

# 面向星地融合的

# 卫星物联网通信容量增强技术研究

## Research on Capacity Enhancement of IoT-NTN Communication for Satellite-terrestrial Integration

李俊丽<sup>1,2</sup>, 曹伟<sup>1,2</sup>, 张楠<sup>1,2</sup>, 栗子阳<sup>1,2</sup>, 崔方宇<sup>1,2</sup> (1. 中兴通讯股份有限公司, 广东深圳 518057; 2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 广东深圳 518055)

Li Junli<sup>1,2</sup>, Cao Wei<sup>1,2</sup>, Zhang Nan<sup>1,2</sup>, Li Ziyang<sup>1,2</sup>, Cui Fangyu<sup>1,2</sup> (1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China; 2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China)

### 摘要:

作为未来6G星地融合通信的前瞻性探索,5G-A针对非陆地通信的应用场景、频谱、关键通信技术以及面临的挑战等展开了系统研究。针对卫星物联网下的大连接需求,基于现有协议中的NPUSCH信道传输结构,设计了不同颗粒度下的码分方案,并基于NTN场景下典型假设进行了性能评估。仿真结果表明所提方案能够有效提升卫星物联网的上下行通信容量。

### 关键词:

星地融合通信; 卫星物联网; 容量增强; 数据解调信号

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2024.07.005

文章编号:1007-3043(2024)07-0023-07

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

As a prospective exploration of future 6G satellite-terrestrial integration communications, 5G-A has conducted systematic research on the application scenarios, spectrum, key communications technologies, and challenges of 5G-A NTN communications. In response to the large connection requirements of IoT-NTN, a code division scheme of different granularity is designed based on the NPUSCH channel transmission structure in existing specification, and performance evaluation is carried out based on typical assumptions in NTN scenarios. The simulation results show that the proposed scheme can effectively improve the uplink communication capacity of the IoT-NTN.

### Keywords:

Satellite-terrestrial integration communication; IoT-NTN; Capacity enhancement; DMRS

引用格式: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.

## 1 星地融合通信研究现状

近年来,随着业界对星地融合通信关注度的不断提升,工业界和学术界对星地融合提出了更迫切的需求,并开始对星地融合通信系统的网络架构进行早期研究<sup>[1-4]</sup>。3GPP作为通信行业最重要的国际标准组织之一,率先开展了基于非地面网络技术体制的研究和标准化,在R15阶段首先提出并研究了基于5G NR的

非陆地通信(Non-terrestrial network, NTN)的场景、要求和信道模型<sup>[5]</sup>。进入R16阶段,3GPP标准组在终端、无线和核心网等方面开展了关于NTN系统性技术的研究讨论<sup>[6]</sup>。在R17标准中,基于前述研究项目, NR-NTN重点增强了网络架构、时频同步、移动性、频谱等技术并对其进行标准化,同时将相对成熟的NR-NTN技术应用于卫星物联网(Internet of Thing-NTN, IoT-NTN)<sup>[7]</sup>。在R18标准中, NR-NTN进一步完善了5G卫星组网能力,包括频段部署、覆盖增强等, IoT-NTN则进一步完善了移动性、HARQ、GNSS等技

收稿日期:2024-02-16

术<sup>[8]</sup>。

在学术界,文献[9]深入研究了NTN特征对3GPP规范中NR过程的约束并分析了NR技术在NTN上实现典型6G服务的优劣势。文献[10]分析了空天地一体化网络研究的必要性,并首次定义了网络融合发展的不同层次及演进。文献[11]介绍了LEO场景中NTN系统的系统仿真方法,并对系统的吞吐量进行了评估。文献[12]研究了卫星物联网在LEO场景下的残余频偏问题并基于链路仿真给出了残余频偏问题的解决方案。

本文结合3GPP R19标准和学术界关心的关键指标,针对卫星物联网下的大连接需求,对上行容量增强进行了研究<sup>[13]</sup>。其中,第2章对卫星物联网关键技术挑战进行了分析;第3章介绍了现有协议中的NPUSCH(Narrowband Physical Uplink Share Channel)信道传输结构及正交复用技术原理;第4章对基于不同颗粒度的复用方案进行了详细设计;第5章在基于NTN场景下的典型假设进行了性能评估;最后,第6章对全文进行了总结。

## 2 卫星物联网技术挑战

对于卫星移动通信,由于星地之间的传输距离较大,其波束较宽。对于LEO场景,小区覆盖通常跨越数十千米,并且由于每个卫星波束覆盖范围大,具有不同功能和类别的设备数量激增,导致每个波束覆盖的设备数量非常多。同时,NTN支持新的设备类型,如NB-IoT设备,随着具备IoT-NTN功能设备的激增,在卫星波束覆盖范围内每平方公里有数千台设备,每一设备可用的频谱资源也因此大大缩减<sup>[14]</sup>。

