



研究与开发

基于NTN的容量增强技术研究

林家贤^{1,2}, 关鹃², 康绍莉^{2,3}, 陈山枝³

- (1. 电信科学技术研究院, 北京 100083;
2. 中信科移动通信技术股份有限公司, 北京 100083;
3. 无线移动通信国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 卫星通信作为全球通信网络的关键组成部分, 在偏远地区覆盖与应急通信中具有不可替代性。然而, 手机直连卫星等新兴应用的发展对系统容量提出了更高要求, 亟须解决波束规模化发展、波束内用户数的增长及用户速率的提升等技术挑战。为此, 3GPP自Rel-18版本开展覆盖增强与容量增强技术研究。以3GPP在研的基于正交覆盖码(orthogonal covering code, OCC)的上行容量增强方案为基础, 系统分析其技术路径并通过仿真评估其性能, 同时探讨下行容量增强的标准化方向, 为5G非地面网络(non terrestrial network, NTN)后续演进提供技术参考, 并进一步提出基于图样分割多址接入(pattern division multiple access, PDMA)的非正交容量增强策略, 从多用户接入效率与频谱资源利用维度突破传统正交多址限制, 为6G NTN的超大容量需求奠定理论与技术基础。研究结果表明, 通过对资源利用的优化, 卫星通信系统容量得到显著提升, 能够有效支撑未来NTN的规模化部署。

关键词: 卫星通信; 容量增强; 正交覆盖码; 图样分割多址接入

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025174

Research on capacity enhancement technology based on NTN

LIN Jiaxian^{1,2}, GUAN Juan², KANG Shaoli^{2,3}, CHEN Shanzhi³

1. China Academy of Telecommunications Technology, Beijing 100083, China
2. CICT Mobile Communication Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China
3. State Key Laboratory of Wireless Mobile Communication, Beijing 100083, China

Abstract: Satellite communication, as a key component of the global communication network, is irreplaceable in providing coverage in remote areas and for emergency communications. However, the development of emerging applications such as direct satellite connections for mobile phones has raised higher requirements for system capacity, urgently necessitating solutions to technical challenges such as scalable beam development, increased user numbers within beams, and improved user rates. To address this, 3GPP had initiated research on coverage enhancement and capacity enhancement technologies starting from the Rel-18 version. Based on the uplink capacity enhancement scheme

收稿日期: 2025-02-28; 修回日期: 2025-05-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2022YFB2902605)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB2902605)



using orthogonal covering codes (OCC) that is currently under research by 3GPP, the technical pathway was systematically analyzed and its performance was evaluated through simulations. Additionally, the standardization direction for downlink capacity enhancement was explored, providing technical reference for the subsequent evolution of 5G non-terrestrial network (NTN). Furthermore, a non-orthogonal capacity enhancement strategy based on pattern division multiple access (PDMA) was proposed, breaking through the traditional orthogonal multiple access limitations from the perspectives of multi-user access efficiency and spectrum resource utilization, and laying a theoretical and technical foundation for meeting the ultra-large capacity demands of 6G NTN. The research results indicate that through the optimization of resource utilization, the capacity of satellite communication systems can be significantly enhanced, effectively supporting the large-scale deployment of NTN in the future.

Key words: satellite communication, capacity enhancement, OCC, PDMA

0 引言

卫星通信是全球通信网络的重要组成部分, 长期以来, 在偏远地区覆盖、应急通信等领域发挥着不可替代的重要作用。随着商业航天发射成本的持续下降、卫星批量化生产技术的日益成熟, 以及微电子技术的迭代升级, 以低轨为代表的卫星通信迎来重要发展契机, 吸引互联网、通信、航天科技企业竞相布局^[1-4]。传统卫星通信系统面向行业应用, 支持的波束数目以及每波束支持的用户数相对较少。随着手机直连卫星应用的发展, 波束数目的提升、每波束需要支持的用户数及用户速率的增加均给当前的卫星通信系统带来了挑战。因此, 如何提升卫星通信的容量, 成为业界的热点话题^[5-8]。

第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 自 Release 15 (Rel-15) 面向非地面网络 (non terrestrial network, NTN) 开展了相应的研究, Rel-17 完成了第 1 版基于透明转发的 NTN 标准。从 Rel-18 开始, 3GPP 针对 NTN 开展面向手机直连卫星的特性增强, 先后开展了上行覆盖增强、下行覆盖增强、上行容量增强的研究。其中, 覆盖增强是为了突破链路预算不足的限制, 容量增强则是为了提升单波束支持的用户数或者用户速率^[9-10]。

本文主要研究 NTN 的容量增强技术, 先以

3GPP 在研的 5G NTN 上行容量增强为基础, 深入分析相关技术方案并进行仿真评估, 然后探讨下行容量增强方案, 为 5G NTN 的后续立项研究提供借鉴, 最后探讨基于非正交多址接入的容量增强技术, 从而为 6G NTN 的研究打下坚实基础。

1 5G NTN 的上行容量增强技术方案

在 5G NTN 部署初期, 受限于可用频谱资源的高稀缺性, 系统需要实现差异化资源分配策略。不同用户设备 (user equipment, UE) 根据业务流量特征 (如实时性、带宽需求) 呈现显著的服务质量差异。在此背景下, 精细化资源复用技术成为提升系统容量的关键, 一方面, 可通过动态资源分配为覆盖边缘用户提供更多资源, 以保障由 5G 网络独立承载的语音业务 (voice over new radio, VoNR) 及基于 IP 的语音传输 (voice over Internet protocol, VoIP) 等时延敏感业务; 另一方面, 利用多维正交资源复用机制, 突破传统时频资源限制^[11-12]。

基于正交覆盖码 (orthogonal cover code, OCC) 的多用户复用技术可实现创新性容量提升, 3GPP 在 Rel-19 版本中对其进行了深入研究。该技术允许多个终端设备共享相同物理层时频资源单元, 通过正交码字实现用户信号分离。依据资源复用的粒度, OCC 容量增强方案可以细分为

时隙级 OCC 和符号级 OCC。本文首先以基于 5G 的非地面网络 (new radio-non terrestrial network, NR NTN) 为例, 剖析时隙级 OCC 容量增强方案和符号级 OCC 容量增强方案的技术原理, 探讨 OCC 序列设计, 开展对 OCC 方案容量增强效果的仿真评估, 并进一步分析基于物联网非地面网络 (Internet of things-non terrestrial network, IoT NTN) 的上行容量增强方案。

1.1 时隙级 OCC 容量增强方案

对于手机直连卫星, 为了做到覆盖增强, 可以通过多时隙的冗余传输来提升链路可用度, 覆盖增强模式的时隙扩展冗余传输模式如图 1 所示。多时隙的冗余传输, 限制了系统支持的用户数, 因此, 需要进行用户数目扩展。时隙级 OCC 容量增强方案便是基于现有的重复传输时隙资源, 通过不同的正交码来区分用户, 从单一用户扩展到多个用户。具体的用户扩展方案, 既可以直接按

