[4]。下面针对具体的技术方案和相关信令进行详细介绍。

3.1 OCC方案

针对上行容量/吞吐量增强研究, 3GPP工作组主要考虑了3种OCC方案, 包括时隙间OCC、OFDM符号间OCC、OFDM符号内OCC。

在时隙间OCC (也称跨时隙OCC) 方案中, OCC码元对应乘在离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 之后的不同时隙的重复传输序列上。不同UE使用相互正交的OCC码, 占用相同时频资源进行数据传输。一个长度为2的

时隙间OCC复用2个UE的示例, OCC长度为2的时隙间OCC示意图如图3所示。

时隙间OCC的方案与PUSCH重复传输类型A具有相似的资源映射方式和调度粒度, 因此可以复用PUSCH重复传输类型A的现有规范, 具有较低的实现复杂度^[18-21]。特别地, 当作用于某个UE的OCC码为全1序列时, 其效果等效为未应用OCC技术的普通重复传输, 因此可复用一个不具备Rel-19 OCC能力的传统UE。本文所提方案的主要挑战在于时间漂移和载波频率漂移 (carrier frequency offset, CFO)。时间漂移会引入符号间干扰 (inter-symbol interference, ISI) 和子载波间干扰 (inter-carrier interference, ICI), CFO会引起子载波相位旋转和信号失真, 两者均会随时间累积, 造成信道损伤, 破坏OFDM正交性, 影响系统解码性能。为了提高本文所提方案的鲁棒性, 可以对具有相似CFO的UE进行分组复用、应用改进的MMSE接收机等手段减轻CFO对系统性能的损伤^[18]。