根据NB-IoT系统的业务需求,终端的上行发射带宽是180 kHz。由于可用于IoT-NTN系统的频谱资源有限,并且NTN支持重复传输,而重复传输在一定时间内会占用特定频谱资源,当某一用户使用该资源传输时,会进一步增加其他用户的传输时间。因此在NTN中,当允许使用重复传输支持覆盖增强时,有限的资源将会进一步导致系统容量的下降<sup>[15-16]</sup>。

空天地一体化是一种新兴的网络架构,它通过深度融合空基、天基和地基网络资源,构建一个覆盖全球、无处不在的通信网络。因此,空天地一体化将具有更高的网络容量,可以同时连接更多设备,更好地满足未来物联网对通信网络的需求<sup>[17]</sup>。

为了避免频谱成为NTN通信的瓶颈,迫切需要提

升频谱资源的利用率,允许设备使用正交技术在相同资源上同时进行传输是NTN研究中非常重要的课题。

## 3 IoT-NTN信道设计

### 3.1 信道传输结构

对于IoT系统,引入资源单元(resource unit, RU)作为NPUSCH的基本调度单元。在文献[14]中,定义了NPUSCH信道传输结构,时域占用 $N = N_{\text{rep}} N_{\text{RU}} N_{\text{slots}}^{\text{UL}} N_{\text{symp}}^{\text{UL}}$ 个符号,其中 $N_{\text{rep}}$ 为重复次数, $N_{\text{RU}}$ 为调度的资源单元数, $N_{\text{slots}}^{\text{UL}}$ 为一个资源单元所包含的上行时隙数, $N_{\text{symp}}^{\text{UL}}$ 为每一时隙所包含的符号数;频域占用 $N_{\text{sc}}^{\text{RU}}$ 个连续子载波,详细参数如表1所示。对于DMRS(Demodulation Reference Signal),每一时隙内可用的DMRS符号数与NPUSCH格式有关,如NPUSCH格式1的每一时隙包含1个DMRS符号。

表1 NPUSCH格式1资源单元配置参数

子载波间( $\Delta f$ )/kHz	$N_{\text{sc}}^{\text{RU}}$	$N_{\text{slots}}^{\text{UL}}$	$N_{\text{symp}}^{\text{UL}}$
3.75	1	16	7
15	1	16	
	3	8	
	6	4	
	12	2	

对于资源映射,复调制符号从第一时隙开始,按照先频域后时域的原则依次映射。在映射完第1个 $N_{\text{slots}}$ 后,该 $N_{\text{slots}}$ 个时隙首先被重复 $M_{\text{identical}}^{\text{NPUSCH}} - 1$ 次,然后继续映射分配的资源单元中的下一 $N_{\text{slots}}$ 时隙中的数据。对于NPUSCH传输块,总传输时隙被分为 $N_{\text{rep}} / M_{\text{identical}}^{\text{NPUSCH}}$ 个时隙块,每一时隙块包含 $M_{\text{identical}}^{\text{NPUSCH}} N_{\text{RU}} N_{\text{slots}}^{\text{UL}}$ 个连续时隙,2个冗余版本在时隙块间循环。其中:

$$M_{\text{identical}}^{\text{NPUSCH}} = \begin{cases} \min(\lceil N_{\text{rep}}/2 \rceil, 4) & , N_{\text{sc}}^{\text{RU}} > 1 \\ 1 & , N_{\text{sc}}^{\text{RU}} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$N_{\text{slots}} = \begin{cases} 1 & , \Delta f = 3.75 \text{ kHz} \\ 2 & , \Delta f = 15 \text{ kHz} \end{cases} \quad (2)$$

为了说明NPUSCH信道结构,图1给出15 kHz子载波间隔下单音传输示意。

### 3.2 OCC复用技术

以2用户为例,说明OCC(Orthogonal Cover Code)复用基本原理。假设用户1的数据为 $s_1(n)$ ,信道为 $h_1(n)$ ,其长度占据时域上的一个重复,经过正交码[1, 1]扩展后发送时域信号 $T_1 = [s_1(n), s_1(n)]$ ;用户2的

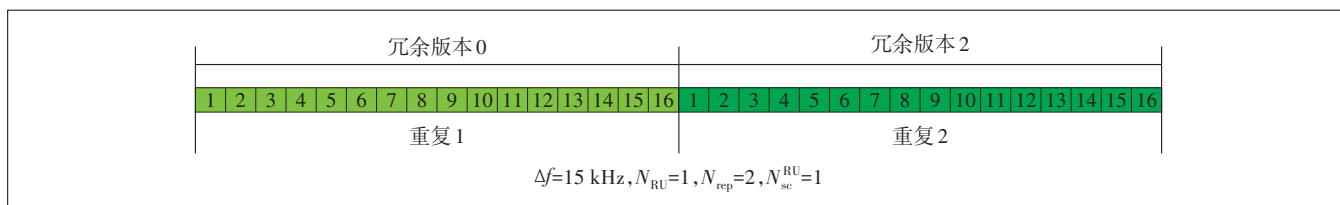


图1 单音传输结构

数据为  $s_2(n)$ , 信道为  $h_2(n)$ , 其长度占据时域上的一个重复, 经过正交码  $[1, -1]$  扩展后发送的时域信号  $T_2 = [s_2(n), -s_2(n)]$ 。假设每个用户时域上的前半部分和后半部分经历相同的信道  $H$ , 那么接收到的时域信号  $R = [r_{\text{fro}}(n), r_{\text{aft}}(n)]$ , 其中:

$$r_{\text{fro}}(n) = h_1(n) \otimes s_1(n) + h_2(n) \otimes s_2(n) \quad (3)$$

$$r_{\text{aft}}(n) = h_1(n) \otimes s_1(n) - h_2(n) \otimes s_2(n) \quad (4)$$

经傅里叶变换得:

$$R_{\text{fro}}(k) = H_1(k) \times S_1(k) + H_2(k) \times S_2(k) \quad (5)$$

$$R_{\text{aft}}(k) = H_1(k) \times S_1(k) - H_2(k) \times S_2(k) \quad (6)$$

因此用户接收到的频域数据为:

$$\begin{bmatrix} H_1(k) \times S_1(k) \\ H_2(k) \times S_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_{\text{fro}}(k) \\ R_{\text{aft}}(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

最后, 经检测均衡得到用户的数据符号, 并进行相应的收端解调、解码等操作。

基于上述分析可知, 当时频偏较大时, 应用 OCC 的用户每一时刻的信道相差较大, 此时无法将前一时刻的信道等效为后一时刻的信道。因此, 当时频偏较大时, 解 OCC 性能下降。

## 4 IoT-NTN 的通信容量增强方案设计

OCC 技术可以将多个用户的数据复用在相同的时频资源上, 时域复用粒度可以是重复级、时隙级或符号级。

### 4.1 符号级 OCC 方案

对于符号级 OCC 方案, 为了支持 OCC 复用在多个 OFDM 符号上, 要求多个连续的 OFDM 符号上的复调制符号相同, 需修改传统资源映射。首先, 确定传输块的总持续符号数  $N_{\text{rep}} N_{\text{RU}} N_{\text{slots}}^{\text{UL}} N_{\text{symbol}}^{\text{UL}}$ , 然后将总传输符号分为  $N_{\text{rep}} / M_{\text{identical}}^{\text{NPUSCH}}$  个符号块, 每一符号块包含  $M_{\text{identical}}^{\text{NPUSCH}} N_{\text{RU}} N_{\text{slots}}^{\text{UL}} N_{\text{symbol}}^{\text{UL}}$  个连续符号。在映射完第 1 符号后, 该符号首先被重复  $M_{\text{identical}}^{\text{NPUSCH}} - 1$  次, 然后继续映射分配的资源单元中的下一符号中的数据。在映射时, 跳过 DMRS 所占用的符号。

在该方案中, 重复处于符号级, 因此不同符号由于频偏引起的相位误差会相当小, 不同 OCC 元素(即符号)之间的信道信息差也比时隙级 OCC 小。简而言之, 符号级 OCC 方案对资源映射的影响更大, 但对频偏的鲁棒性更好。为了说明符号级 OCC 的 NPUSCH 信道结构, 以 2 用户为例, 给出 15 kHz 子载波间隔下多音传输和单音传输示意(见图 2 和图 3)。

### 4.2 时隙级 OCC 方案

与符号级 OCC 方案类似, 时隙级 OCC 方案需修改传统资源映射。不同于符号级, 时隙级的重复颗粒度为时隙。在映射完第 1 时隙后, 该时隙首先被重复  $M_{\text{identical}}^{\text{NPUSCH}} - 1$  次, 然后继续映射分配的资源单元中的下一时隙中的数据。