时隙来进行, 也可以按时隙组来进行, 时隙级 OCC 容量增强方案如图 2 所示。

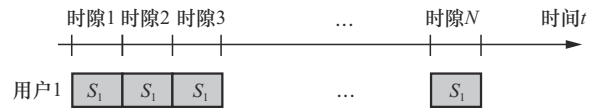


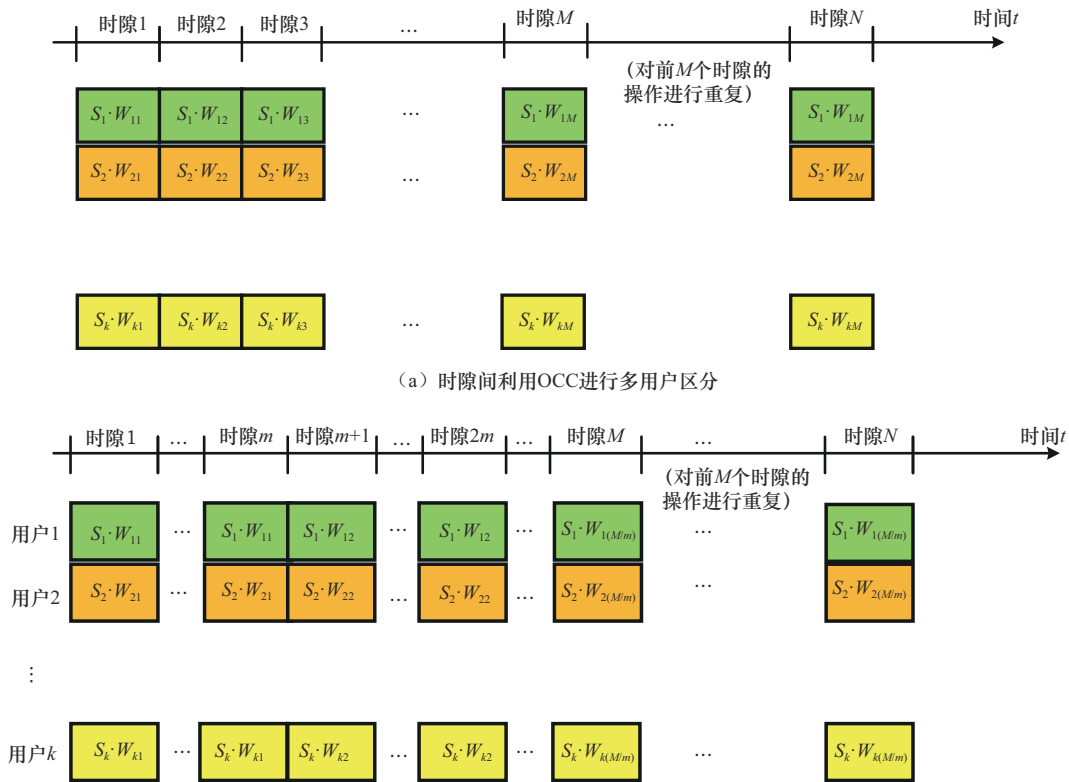
图1 覆盖增强模式的时隙扩展冗余传输模式

具体来说, 采用时隙间 OCC 容量增强方案时, 在发送端, 假设用户 k 的原始信号为 S_k , 每个用户被分配唯一的正交码序列 W_k , 码长为 M (最大复用用户数不超过码长 M , 且总重复时隙数 N 应为 M 的整数倍), 则在第 i 个时隙的发送信号为:

$$X_{ki} = S_k \cdot W_{ki} \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

在接收端, 对 M 个时隙中接收到的信号解扩后分别进行求和, 基于码字的正交性, 通过线性检测可以分离出目标用户。

以 Walsh 序列的 OCC 为例, 当码长 M 为 2



(b) 时隙组间利用OCC进行多用户区分

图2 时隙级 OCC 容量增强方案



时, 在发送端可以使用 Walsh 码[1, 1]和[1, -1], 则用户 1 和用户 2 分别在两个时隙发送 $[S_1, S_1]$ 和 $[S_2, -S_2]$ 。在接收端将对两个时隙中接收到的信号分别进行求和, 即用户 1 和用户 2 发送的信号在接收端的两个时隙中可表示为 $[S_1+S_2, S_1-S_2]$ 。对于用户 1, 使用 Walsh 码[1, 1]进行解码, 得到:

$$S'_1 = \frac{1}{2}(S_1 + S_2 + S_1 - S_2) = S_1 \quad (2)$$

对于用户 2, 则使用 Walsh 码[1, -1]进行解码, 得到:

$$S'_2 = \frac{1}{2}[S_1 + S_2 + (-1) \cdot (S_1 - S_2)] = S_2 \quad (3)$$

时隙间 OCC 在相同的时频资源内复用了多个用户, 且每个用户的有效数据速率没有改变, 因此, 理论上可实现数倍的容量提升 (倍数取决于复用的用户数)。时隙组间 OCC 则是在时隙间 OCC 的基础上对重复传输的时隙进行了分组, 以 m 个时隙为一组, 并使用新的码长为 M/m 的正交码, 组内所有时隙使用相同的正交码。与图 2 (a) 所示的时隙间 OCC 相比, 时隙组间 OCC 容量增强方案降低了在占用相同时频资源时可复用的用户数 (时隙组包含的时隙个数直接决定最高复用用户数降低的倍数), 其优势在于在复用需求不高的情况下可以获得更多的分集增益, 以保证传输质量。此外, 将时隙间 OCC 应用于更少的时隙内并重复, 也可以达到与时隙组间 OCC 类似的效果, 因此, 本文仅将时隙组间 OCC 作为一种可选方案提及。

低轨卫星的运动会带来时频偏的变化, 这会对时隙级 OCC 容量增强方案带来影响。码长 N 直接决定复用用户数, 但是码长增加会导致时隙跨度延长, 用户间频偏差异引发的相位旋转加剧, 正交性被破坏。当 OCC 长度较大时, 由于频偏的影响, 解调性能下降。为改善这一问题, 有以下两种可选择的方案。

一种是在调度上进行用户选择的限制, 基站

通过导频信号估计用户频偏, 设定阈值 (如 0.1×10^{-6}), 仅选择频偏差异小于 0.1×10^{-6} 的用户组进行 OCC 复用, 从而将频偏相近的用户分配至同一 OCC 组, 减少了 OCC 组内用户相位旋转差异, 有效降低了频偏对时隙级 OCC 容量增强方案解调性能的影响。