符号间OCC (或称跨符号OCC) 方案和符号内OCC方案分别作用于OFDM符号间和OFDM

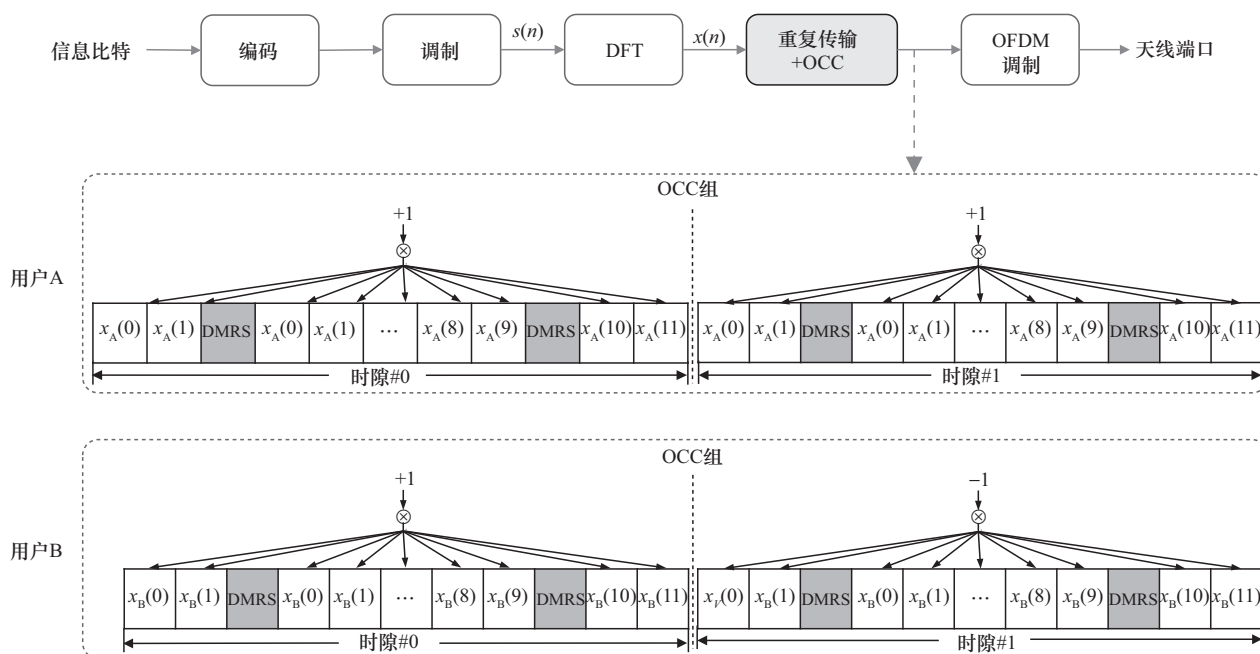


图3 OCC长度为2的时隙间OCC示意图

符号内，其重复粒度均小于1个时隙，因此时间漂移和载波频率偏移的累积误差较小，鲁棒性较好，但需要根据OCC长度对传输块大小和速率匹配进行调整，增加了实现复杂度^[22]。此外，由于现有标准尚未规定符号内的重复传输，符号内OCC方案需对协议进行较大改动^[23]。经过讨论，3GPP工作组在RAN1#119会议上达成共识，仅采纳时隙间OCC方案，同意采用长度为2的OCC正交序列 $[+1 +1; +1 -1]$ 支持2个UE的复用，并通过使用Hadamard序列 $[+1 +1 +1 +1; +1 -1 +1 -1; +1 +1 -1 -1; +1 -1 -1 +1]$ 支持4个UE的复用^[24]。

3.2 相关信令

OCC复用的实际部署需要标准化信令的支持。围绕OCC配置方式、上行控制信息（uplink control information, UCI）复用规则、冗余版本（redundancy version, RV）循环策略等，各公司进行了多次讨论。

（1）OCC配置方式。

对OCC配置的关注重点在于兼顾信令开销和配置灵活性的信令设计^[24]，具体包括OCC使能指示、OCC码长、OCC序列和DMRS端口。3GPP工作组达成的主要结论为结合RRC高层信令和DCI进行差异化配置，OCC参数配置方式见表1^[25-26]。

在动态授权场景或配置授权类型2的场景下，通过RRC配置结合DCI动态指示的方式通知UE具体使用的OCC码长，减少了控制信令开销，有利于降低传输时延；而复用现有DCI中的天线端口字段可以实现对OCC序列的隐式指示，无须新

增DCI字段或扩展相关信令结构，对协议改动较小。

（2）UCI复用规则。

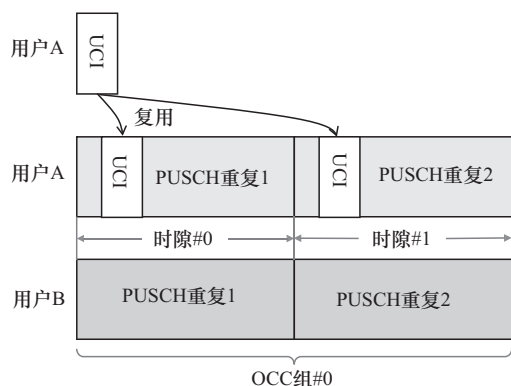
在现有标准中，当DCI调度的PUSCH与承载UCI的PUCCH在时频资源上有重合时，UCI可以被复用在PUSCH上进行传输^[27]。Rel-19考虑PUCCH与配置时隙间OCC的PUSCH时隙重合的场景，针对是否允许UCI复用以及UCI的复用规则进行了研究和讨论。在尽量沿用现有协议、只进行必要改动的前提下，3GPP工作组同意沿用现有标准中判决UCI复用或丢弃PUSCH/PUCCH的时间线条件及优先级条件，但将条件中的“PUSCH重复”统一更新为“1个OCC组中的首个PUSCH重复”^[25]。UCI复用示意图如图4所示，其中，图4（a）表示判定UCI复用在时隙间OCC的PUSCH上时的示意图，图4（b）表示判定丢弃PUSCH的当前OCC组的传输时的示意图。若满足UCI复用在PUSCH的条件，则将UCI复用在与PUCCH重合的OCC组的每次PUSCH传输上；若判定丢弃PUSCH，则将UCI在PUCCH上传输并丢弃有重合部分的整个OCC组的传输^[26]。此外，禁止非调度请求（scheduling request, SR）类的多个PUCCH在不同时隙上与同一个OCC组发生时隙重合^[25]。