在该方案中, 重复处于时隙级, 不同时隙由于频偏引起的相位误差大于符号级, 但不同 OCC 元素(即时

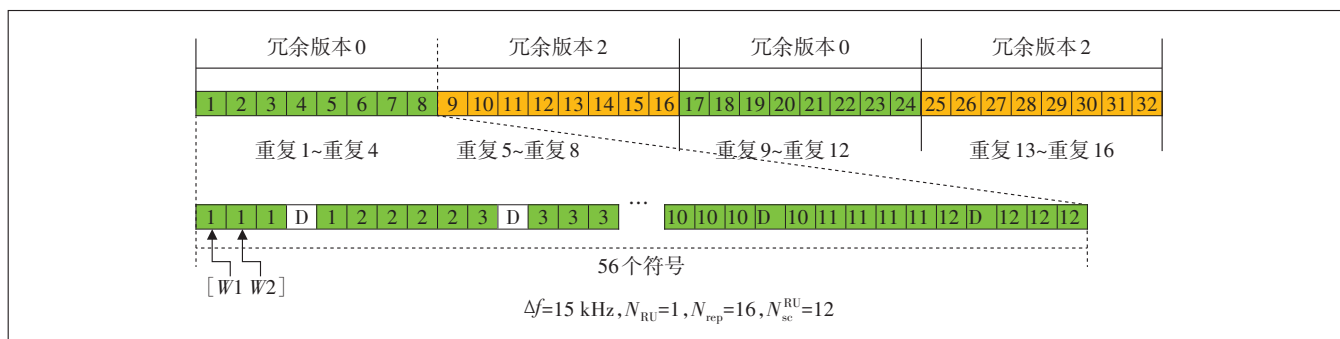


图2 符号级 OCC 多音传输结构

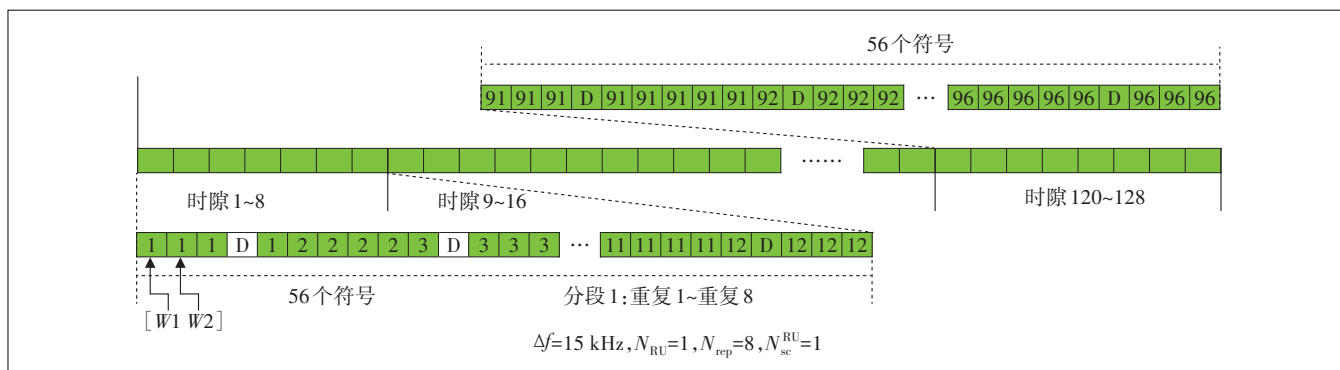


图3 符号级OCC单音传输结构

隙)之间的信道信息差比重复级OCC小。简而言之,时隙级OCC方案对资源映射的影响较大,并且对频偏的容忍度高于重复级OCC。为了说明时隙级OCC的NPUSCH信道结构,以2用户为例,给出15 kHz子载波间隔下多音传输和单音传输示意(见图4和图5)。

### 4.3 重复级OCC方案

对于重复级OCC方案,重用传统资源映射方式,在多个重复上应用OCC实现用户复用。对于多音传输,应分配合适的重复次数以确保应用OCC的多个重复的冗余版本一致。对于单音传输,则需修改当前冗余版本循环,确保使用OCC的多个重复之间的冗余版本相同,如每OCC长度循环更新一次冗余版本。

在该方案中,受频偏影响,不同重复相位误差大于时隙级OCC和符号级OCC,因此重复级OCC方案对频偏的容忍度较低,但不影响传统资源映射方式。

### 4.4 DMRS复用方案

在文献[18]中,定义了多音传输和单音传输的DMRS序列,仅支持单用户传输。基站可通过相邻DMRS符号上的DMRS来估计频偏,并且相邻DMRS符号上的相位旋转应在 $[-\pi, \pi]$ 之间,以确保频偏估计精度不受影响。以SCS为15 kHz为例,当频偏为200 Hz时,每2个DMRS符号相位旋转为 $0.2\pi$ ,每4个则为 $0.8\pi$ ,因此在设计DMRS复用方案时,需要保证用于估计频偏的DMRS符号间的相位旋转不超过最大估计量。

对于多音传输,当多个用户复用在相同时频资源上时,每一用户的DMRS序列可根据配置的循环移位值对基序列进行循环移位,从而得到每一用户的DMRS序列。对于单音传输,当多个用户复用在相同时频资源上时,可通过码分复用(Code-Division Multiplexing, CDM)或时分复用(Time-Division Multiplexing, TDM)的方式使得用户间的DMRS序列正交或分离。