另一种是在接收端对检测算法进行改进, 传统最小均方误差 (minimum mean square error, MMSE) 检测算法通过最小化均方误差抑制干扰, 但未充分补偿动态频偏导致的相位旋转, 导致残留多用户干扰显著。为了降低频偏对时隙级 OCC 容量增强方案解调性能的影响, 将所有用户的频偏纳入增强检测方案的考虑范围非常有必要, 可以参考文献[13]提出的 CFO Estimation-MMSE FEQ 算法进行改进, 在基站侧通过导频信号估计用户频偏, 并根据估计的用户频偏差异构建多用户干扰矩阵, 精确表征用户间由频偏引起的子载波间干扰。与传统 MMSE 算法不同, 改进算法利用多用户干扰矩阵设计均衡系数, 实现了考虑所有用户频偏的增强检测, 有效抑制了相位旋转引起的正交性破坏。

1.2 符号级 OCC 容量增强方案

时隙级 OCC 容量增强方案是将时隙作为正交扩频的基本单位, 利用重复传输的时隙进行扩频, 从而实现多用户复用。符号级 OCC 容量增强方案则是将符号作为正交扩频的基本单位, 利用频域和时域资源进行扩频, 从而实现多用户复用。按照对频域或时域资源的利用, 符号级 OCC 容量增强方案可以细分为符号内 OCC 容量增强和符号间 OCC 容量增强。

1.2.1 符号内 OCC 容量增强方案

符号内 OCC 容量增强是指在单个正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 符号内实现从单用户到多用户的复用, 核心是将正交码应用于符号内的频域资源, 实现多用户信号在相同资源上的叠加传输与分离。

符号内 OCC 容量增强方案如图 3 所示。其中，单用户资源分配如图 3 (a) 所示，是指在现有传输方式下，每个物理资源块 (physical resource block, PRB) 由单一用户占用。基于 OCC 的多用户复用如图 3 (b) 所示，在符号内 OCC 方式下，每个用户的数据流首先经过信道编码、调制等处理后，再使用预定义的 OCC 序列进行扩频，最后通过离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 将每个用户的数据按符号依次排列在频域上，实现了多用户的复用。采用码分复用 (code division multiplexing, CDM) 后，单用户实际占用的资源下降，若使用的 OCC 长度为 M ，单用户实际占用的资源变为原来的 $1/M$ 。在频域资源固定的情况下，多用户复用时，为保证每个用户的数据速率不受影响，需要选择更高阶的调制方式，即图 3 (b) 中符号 $A_1 \sim A_M$ 包含的数据与图 3 (a) 中符号 $A_1 \sim A_{(k \cdot M)}$ 包含的数据相同。

由于符号内 OCC 实现了多用户复用，且通过

更高阶的调制方式保证了单用户的数据速率不受影响，因此，也极大地提高了系统容量 (k 用户复用时容量为 k 倍)。与时隙间 OCC 容量增强方案相比，符号内 OCC 容量增强方案的优势在于时域跨度短、抗频偏能力强，劣势在于使用 OCC 的用户与不使用 OCC 的用户资源分配不同，需要定义新的资源分配方案。由于支持 OCC 的用户和不支持 OCC 的用户无法一起复用，这对网络规划提出了挑战。同时，为了保证每个用户的数据速率不受影响，需要选择更高阶的调制方式，这会导致解调性能的下降。

为了解决符号内 OCC 容量增强方案采用更高阶调制方式导致解调性能下降的问题，采用将传输块与多时隙相结合 (transport block processing over multiple slots, TBoMS) 的方案^[14]。TBoMS 方案采用 3GPP 在 Rel-17 版本中引入的上行覆盖增强关键技术，其核心原理是将单个传输块分配到多个连续时隙进行传输，通过时间维度的资源扩展，提升信号功率密度和传输可靠性。这样可

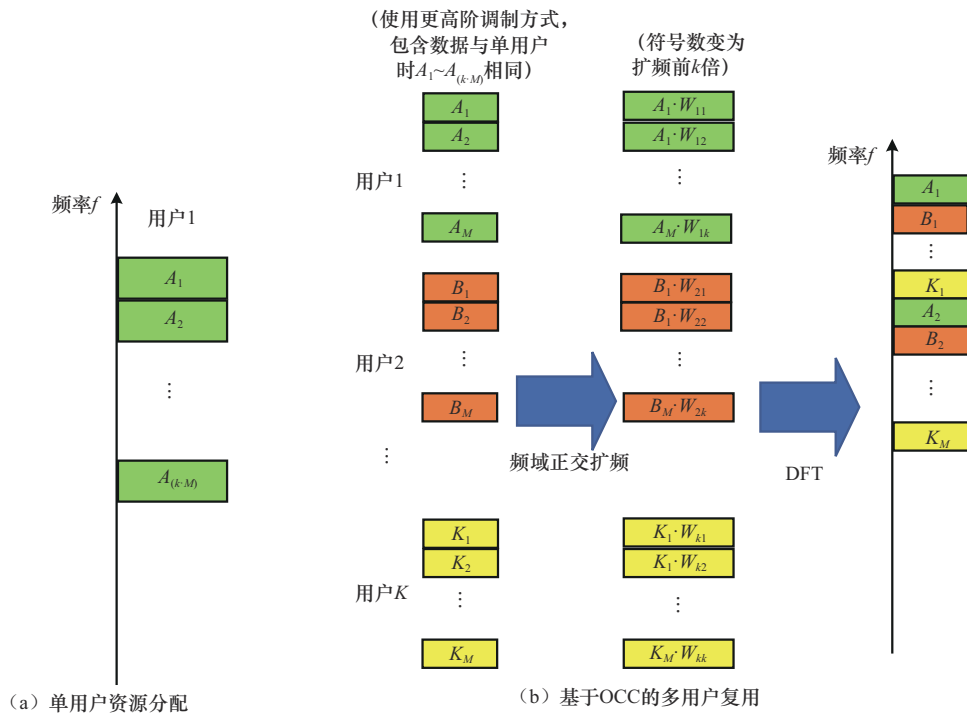


图3 符号内OCC容量增强方案



在保证数据速率的前提下,不改变调制方式,因此,相对单用户而言,多用户复用的解调性能基本没有下降。

1.2.2 符号间OCC容量增强方案

为实现 k 个用户在单个时隙上的复用,当单用户在单个时隙上仅有不超过 $1/k$ 的时间用于传输 k 个符号时,可以使用符号间OCC容量增强方案。符号间OCC容量增强方案如图4所示,其主要实现方式有以下两种。

一种是一个符号扩频后映射到连续的符号上,如图4(b)所示,在这种方式下,每个用户的数据经过信道编码、调制等处理后,使用预定义的OCC序列进行扩频,并将扩频后的数据映射到连续符号上。