（3）RV循环策略。

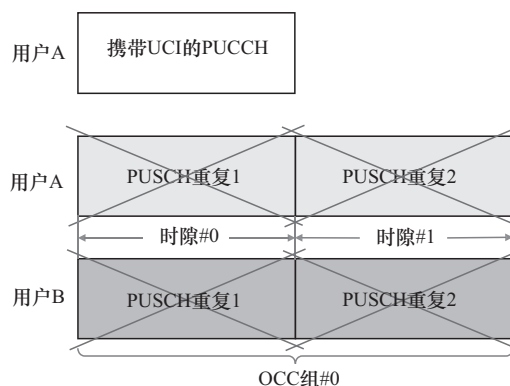
在重复传输场景中，为了分离不同用户信息，3GPP明确要求OCC组内使用相同的RV^[28]。当重复传输次数大于OCC码长时，针对动态授权PUSCH场景下的OCC复用，支持OCC组间使用

表 1 OCC 参数配置方式

参数	动态授权场景	配置授权类型 1	配置授权类型 2
OCC 使能指示	不支持显式配置		
OCC 码长	通过 RRC 高层信令配置候选值，并通过 DCI 动态指示具体使用值	通过 RRC 高层信令配置	通过 RRC 高层信令配置候选值，并通过 DCI 动态指示具体使用值
OCC 序列	在 DCI 中通过复用天线端口字段隐式指示	通过 RRC 高层信令配置	在 DCI 中通过复用天线端口字段隐式指示
DMRS 端口	沿用现有标准		



(a) 判定UCI复用在时隙间OCC的PUSCH上时的示意图



(b) 判定丢弃PUSCH的当前OCC组的传输时的示意图

图4 UCI复用示意图

RV循环,从而提供不同RV的编码增益,OCC长度为2的时隙间OCC的组间RV循环策略示意图如图5所示^[29];针对配置授权PUSCH场景下的OCC复用,支持沿用现有标准为传统配置授权PUSCH约定的RV序列,即[0,2,3,1]、[0,3,0,3]或[0,0,0,0]。

4 展望

随着“Rel-19 NR NTN第3阶段”WI研究接近尾声,下行覆盖增强和上行容量/吞吐量增强议题中的关键技术方案逐渐明晰,涉及的流程与信令改动也得到进一步完善。3GPP Rel-19预计在2025年9月冻结,届时将启动3GPP Rel-20标准化研究。总结Rel-19在传输增强方面的成果,下行覆盖增强子议题有效弥补了Rel-18未充分解决的下行链路预算差距;上行容量/吞吐量增强子议题则在Rel-18上行覆盖增强的基础上,显著提升了上行频谱资源的利用效率,缓解了海量接入压力。然而,严格受制于星上载荷功率、体积和阵列规模等约束,单星下行容量将成为制约卫星互联网效能的瓶颈问题。针对高负载场景下的下

行容量提升以及控制信道在广覆盖、高动态、大容量场景下的效率与可靠性增强等问题,预计Rel-20 NR NTN将在以下方向实现技术突破。

(1) 高频段传输与覆盖增强。随着6G对空天一体化网络带宽需求的激增,Rel-20将进一步探索10 GHz以上高频段在NTN中的应用,例如Ka频段(26.5~40 GHz),以提供连续超大带宽资源和更加密集的波束覆盖。高频段有望显著提升单星容量,但需解决对流层吸收、低仰角传播损耗等问题。通过波束成形与星上再生载荷技术,实现波束能量的动态聚焦与干扰抑制,优化链路预算,显著提升边缘覆盖能力,推动手机直连低轨卫星宽带通信服务发展。

(2) 多轨道多星协同传输优化与容量增强。Rel-20将研究低、中、高轨道卫星的协同传输机制,聚合多星资源以突破单星载荷的容量瓶颈。LEO卫星通过星间链路(inter-satellite link, ISL)实现星间数据转发,减少对地面网关的依赖;GEO卫星提供广域覆盖,而LEO补充低时延服务,但需要解决不同轨道的时频同步、移动性管理及资源调度问题。一方面,亟须突破纳秒级星