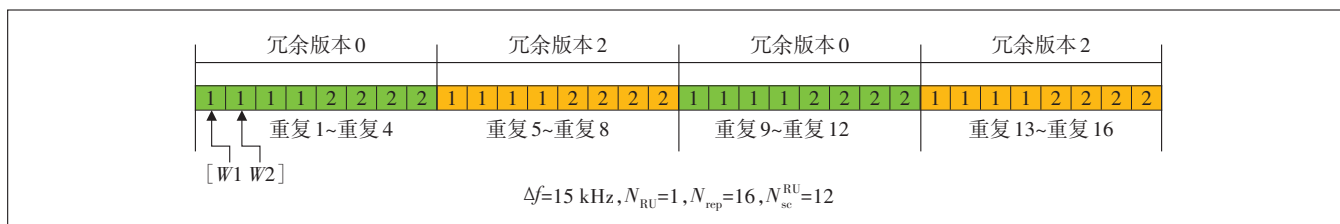


图4 时隙级OCC多音传输结构

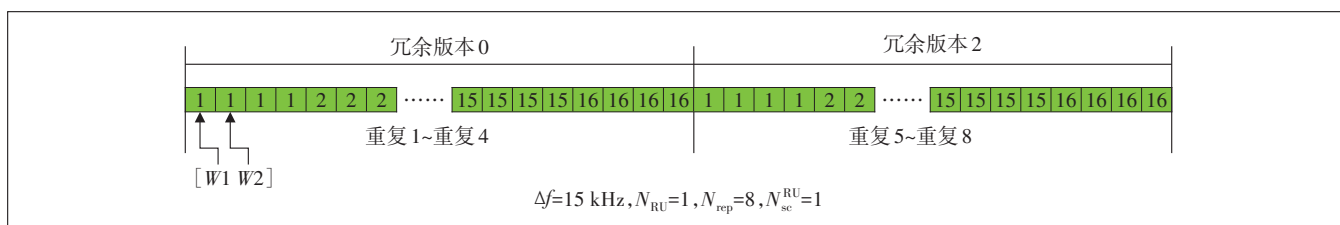


图5 时隙级OCC单音传输结构

对于CDM,使用OCC基于时隙粒度扩展DMRS符号以区分不同用户,扩展长度与OCC长度有关。对于TDM,不同用户的DMRS可以在不同的DMRS符号上传输,假设有2位用户复用,则用户1可在奇数时隙上传输DMRS,用户2可在偶数时隙上传输DMRS。由于TDM DMRS仅能在部分DMRS资源上传输DMRS,因此相比于CDM DMRS,TDM DMRS密度较低。为了说明DMRS复用方案,以2用户为例,给出15 kHz子载波间隔下CDM DMRS和TDM DMRS示意(见图6和图7)。

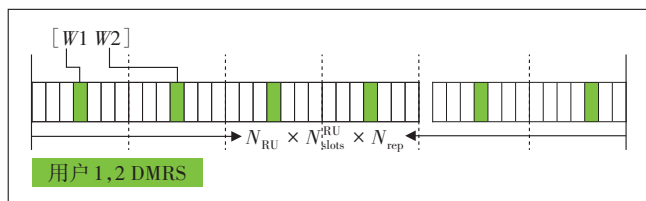


图6 CDM DMRS结构

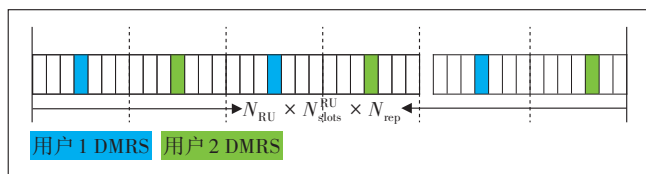


图7 TDM DMRS结构

## 5 IoT-NTN的通信容量增强方案评估

### 5.1 仿真假设

为了评估不同复用颗粒度的OCC方案和DMRS复用方案的性能,采用多用户链路级仿真进行评估。通过比较每个用户的误块率和总吞吐量与基线性能差别,观察不同OCC方案及DMRS复用方案的性能,其具体参数配置如表2所示。

### 5.2 方案评估

#### 5.2.1 OCC方案性能对比

基于表2的仿真假设,评估了不同复用颗粒度的OCC方案性能。多音传输下的OCC方案的性能对比如图8所示,其中残余频偏在基站侧进行了后补偿。由仿真结果可知:

a) 当复用用户的数量为2时,与在相同资源中仅存在一个用户发送NPUSCH相比,重复级OCC、时隙级OCC、符号级OCC方案性能类似,并且几乎没有性能损失。

b) 当复用用户的数量为4时,与在相同资源中仅

表2 仿真参数配置

参数	值	参数	值
轨道	LEO600	仰角	30°
载波频率	2 GHz	子载波间隔	15 kHz
频率误差	所有用户:从[-0.1 ppm, 0.1 ppm]中进行随机选择;忽略频率误差的变化	定时误差	所有用户:从[-97T, +97T]中进行随机选择;定时漂移为80 μs/s
功率损伤	无,用户等功率	信道模型	NTN-TDL-C,用户独立
音数	1,12	RU数	1
波形	DFT-s-OFDM	MIMO	SISO
DMRS	每时隙的第3 <sup>rd</sup> 符号;多音:最多4个DMRS端口;单音:时隙级OCC	OCC序列	2长:[1 1; 1 -1]; 4长:[1 1 1 1; 1 -1 1 -1; 1 1 -1 -1; 1 -1 -1 1]
频率跳频	关闭	OCC长度	2,4
调制阶数	多音:QPSK;单音:π/4 QPSK	传输块大小	16 bit
重复数	多音:16;单音:8	用户数	1,2,4
用户速度	3 km/h	均衡算法	MMSE
信道估计	真实信道估计	关键指标	10%误块率;总吞吐量