另一种是一个符号扩频后映射到非连续的符号上(也称为符号组间OCC),如图4(c)所示,在这种情况下,扩频后的数据被分配到非连续的符号位置,这可以进一步分为多个符号组,每个符号组内包含若干个符号。符号组长度的取值范

围可以是2到资源分配的符号长度。

符号间OCC容量增强方案利用单个时隙内空余的时间完成扩频,对每个符号依次进行扩频,而符号组间OCC容量增强方案将符号进行分组后整体扩频,二者均在单个时隙实现了 k 个用户的复用,且不影响每个用户的有效数据速率,理论上将容量扩展了 k 倍。

符号间OCC容量增强方案的时间跨度局限于单个时隙,而时隙间OCC容量增强方案的时间跨度为多个时隙。信号传输过程中,相位的变化是频率对时间的积分,频偏引起的相位偏移会随时间累积,因此,符号间OCC容量增强方案受频偏影响低于时隙间OCC容量增强方案。

然而,符号间OCC容量增强方案也有其局限性。对于符号间OCC容量增强方案,存在使用OCC方案的用户和不使用OCC方案的用户无法复用的问题。同时,考虑时域资源分配不超过跨时隙,NR NTN中一个时隙包含14个符号,因此,未扩频前,时域上占用的符号不超过7

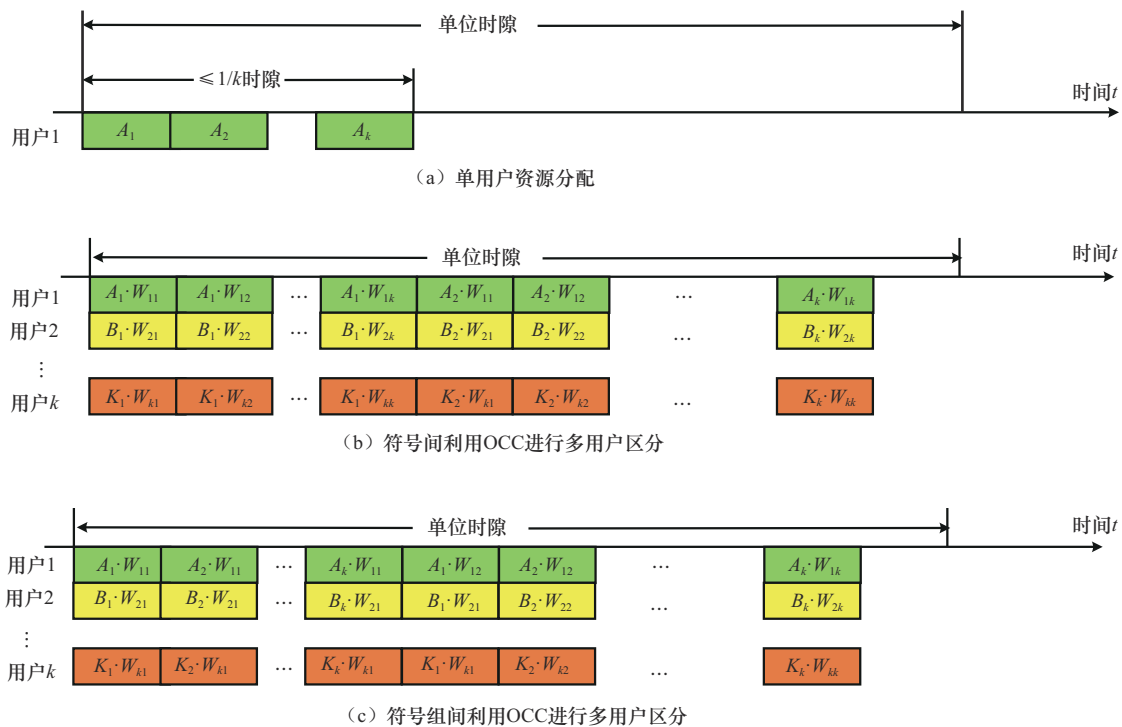


图4 符号间OCC容量增强方案

(OCC码长为2)或者3(OCC码长为4),时域上可分配的资源太少。

如果采用符号组间OCC容量增强方案,与符号间OCC容量增强方案相比,使用OCC方案的用户和不使用OCC方案的用户资源分配相同,不需要定义新的资源分配方案。同时,支持OCC方案的用户和不支持OCC方案的用户可以一起复用,其中不支持OCC方案使用全1的OCC序列即可。然而,这同样存在相同时域可分配资源过少的缺点,与符号内OCC容量增强方案类似,可以通过TBoMS方式改善这一情况。

OCC容量增强正交扩频方案对比见表1,表1给出了符号内OCC、符号间OCC与时隙间OCC这3种容量增强方案的定性对比结果。

表1 OCC容量增强正交扩频方案对比

容量增强方案	频偏鲁棒性	实现复杂度	协议兼容性	典型应用场景
符号内OCC	强	高	弱	中低时延业务
符号间OCC	中等	中等	中等	中低时延业务
时隙间OCC	弱	低	强	高时延容忍业务

1.3 OCC序列设计

当采用时隙间OCC容量增强方案时,如果采用较长的OCC序列长度,由于时频偏的影响,多用户间干扰导致解调性能下降。当采用符号间OCC容量增强方案和符号内OCC容量增强方案时,如果OCC序列过长,由于时隙边界限制,无法在时隙内支持多用户复用,如对于符号间OCC容量增强方案,如果要支持长度等于8的OCC序列,扩频前每个用户时域只能占用一个资源,这显然是不可能的。因此,对于序列长度的选择,目前暂考虑2、4这两种。

扩频使用的正交覆盖码可以考虑使用Walsh码、DFT码等。对于序列长度为2的OCC序列,Walsh码的表达式如下:

$$W_{\text{Walsh}2} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

DFT码的表达式与Walsh码一致,如下:

$$W_{\text{DFT}2} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

在OCC序列长度为4的情况下,Walsh码表示为:

$$W_{\text{Walsh}4} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

DFT码表示为:

$$W_{\text{DFT}4} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -j & -1 & j \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & j & -1 & -j \end{bmatrix} \quad (7)$$

Walsh码基于Hadamard矩阵生成,码字间天然正交,适用于低复杂度场景。Walsh码的二进制特性(± 1)简化了扩频与解扩操作,适合卫星终端低功耗的需求。DFT码在频偏场景下具有更好的相位对齐特性,适用于符号内OCC。此外,DFT码适用于非2的幂次码长,可以满足特殊场景的需求。因此,Walsh码适用于低复杂度、静态场景(如时隙间OCC),而DFT码适用于高动态、灵活码长需求场景(如符号内OCC)。

