

免调度非正交多址接入技术及其系统性能

The Grant-Free NOMA Technology and Its System Level Performance

摘要: 主要探讨免调度非正交多址接入(NOMA)技术及其系统性能。NOMA 技术在实际应用中需要仔细研究并解决用户识别以及信道估计问题,尤其是在有碰撞的情况下。针对该问题,给出了相应的解决方案,以及系统级评估中的建模方法,并对基于预配置方式和随机选择方式的免调度多用户共享接入(MUSA)方案在实际系统中的性能表现进行了系统级仿真评估。仿真结果显示免调度 MUSA 方案具有明显的性能增益。

关键词: NOMA; 免调度; MUSA; 预配置; 随机选择; 碰撞

Abstract: Grant-free non-orthogonal multiple access (NOMA) technology and the system level performance are discussed in this paper. For grant-free NOMA technology, user identification and channel estimation should be carefully studied, especially for the case with collision. The corresponding solutions are provided in this paper, and modelling methods for system level evaluation are also given. The performances of grant-free multi-user shared access (MUSA) based on pre-configuration or random selection are evaluated by system level simulation. The evaluation results show that grant-free MUSA has obvious performance gain with practical assumptions.

Key words: NOMA; grant-free; MUSA; pre-configuration; random selection; collision

在5G新空口(NR)中,非正交多址接入(NOMA)技术受到了业界的广泛关注^[1-2]。根据目前NOMA技术的研究进展,上行NOMA技术通过多个用户终端(UE)共享使用相同的传输资源,并通过高级接收机实现多用户检测和译码。当上行NOMA技术应用于免调度传输场景时,可以提升系统容量,简化系统流程,节省信令开销,降低终端功耗和传输时延,从而可

以应用于多种业务部署场景,包括大规模机器通信(mMTC)、增强型移动宽带(eMBB)和高可靠低时延通信(uRLLC),以及车到车(V2V)等^[3-4]。

具体地,对于mMTC,主要业务需求是支持海量低成本、低功耗的终端进行偶发的小数据包传输;对于eMBB,同样关注偶发的小数据包传输场景,传统的接入流程和方案信令开销较大、效率较低;对于uRLLC和V2V,



李卫敏/LI Weimin^{1,2}
唐红/TANG Hong¹
李剑/LI Jian¹
胡宇洲/HU Yuzhou¹

(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 518057)
(1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;
2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.201901006
网络地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190129.1151.004.html>

收稿日期: 2018-12-26
网络出版日期: 2019-01-29

主要需求之一是低时延。免调度 NOMA 非常适合解决这些场景下的业务需求和问题,而且通过多用户复用可以明显提升系统容量和频谱效率。

关于 NOMA 在不同的无线资源控制(RRC)状态下的应用,首先,在 RRC 连接状态下,UE 通常是上行同步的,按照免调度传输机制,UE 可以自主地进行上行传输,不需要发起调度请求并等待调度,从而可以节省系统流程和信令开销,并降低时延和功耗。多个 UE 可以使用相同的资源进行传输,从而提升系统容量。这种状态下,我们可以采用预配置的方式,令多个 UE 使用相同的资源进行传输,并且令这些 UE 使用的参考信号以及扩展序列等不同,也就是避免这些 UE 的签名序列发生碰撞,以便进行用户识别与检测。但受限于此,系统资源利用率和 UE 传输效率会降低。另外,我们可以考虑的方式包括:通过预配置,令更多的 UE 使用相同的资源,允许 UE 的签名序列发生碰撞;当 UE 有业务到达时,可以随机选择传输资源和签名序列,进行竞争接入,接收机则通过更加复

杂或高级的盲检测算法实现用户识别与检测。

在 RRC 非激活状态下,UE 可能处于上行异步状态或可通过扩展循环前缀(ECP)来保证 UE 尽量上行同步。UE 可以采用免调度 one-shot 传输或采用 2 步随机接入(2-step RACH)机制传输^[5-6],从而缩减系统流程,降低时延和功耗。这种方法比较适用于小包、偶发等业务场景。当然,多个 UE 可能会在相同的资源上同时发起传输,结合 NOMA 技术的发射机和接收机设计,有利于支持更多的 UE 数量或业务负载。

目前,在第 3 代合作伙伴计划(3GPP)组织中由中兴通讯牵头的针对 5G NR 的 NOMA 技术研究项目(SI)已经结束,该项目得到了业界的广泛参与和研究,并已输出了技术报告^[2]。