存在一个用户发送NPUSCH相比,重复级OCC、时隙级OCC、符号级OCC方案分别有可接受的0.50、0.31、0.16 dB性能损失。

单音传输下的OCC方案的性能对比如图9所示,其中残余频偏在基站侧进行了分段后补偿。由仿真结果可知:

a) 当复用用户的数量为2时,与在相同资源中仅存在一个用户发送NPUSCH相比,重复级OCC、时隙级OCC、符号级OCC方案分别有可接受的0.50、0.40、0.30 dB性能损失。不同方案之间的性能变化几乎可以忽略不计。

b) 当复用用户的数量为4时,与在相同资源中仅存在一个用户发送NPUSCH相比,重复级OCC、时隙级OCC、符号级OCC方案具性能类似,并分别有1.9、1.8、1.6 dB性能损失。进一步地,由于频偏影响,OCC正交性被破坏,误块率(BLER)在一定程度上恶化,但吞吐量成倍增加。

基于上述分析,虽然符号级和时隙级OCC方案比重复级OCC方案对频偏的容忍度略高,但SINR性能增益不明显。针对重复级OCC方案,在可接受的SNR损失下,总吞吐量与符号级和时隙级OCC方案几乎无异,均可以提升系统容量,并且随着复用用户数增加,总吞吐量成倍增长。