1.4 仿真评估

由于符号间OCC容量增强方案的复杂度与性能提升失衡,且使用条件较为苛刻,本文主要对实用性更强的时隙间OCC容量增强方案和符号内OCC容量增强方案进行仿真评估。依据现有手机直连卫星的应用,主要考虑低数据速率业务,评估的性能指标包括:达到目标误块率(block error rate, BLER)10%所需的信噪比(signal to noise ratio, SNR),以及该SNR下的吞吐量。仿真基于3GPP为卫星通信定义的NTN TDL-C Rural标准化信道模型^[9],用于模拟低轨卫星在开阔区域的通信环境特性,综合考虑了卫星高速运动带来的多普勒效应、多径时延扩展、路径损耗等关键参数。关键仿真参数见表2。不同OCC方案



的性能比较如图5所示，并由此整理得到关键性能指标。性能评估结果对比见表3。

表2 关键仿真参数

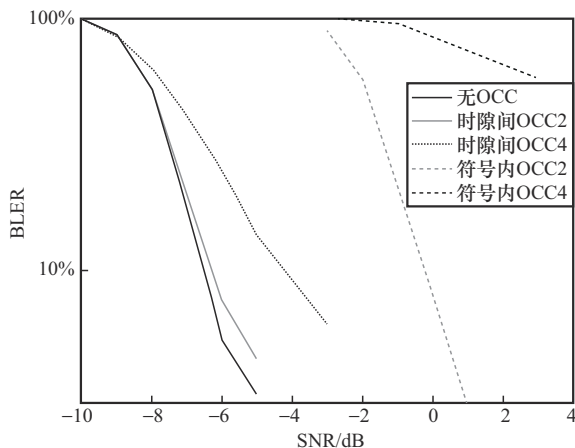
参数	值
信道模型	NTN-TDL-C Rural, 30° 仰角
载波频率	2 GHz
信道带宽	180 kHz
子载波间隔	15 kHz
信道编码	LDPC
调制与编码方案	时隙间OCC方案: QPSK 码率 379/1 024 符号内OCC方案: 16QAM 码率 378/1 024
最大重复次数	16
OCC长度	2、4
OCC序列	时隙间OCC方案: Walsh 码 符号内OCC方案: DFT 码
时偏	0.944×10^{-6} s
频偏	0.1×10^{-6}

表3 性能评估结果对比

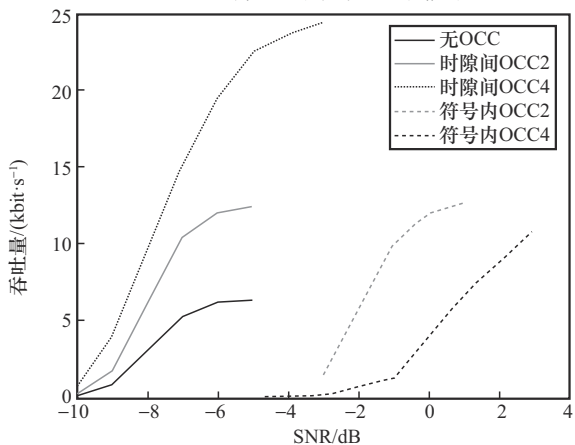
方案	SNR	满足SNR需求的总吞吐	吞吐量提升
现有资源分配方案	-6.4 dB	5.8 kbit/s	—
时隙间OCC容量增强方案: 序列长度为2	-6.2 dB	11.6 kbit/s	200%
时隙间OCC容量增强方案: 序列长度为4	-4.2 dB	23.2 kbit/s	400%
符号内OCC容量增强方案: 序列长度为2	-0.3 dB	11.6 kbit/s	200%
符号内OCC容量增强方案: 序列长度为4	难满足	—	—

由图5和表3可知，相较于现有资源分配方案，时隙间OCC容量增强方案在码长 $N=2$ （OCC序列长度为2）时，系统总吞吐量从5.8 kbit/s提升至11.6 kbit/s，增益达200%；在码长 $N=4$ （OCC序列长度为4）时，系统吞吐量进一步提升至23.2 kbit/s，增益达400%。这是由于时隙间OCC通过时域扩频复用，在相同的资源上复用了更多的用户，并且每个用户的有效数据速率没有降低，使得吞吐量能够成倍提升，这与前文理论分析相符，证明了该方案实现NTN上行容量增强的可行性。符号内OCC容量增强方案在序列长度为2时，实现了11.6 kbit/s的吞吐量，同样实现了相较于现有资源分配方案的200%提升，与前文理论分析相符，证明了其同样可以实现NTN的上行容量增强。然而，对于序列长度为4的符号内OCC容量增强方案，因解调性能急剧下降未能达到目标BLER，凸显了符号内扩频使用更高阶的调制方式在长码场景下的局限性。

虽然时隙间OCC容量增强方案的容量增益与码长呈正相关，但存在显著的SNR损失（OCC序列长度为2时损失0.2 dB，OCC序列长度为4时损失2.2 dB）。此现象主要由时域跨度增加导致的频偏相位累积引起，尤其在长码场景下更为明显。符号内OCC容量增强方案虽时域跨度短、抗频偏能力强，但其OCC序列长度为2的方案仍存在6.1 dB的SNR损失，性能表现较差，且无法支



(a) 不同OCC方案的BLER性能对比



(b) 不同OCC方案的吞吐量增益对比

图5 不同OCC方案的性能比较

持OCC序列长度为4的高复用需求。其性能下降源于扩频后可用资源不足导致的高阶调制需求，对信道条件敏感。因此，对于时隙间OCC容量增强方案，需要优化频偏补偿算法以抑制长码场景下的相位旋转。此外，可探索混合OCC容量增强方案，如短码复用结合多波束协同，兼顾容量与鲁棒性。对于符号内OCC容量增强方案，需要联合优化OCC序列与调制编码方案，以降低解调复杂度。

在低轨卫星通信系统中，若业务需求以容量优先且具备较强频偏补偿能力，时隙间OCC容量增强方案的高增益特性更具优势；若系统需要兼顾低时延与抗频偏能力，符号内OCC容量增强方案的短时域跨度特性更为适用。

在5G NTN的上行容量增强标准化讨论中，3GPP对于上述OCC容量增强方案均进行了讨论，目前已排除符号间OCC容量增强方案。对于OCC序列，目前已明确不支持长度为8的方案，长度为2时采用时隙间OCC容量增强方案，长度为4时采用何种方案仍在讨论中。

1.5 基于IoT NTN的上行容量增强方案

3GPP中除开展针对NR NTN的上行容量增强外，同时也在开展针对IoT NTN的上行容量增强。相对NR NTN的上行容量增强，IoT NTN与其最大的区别主要在于两方面：一方面是支持的子载波间隔不同，即NR NTN支持的子载波间隔为15 kHz的倍数，而IoT NTN支持的子载波间隔为3.75 kHz和15 kHz两种；另一方面是频域调度的粒度不同，NR NTN仅支持多载波调度，而IoT NTN支持单载波和多载波两种调度。