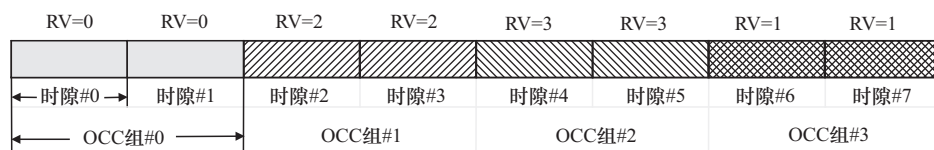


图5 OCC长度为2的时隙间OCC的组间RV循环策略示意图

间同步技术,保障星间精准可靠交互,为多星协同奠定基础;同时,考虑建立空天地一体化的多维资源虚拟化池,利用联邦学习等手段实现多轨道频谱、功率、波束资源的联合编排与调度,满足不同用户的多样化业务需求和不同场景的差异化性能需求。

(3) 无 GNSS 终端的接入传输能力。现有 NTN 借助终端 GNSS 功能进行时频偏补偿,但 UE 可能在某些时段或地点出现 GNSS 信号丢失情况,或因隐私法规无法上报位置信息。Rel-20 将探索无 GNSS 设备的接入传输方案,减少对位置信息的依赖。可以考虑采用网络侧辅助同步机制,如卫星持续广播高精度星历与公共时延补偿参数,终端通过多星信号到达时间差测量实现粗粒度定位;或利用机器学习预测终端位置以优化预测精度,实现动态补偿。从终端侧而言,充分考虑多维信息,可为终端设计增强型非正交接入序列,结合卫星端干扰消除接收机实现无位置上报的竞争接入,提升 GNSS 失效场景下的接入能力。

5 结束语

Rel-19 NR NTN 在下行覆盖增强和上行容量/吞吐量增强 2 个方面开展了卓有成效的标准化工作。对于下行传输,3GPP 工作组明确将 SSB 周期扩展至 160 ms 作为首选系统级增强方案,对时隙间 PDCCH 重复、Msg4 PDSCH 重复、SIB1 重复等关键链路级增强方案及相关信令支持也达成了共识;对于上行传输,时隙间 OCC 方案得到了采纳以支持复用更多 UE,提升上行时频资源利用效率。这些工作为应对星地传输中的瓶颈问题、推动天地融合网络建设提供了重要技术支持。未来,Rel-20 及后续版本有望在高频段利用、多星协同、无 GNSS 接入等方面持续发力,进一步全面增强 NTN 传输能力。通过创新技术突破和标准化演进,NTN 将重塑通信边界,提供无

处不在的全时全域泛在连接。

参考文献:

- [1] 孙耀华, 许宏涛, 彭木根. 手机直连低轨卫星通信: 架构、关键技术和未来展望[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 103-110.
SUN Y H, XU H T, PENG M G. Direct-to-mobile low earth orbit satellite communication: architecture, key technologies, and future perspective[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 103-110.
- [2] 缪德山, 柴丽, 孙建成, 等. 5G NTN 关键技术研究及演进展望[J]. 电信科学, 2022, 38(3): 10-21.
MIAO D S, CHAI L, SUN J C, et al. Key technologies and evolution of 5G non-terrestrial network[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(3): 10-21.
- [3] 陈山枝. 星地融合移动通信系统与关键技术: 从 5G NTN 到 6G 的卫星互联网发展[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2024.
CHEN S Z. Integrated satellite-terrestrial mobile communication systems and key technologies: from 5G NTN to 6G satellite internet development[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2024.
- [4] 3GPP. New WID: non-terrestrial networks (NTN) for NR phase 3: TSG RAN #102.RP-234078[R]. 2023.
- [5] 3GPP. FL Summary #3: NR-NTN downlink coverage enhancements: TSG RAN1 #118.R1-2406437[R]. 2024.
- [6] 3GPP. Discussion on downlink coverage enhancements for NR NTN: TSG RAN1 #118.R1-2405838[R]. 2024.
- [7] 3GPP. Discussion on the impact of SSB extension and cell DTX/DRX for NTN: TSG RAN2 #127.R2-2406591[R]. 2024.
- [8] 3GPP. Revised WID: non-terrestrial networks (NTN) for NR phase 3: TSG RAN #106.RP-243300[R]. 2024.
- [9] 3GPP. FL Summary #4: NR-NTN downlink coverage enhancements: TSG RAN1 #118bis.R1-2407770[R]. 2024.
- [10] 3GPP. Discussion on NR-NTN Ddownlink Ccoverage Eenhancement: TSG RAN1 #118bis.R1-2408487[R]. 2024.
- [11] 3GPP. NR NTN downlink coverage enhancements: TSG RAN1 #119.R1-2409434[R]. 2024.
- [12] 3GPP. FL Summary #4: NR-NTN downlink coverage enhancements: TSG RAN1 #120.R1-2500042[R]. 2024.
- [13] 3GPP. FL Summary #5: NR-NTN downlink coverage enhancements: TSG RAN1 #121.R1-2504953[R]. 2025.
- [14] 3GPP. FL Summary #4: NR-NTN downlink coverage enhancements: TSG RAN1 #119.R1-2409438[R]. 2024.
- [15] 3GPP. FL Summary #4: NR-NTN downlink coverage enhancements: TSG RAN1 #120bis.R1-2501728[R]. 2025.
- [16] 3GPP. On NR-NTN downlink coverage enhancement: TSG RAN1 #119.R1-2409823[R]. 2024.
- [17] 3GPP. NR; Physical layer procedures for data (Release 18): TS