但从实现角度,考虑到对当前资源映射方式的影

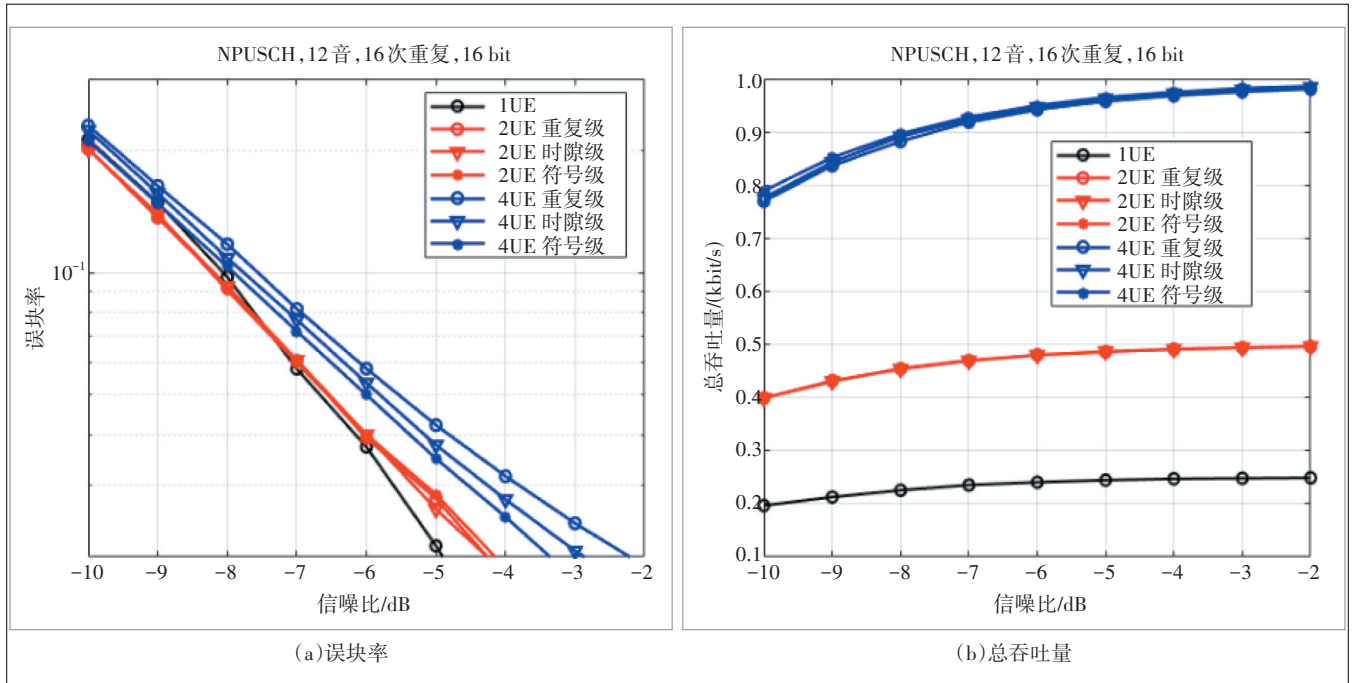


图8 多音传输:不同OCC方案的BLER和总吞吐量性能对比

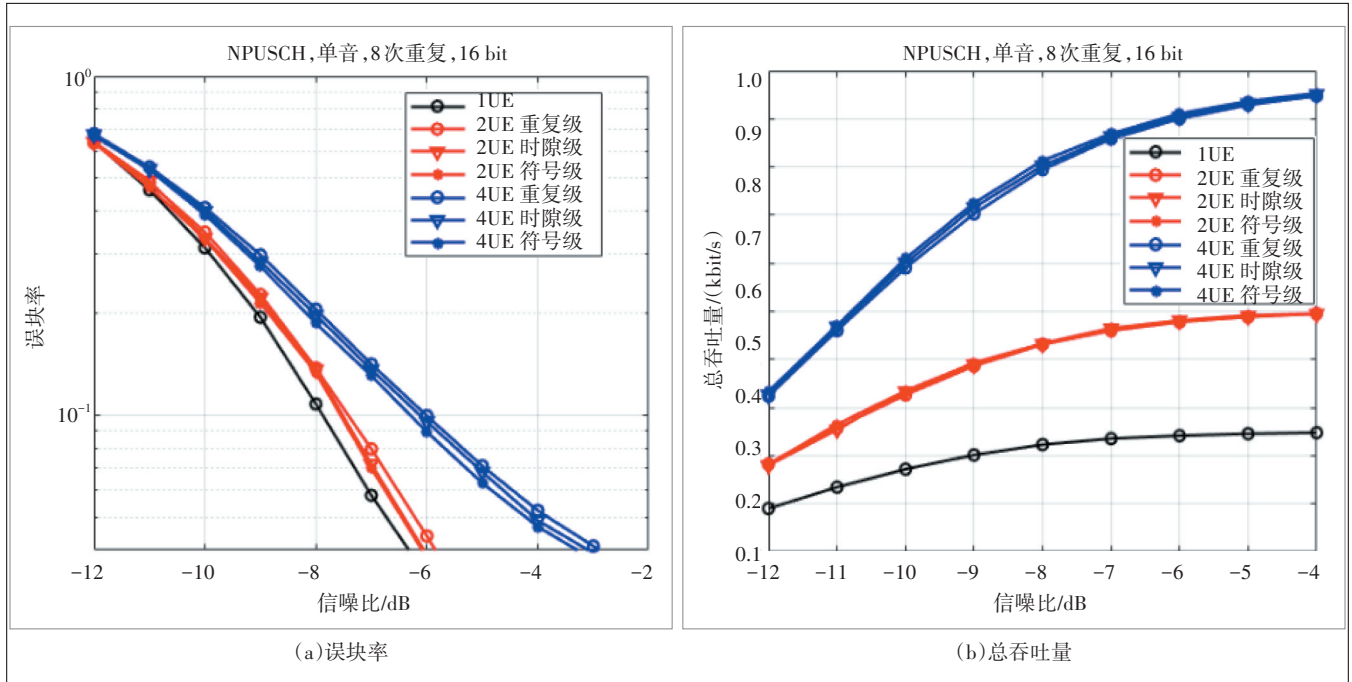


图9 单音传输:不同OCC方案的BLER和总吞吐量性能对比

响,重复级OCC方案能够在性能和实现复杂度之间达成平衡。

### 5.2.2 DMRS方案性能对比

基于表2的仿真假设,在单音传输配置下,评估了2种DMRS复用方案性能。由图10可知,CDM DMRS

比TDM DMRS性能更优。这是因为,为了确保用户间的DMRS不碰撞,TDM DMRS方案要求用户为其他用户的DMRS的传输预留DMRS资源,导致每一用户可用的DMRS符号数随着用户数的增加而降低,从而降低了频偏估计精度,进而导致频偏补偿和信道估计精