对于单载波而言，当采用15 kHz的子载波间隔时，与NR NTN一样，IoT NTN支持时隙间OCC复用，两者不同之处在于以下两方面。

(1) 由于一个资源单位(resource unit, RU)的持续时间较长(长度为8 ms)，OCC长度等于4时，用户间干扰会导致性能大幅下降，因此仅

支持OCC长度为2。

(2) 由于IoT NTN的一个时隙中仅有一个资源单元(resource element, RE)为解调参考信号(demodulated reference signal, DMRS)，对DMRS进行CDM增强时需要对基序列进行增强，这也导致了不支持OCC的UE(Rel-19之前的UE)与支持OCC的UE无法复用。当采用3.75 kHz的子载波间隔时，与NR NTN不同，IoT NTN中支持符号级OCC复用，原因是一个RU的持续时间较长(长度为32 ms)，会造成相位旋转，因此仅支持OCC长度等于2。由于相位旋转的问题，对DMRS也需要增强。

由于多载波的传输主要用于在高SNR条件下使用，目前对于多载波的情况是否支持容量增强，仍在探讨中。如果后续需要支持多载波的增强，可以考虑复用NR NTN的结论或者IoT NTN单载波的结论，并对有差异的地方进行额外增强即可。

在3GPP中除对窄带上行物理共享信道(narrow-band physical uplink shared channel, NPUSCH)格式1(format1)的容量增强外，对窄带物理随机接入信道(narrow-band physical random access channel, NPRACH)是否进行容量增强也进行了讨论。考虑NPRACH并不是上行瓶颈信道，因此，目前暂没有对NPRACH进行增强。

2 5G NTN的下行容量增强技术方案

以5G NTN的上行容量增强为参考，也可以进一步拓展到5G NTN的下行容量增强。目前来看，5G NTN的下行容量增强主要体现在两个方面：一是针对下行业务信道的容量增强，二是针对下行控制信道的容量增强。

针对下行业务信道的容量增强，技术方案与前述上行业务信道的容量增强方案类似，主要涉及基于已有时频资源的冗余传输，将所支持的用



户从单用户扩展到多用户，具体技术也可以考虑时隙级OCC容量增强方案和符号级OCC容量增强方案。

针对下行控制信道的容量增强，主要来自控制信道针对业务信道进行指示，在业务信道增强之后，涉及控制信道的指示资源不足，由此需要进行容量增强。例如，上行传输包括动态调度和半静态配置，其中动态调度是由物理下行控制信道（physical downlink control channel, PDCCH）调度的。物理上行共享信道（physical uplink shared channel, PUSCH）在采用了上行容量增强后，可支持上行传输的UE变多，随之会带来PDCCH在下行资源中的占比增大。PUSCH和PDCCH的资源分配示意图如图6所示，以不同的颜色表示不同的UE，假设可用频域资源为6PRB，每个UE传输PUSCH需要占用的资源为1PRB，可支持的重复次数为4，时域资源以4个时隙为例，

不考虑OCC，则可容纳的UE为6个。假设一个CORESET占用的时域资源为2个符号，下行与上行的频域资源相同。每个UE的聚合等级为2，每个UE占用的RE数为 $2 \times 6 \times 12 \times 1 = 144$ 个（每个控制信道单元（control channel element, CCE）对应6个资源单元组（resource element group, REG），每个REG时域上占用1个PRB、频域上占用1个符号），则一个CORESET可以容纳的UE数为 $2 \times 12 \times 6 / 144 = 1$ ，因此，需要6个CORESET来传输PDCCH。

在PUSCH中使用OCC方式进行容量增强，会导致对应的PDCCH资源占用成倍增加。以图6中PUSCH的1PRB为例进行对比。加入OCC前后PUSCH和PDCCH资源分配对比如图7所示，在无OCC的情况下，PUSCH中1个PRB仅能由1个UE使用，此时PDCCH为其分配资源为1个CORESET，即频域资源为6PRB，时域资源为2个