38.214.V 18.5.0[S]. 2024.

- [18] 3GPP. On uplink capacity/throughput enhancement for NR NTN: TSG RAN1 #119.R1-2410562[R]. 2024.
- [19] 3GPP. Discussion on UL capacity enhancement for NR NTN: TSG RAN1 #119. R1-2409728[R]. 2024.
- [20] 3GPP. Discussion on uplink capacity/throughput enhancement for FR1-NTN: TSG RAN1 #119. R1-2409407[R]. 2024.
- [21] 3GPP. NR-NTN uplink capacity/throughput enhancements: TSG RAN1 #119. R1-2410555[R]. 2024.
- [22] 3GPP. On uplink capacity/throughput enhancement for NR NTN: TSG RAN1 #118.R1-2406123[R]. 2024.
- [23] 3GPP. Feature lead summary #2 of AI 9.11.3 on NR-NTN uplink capacity and throughput: TSG RAN1 #118. R1-2407207[R]. 2024.
- [24] 3GPP. Feature lead summary #3 of AI 9.11.3 on NR-NTN uplink capacity and throughput: TSG RAN1 #119. R1-2410642[R]. 2024.
- [25] 3GPP. Feature lead summary #4 of AI 9.11.3 on NR-NTN uplink capacity and throughput: TSG RAN1 #120bis. R1-2503094[R]. 2025.
- [26] 3GPP. Feature lead summary #3 of AI 9.11.3 on NR-NTN uplink capacity and throughput: TSG RAN1 #121. R1-2503686[R]. 2025.
- [27] 3GPP. NR; Multiplexing and channel coding (release 18): TS 38.212. V 18.5.0[S]. 2024.
- [28] 3GPP. Feature lead summary #3 of AI 9.11.3 on NR-NTN uplink capacity and throughput: TSG RAN1 #118bis. R1-2409020[R]. 2024.
- [29] 3GPP. Feature lead summary #3 of AI 9.11.3 on NR-NTN uplink capacity and throughput: TSG RAN1 #120. R1-2501402[R]. 2025.

[作者简介]



孙羿 (1997–), 女, 博士, 上海卫星互联网研究院有限公司工程师, 主要研究方向为卫星通信和 5G/6G 关键技术。



梁梦薇 (1998–), 女, 上海卫星互联网研究院有限公司助理工程师, 主要研究方向为卫星通信和 5G/6G 关键技术。



童建飞 (1994–), 男, 博士, 上海卫星互联网研究院有限公司工程师, 主要研究方向为卫星通信和 5G/6G 关键技术。



章跃跃 (1988–), 男, 博士, 上海卫星互联网研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星互联网网络架构及体制协议。



严宏 (1978–), 男, 上海卫星互联网研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星通信和 5G/6G 关键技术。



王闻今 (1980–), 男, 博士, 东南大学移动通信国家重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为大规模 MIMO 通信和卫星通信。