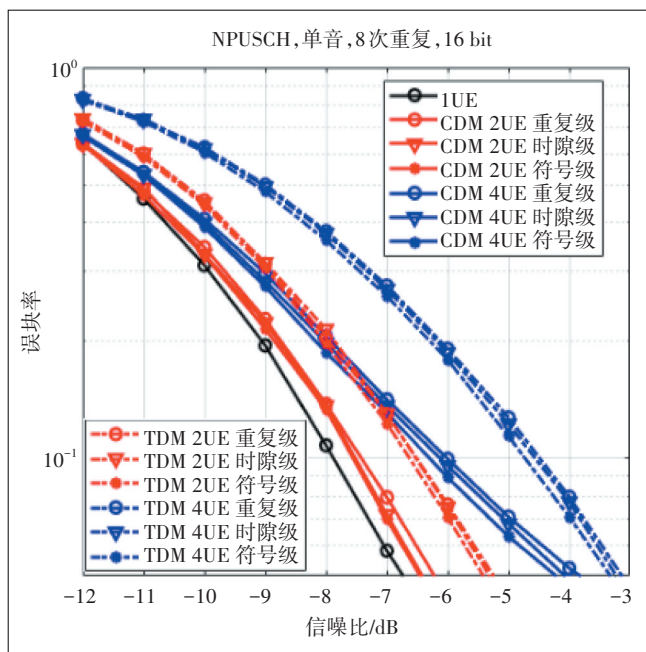


图10 单音传输:CDM DMRS和TDM DMRS方案的BLER性能对比

度下降,影响接收机性能。因此,CDM DMRS方案支持最多4用户复用,且具有明显性能优势。

## 6 总结

在星地融合需求的推动下,提升通信系统容量是系统设计时关注的重要问题。基于卫星物联网通信系统,考虑在上行传输中纳入正交复用技术以达到提升通信系统容量的目的。本文基于正交复用技术,开展了对不同颗粒度的码分方案及时分方案的性能分析。通过对比不同方案的误块率及系统的总吞吐量等指标表现,证明了正交复用技术能够有效地提升上行通信系统容量。相关仿真结果和分析为对应方案的实际应用提供了有价值的参考依据。

### 参考文献:

[1] CORICI M, KAPOVITS A, COVACI S, et al. Assessing satellite-terrestrial integration opportunities in the 5G environment [R/OL]. [2024-01-24]. [https://connectivity.esa.int/sites/default/files/Whitepaper%20-%20Satellite\\_5G%20final.pdf](https://connectivity.esa.int/sites/default/files/Whitepaper%20-%20Satellite_5G%20final.pdf).

[2] LIN X Q, CIONI S, CHARBIT G, et al. On the path to 6G: embracing the next wave of low earth orbit satellite access [J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(12): 36-42.

[3] CHEN W S, LIN X Q, LEE J, et al. 5G-advanced toward 6G: past, present, and future [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(6): 1592-1619.

[4] YANG J Y, GENG Y H, MAO H B, et al. Satellite-terrestrial integrated network architecture towards 6G with user plane function trimming [C]//2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE, 2023: 799-804.

[5] 3GPP. Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks: 3GPP TR 38.811 [S/OL]. [2024-01-24]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.

[6] 3GPP. Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN): 3GPP TR 38.821 [S/OL]. [2024-01-24]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.

[7] 3GPP. Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN): RP-193234 [S]. [2024-01-24]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.

[8] 3GPP. New WID on IoT NTN enhancements: RP-213596 [S]. [2024-01-24]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.

[9] ARANITI G, IERA A, PIZZI S, et al. Toward 6G non-terrestrial networks [J]. IEEE network, 2022, 36(1): 113-120.

[10] 田开波,杨振,张楠.空天地一体化网络技术展望[J].中兴通讯技术, 2021, 27(5): 1-6.

[11] SEDIN J, FELTRIN L, LIN X Q. Throughput and capacity evaluation of 5G new radio non-terrestrial networks with LEO satellites [C]//GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2020: 1-6.

[12] KIM M G, JO H S. Problem and solution for NB-IoT uplink in low earth orbit satellite communication [C]//2022 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC). Piscataway: IEEE, 2022: 1-3.

[13] 3GPP. New WID: Non-Terrestrial Networks (NTN) for Internet of Things (IoT) phase 3: RP-234077 [S/OL]. [2024-01-24]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.

[14] 3GPP. Candidate topics for a RAN2 led Rel-19 IoT-NTN-evolution work item: RP-232861 [S/OL]. [2024-01-24]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.

[15] 陆婷,方惠英,袁弋非,等.窄带物联网(NB-IoT)标准协议的演进:从R13到R16的5G物联网之路[M].北京:人民邮电出版社, 2020.

[16] 戴博,袁弋非,余媛芳.窄带物联网(NB-IoT)标准与关键技术[M].北京:人民邮电出版社, 2016.

[17] 刁兆坤,杨丽,王振章.6G空天地一体化网络架构及其构建[J].通信世界, 2024(4): 36-39.

[18] 3GPP. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); physical channels and modulation; 3GPP TS 36.211 [S/OL]. [2024-01-24]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.

### 作者简介:

李俊丽,毕业于北京邮电大学,硕士,主要从事物理层无线标准预研等工作;曹伟,毕业于新加坡国立大学,高级工程师,博士,主要研究方向为无线通信中的物理层技术;张楠,毕业于同济大学,中级工程师,硕士,主要研究方向为无线信道建模、NOMA、MI-MO、NTN通信网络、超材料及应用等;栗子阳,毕业于上海交通大学,中级工程师,硕士,主要从事无线通信物理层相关工作;崔方宇,毕业于浙江大学,博士,主要研究方向为非正交多址接入、物理层安全和非陆地通信等。