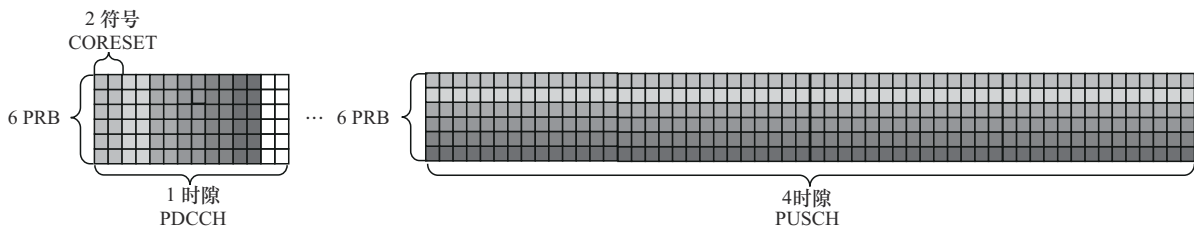


图6 PUSCH和PDCCH的资源分配示意图

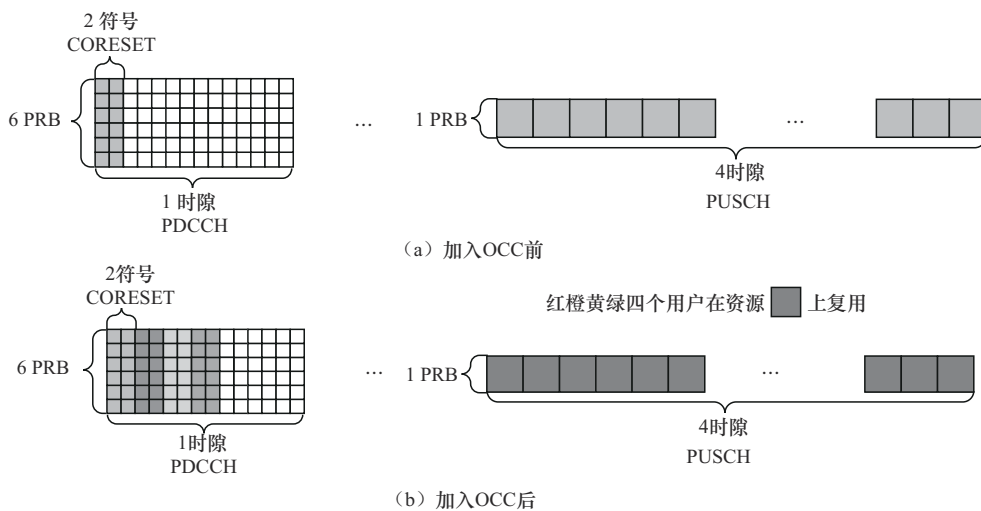


图7 加入OCC前后PUSCH和PDCCH资源分配对比

符号。采用时隙间 OCC 方案进行容量增强后，假设 OCC 长度为 4，则相同上行资源内可容纳 4 个 UE，传输 4 个 UE 对应的 PDCCH 需要占用 4 个 CORESET，是不使用 OCC 情况下的 4 倍，导致了与 PUSCH 同样资源对应的 PDCCH 资源在下行资源占比中增大，这将会影响其他下行信道的性能。因此，为了避免对其他下行信道和信号产生影响，且保证上行数据信道的复用，可以考虑对于上行复用的多个 UE 采用一个下行控制信息（downlink control information, DCI）来调度，实现 4 个 UE 对应的 PDCCH 仅占用 1 个 CORESET，满足在 PUSCH 使用 OCC 进行多用户复用带来的 PDCCH 容量增强需求。此方案的引入需要考虑系列关键问题，一是如何设计一个 DCI 同时调度多个 UE，二是每个 UE 的正交码如何指示。

3 基于非正交多址接入的容量增强技术

尽管时隙级 OCC 容量增强方案或符号级 OCC 容量增强方案实现了给定时频资源上从单用户到多用户的复用，且容量进行了增强，但是该类方案的容量增益受限于正交码的理论上限（如 OCC 序列长度为 4 时仅支持 4 用户复用）。为进一步突破容量瓶颈，可以采用非正交多址接入技术，发送端引入更大的非正交扩频资源池，接收端利用非线性检测来进行多用户区分。与正交扩频方式的容量增强方案相比，基于非正交多址接入的容量增强技术，能够带来容量的进一步提升。

以图样分割多址接入（pattern division multiple access, PDMA）技术为例^[15-18]，其应用于卫星通信上行链路的系统模型如图 8 所示。在发送端，将重复传输的 N 个时隙资源通过 PDMA 图样矩阵分配给 K 个用户（ $K \gg N$ ），实现复用数远高于正交扩频方案的多用户复用。在接收端，基于 PDMA 图样的特征结构，采用广义串行干扰消

除（generalized successive interference cancellation, GSIC）算法，实现准最优多用户检测。

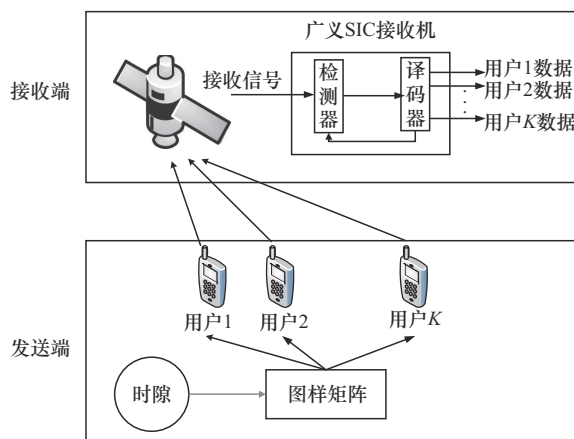


图8 PDMA应用于卫星通信上行链路的系统模型

在上行传输过程中， K 个用户在 N 个资源上通过 PDMA 图样矩阵进行复用。设第 k 个用户经过信道编码与星座映射后的信号为 x_k ，则该用户信号经 PDMA 图样矩阵映射后为：

$$s_k = \mathbf{g}_k x_k, 1 \leq k \leq K \quad (8)$$

其中， \mathbf{g}_k 表示第 k 个用户的 PDMA 特征图样的 $N \times 1$ 的向量。在 N 个资源（时隙）上，所有 K 个用户的 PDMA 特征图样构成了 $N \times K$ 的 PDMA 图样矩阵，据此可以表示为：

$$\mathbf{G}_{\text{PDMA}}^{[N,K]} = [\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_K] \quad (9)$$

设向量 \mathbf{h}_k 表示第 k 个用户在不同时隙内的上行信道响应，向量 \mathbf{n} 表示信道在不同时隙资源下的噪声，则卫星接收到的信号可表示为：

$$\mathbf{y} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K] \odot \mathbf{G}_{\text{PDMA}}^{[N,K]} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (10)$$

其中， \odot 为哈达玛乘积，表示两个矩阵的对应元素相乘。

卫星在知晓 PDMA 图样矩阵与拥有良好的信道估计的条件下，对接收到的信号 \mathbf{y} 使用 GSIC 算法可以将每个用户的信号 x_1, x_2, \dots, x_K 分别一一检出，实现了 K 个用户在 N 个时隙资源上的复用。

基于 PDMA 设计思想的非正交上行容量增强



方案通过稀疏码本设计, 支持用户数可以超过资源数的限制。通常 N 越大, 就能构造更大的 PDMA 图样矩阵 $\mathbf{G}_{\text{PDMA}}^{[N,K]}$, 则意味着多用户的复用倍数越大。假如 PDMA 图样矩阵由最简单的

$$\mathbf{G}_{\text{PDMA}}^{[4,15]} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

即在 OCC 方案能提升用户容量 4 倍的情况下, PDMA 方案最大能够提升用户容量 15 倍。当然, 实际系统具体能达到的复用倍数, 与接收端

“1”“0”元素来构造, 其中“1”代表有资源映射, “0”代表无资源映射, 那么, 与 OCC 序列长度为 4 对应的 PDMA 最大图样矩阵可以表示为:

检测性能及计算复杂度等因素有关。

为进一步说明, 以在 4 时隙复用 8 个用户为例, 对应的 PDMA 图样矩阵如式 (12) 所示:

$$\mathbf{G}_{\text{PDMA}}^{[4,8]} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

PDMA 方式的多用户资源复用情况如图 9 所示, 用户 1 分配到时隙 1、2、3 重复发送数据, 用户 2 到用户 7 在 4 个时隙中分配到各不完全相同

的两个时隙, 而用户 8 分配到时隙 4 发送数据。在此方案下, 将 PDMA 图样矩阵代入式 (10), 可以得到卫星接收到的信号为:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_{21} & h_{22} & 0 & 0 & h_{25} & h_{26} & 0 & 0 \\ h_{31} & 0 & h_{33} & 0 & h_{35} & 0 & h_{37} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_{44} & 0 & h_{46} & h_{47} & h_{48} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

	时隙1	时隙2	时隙3	时隙4
用户1	S1	S1	S1	
用户2	S2	S2		
用户3	S3		S3	
用户4	S4			S4
用户5		S5	S5	
用户6		S6		S6
用户7			S7	S7
用户8				S8

图9 PDMA 方式的多用户资源复用情况

在 4 个时隙中, 在良好信道估计的条件下, 卫星从接收到的信号中可以检出 8 个用户发送的

信号, 实现了在 4 个时隙上复用 8 个用户的目标, 且不影响每个用户的有效数据速率。从本文第 1.1 节对时隙间 OCC 容量增强方案的介绍与分析中可以知道, 正交扩频技术在 4 个时隙上最多仅支持 4 个用户复用 (OCC 序列长度为 4), 而在非正交多址与时隙间 OCC 容量增强方案下, 单用户的有效数据速率是一致的。因此, 非正交上行容量增强方案相比于时隙间 OCC 容量增强方案, 又将容量扩展了 2 倍, 突破了正交扩频技术的理论上限, 提升了系统的容量。

非正交的上行容量增强方案给每个用户分配了不同的分集度, 可以为用户提供不同的分集增

益。因此,可以根据用户信道的质量对PDMA图样矩阵动态调整,为信道条件较差的用户分配较多的资源,以提升性能。

尽管基于PDMA的非正交上行传输方案在理论上具备显著优势,但其在低轨卫星通信场景下的部署仍可能面临诸多挑战,存在众多潜在的研究方向。首先,GSIC算法的有效性依赖于精确的多用户信道状态信息(channel state information, CSI)获取,而卫星通信场景的高时延与高动态特征加剧了CSI获取的难度,未来考虑结合人工智能(artificial intelligence, AI)实时预测CSI,动态调整PDMA矩阵,优化CSI获取算法,确保GSIC算法的有效性,平衡系统的容量与鲁棒性。其次,当用户数增加时,GSIC的迭代解码复杂度急剧上升,可能在未来支持更多用户复用时成为性能瓶颈,因此,降低接收算法的复杂度是重要的优化方向,可以考虑开发基于深度学习的近似GSIC算法,通过神经网络建模干扰消除过程,降低计算开销。此外,为进一步提升频谱效率,可以与多波束天线、智能超表面等技术结合,通过空-时-码联合复用,进一步提升性能。

4 结束语

低轨卫星通信系统作为全球网络覆盖的重要补充,其容量提升是推动卫星互联网发展的重点。本文从正交扩频与非正交多址两方面展开研究,在正交扩频领域,时隙间OCC容量增强方案通过时域扩频能实现4倍容量增益,但受限于频偏敏感性;符号内OCC容量增强方案虽抗频偏能力较强,却面临高阶调制需求的挑战。在非正交多址领域,基于PDMA的方案通过稀疏码本设计与动态资源映射,能够实现4时隙资源下最大15用户复用,将系统的容量在时隙间OCC容量增强方案的基础上又实现进一步提升,突破了正交扩频技术对容量增益的理论上限,为上行容量增强

提供了新思路。随着NTN标准工作在3GPP中的持续开展,本文所开展的研究将为NTN容量增强工作提供技术指导,助力手机直连卫星标准与产业的发展。

参考文献:

- [1] 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.
- [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] 张剑寅, 尼凌飞, 王汉白, 等. 面向星地融合的5G网络增强及关键技术研究[J]. 电信科学, 2024, 40(6): 38-48.
ZHANG J Y, NI L F, WANG H B, et al. Research on the enhancement and key technologies of 5G network for satellite-terrestrial integration[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(6): 38-48.
- [4] 吴晓文, 焦侦丰, 凌翔, 等. 面向6G的卫星通信网络架构展望[J]. 电信科学, 2021, 37(7): 1-14.
WU X W, JIAO Z F, LING X, et al. Outlook on satellite communications network architecture for 6G[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(7): 1-14.
- [5] AHMAD B, RIVIELLO D G, GUIDOTTI A, et al. Improved graph-based user scheduling for sum-rate maximization in LEO-NTN systems[C]//Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Workshops (ICASSPW). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-5.
- [6] 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.
- [7] VÁZQUEZ M Á, PÉREZ-NEIRA A, CHRISTOPOULOS D, et al. Precoding in multibeam satellite communications: present and future challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(6): 88-95.
- [8] CHEN S Z, LIANG Y C, SUN S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(2): 218-228.



- [9] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks: TR 38.811[S]. 2017.
- [10] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): TR 38.821[S]. 2020.
- [11] 李俊丽, 曹伟, 张楠, 等. 面向星地融合的卫星物联网通信容量增强技术研究[J]. 邮电设计技术, 2024(7): 23-29.
LI J L, CAO W, ZHANG N, et al. Research on capacity enhancement of IoT-NTN communication for satellite-terrestrial integration[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2024(7): 23-29.
- [12] AZARI M M, SOLANKI S, CHATZINOTAS S, et al. Evolution of non-terrestrial networks from 5G to 6G: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(4): 2633-2672.
- [13] MARDHIYYA A, ASTUTI R P, ADRIANSYAH N M. A multiuser interference mitigation scheme in uplink MC-CDMA with CFO Estimation-MMSE FEQ technique[C]//Proceedings of the 2017 International Conference on Signals and Systems (ICSigSys). Piscataway: IEEE Press, 2017: 6-12.
- [14] 3GPP. Physical layer procedures for data: TS 38.214[S]. 2023.
- [15] CHEN S Z, REN B, GAO Q B, et al. Pattern division multiple access: a novel nonorthogonal multiple access for fifth-generation radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(4): 3185-3196.
- [16] 康绍莉, 戴晓明, 任斌. 面向5G的PDMA图样分割多址接入技术[J]. 电信网技术, 2015(5): 43-47.
KANG S L, DAI X M, REN B. PDMA pattern division multiple access technology for 5G[J]. Telecommunications Network Technology, 2015(5): 43-47.
- [17] DAI X M, ZHANG Z Y, BAI B M, et al. Pattern division multiple access: a new multiple access technology for 5G[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(2): 54-60.
- [18] 任斌. 面向5G的图样分割非正交多址接入(PDMA)关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.

REN B. Research on the key technology of pattern segmentation nonorthogonal multiple access (PDMA) for 5G[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017.

[作者简介]



林家贤 (2001-), 男, 电信科学技术研究院硕士生, 中信科移动通信技术股份有限公司工程师, 主要研究方向为卫星通信、多址接入。



关鹏 (1991-), 女, 中信科移动通信技术股份有限公司工程师, 主要研究方向为卫星物理层技术。



康绍莉 (1974-), 女, 博士, 中信科移动通信技术股份有限公司移动系统研究高级技术专家, 无线移动通信国家重点实验室工程师, 主要研究方向为多址接入、频谱共享、卫星通信及6G等。



陈山枝 (1969-), 男, 博士, 无线移动通信国家重点实验室主任, 主要研究方向为5G和6G、车联网、卫星移动通信等。