1 免调度 NOMA 方案

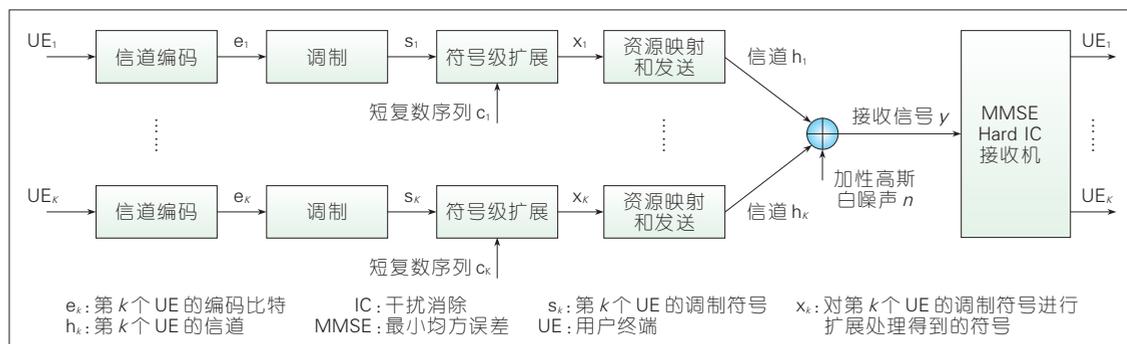
目前业界提出的各种 NOMA 方案中,1 个大类是多个 UE 分别使用长度较短的序列对其调制符号进行扩展,然后在相同的传输资源上发送,基站采用基于最小均方误差(MMSE)和

干扰消除(IC)的高级接收机实现多用户检测与译码。

图 1 为中兴通讯提出的一种 NOMA 方案即多用户共享接入(MUSA)方案。该方案在发射端采用长度较短的复数序列对调制符号进行扩展,序列长度为 2、4、6 等,序列元素来自于集合 $\{1, 1i, -1, -1i\}$,序列通常不包括 0 元素,也就是说序列是非稀疏的或可以称为 full length 序列。对于序列长度为 4,按照该序列设计准则,可以得到 16 条互相关绝对值不大于 0.5 的序列、32 条互相关绝对值不大于 $\sqrt{2}/2$ 的序列或 64 条互相关绝对值小于 0.8 的序列^[7]。低互相关序列的数量相对较多,有利于更好地保证免调度 NOMA 传输的性能。另外,序列元素仅实部或虚部有值,而且实部或虚部的取值为 1 或 -1,使得一些涉及序列的运算复杂度很低,仅需要执行加法运算即可。采用非稀疏或 full length 序列扩展,还有利于保持基于离散傅里叶变换扩展的正交频分复用(DFT-S-OFDM)波形的低峰均比(PAPR)属性。

该方案在接收端采用 MMSE Hard IC 接收机,其中

图 1 多用户共享接入方案的发射机和接收机示意图



“Hard IC”的意思是：当1个UE的数据被成功译码后，根据译码器输出的硬比特，重构该UE发送的符号，用于干扰消除。干扰消除过程可以按照串行干扰消除(SIC)、并行干扰消除(PIC)或并串混合干扰消除(HIC)的方式执行。MMSE Hard IC接收机的实现复杂度和计算复杂度相对较低，而且可复用现有系统中常用的MMSE-IRC(IRC)接收机，复杂度增加不多。为了改善性能，也可考虑采用MMSE Soft IC接收机或期望传递算法(EPA)接收机，不过这些接收机的复杂度相对较高^{[2]、[8]}。

将NOMA应用于免调度传输场景，需要考虑的主要问题是用户识别以及信道估计。对于预配置方式，多个UE使用的解调参考信号(DMRS)不同，基站可以通过DMRS进行用户识别及信道估计，漏检率和虚警率比较低，可根据DMRS和扩展序列之间的对应关系获取UE使用的扩展序列，用于多用户检测和译码。对于存在DMRS碰撞的情况，由于2个甚至多个UE可能使用相同的DMRS，基站通过该DMRS仅能识别到1个UE，而且信道估计结果是这些碰撞UE的信道之和；因此，DMRS碰撞将对系统性能产生严重影响。针对该问题，可以考虑通过增加DMRS数量来降低碰撞概率。进一步地，还可以针对DMRS进行干扰消除来改善性能，即当发生DMRS碰撞的多个UE中有1

个UE被成功译码后，重构该UE的DMRS接收信号用于干扰消除。由于原来基于DMRS的信道估计结果并不准确，这里可以利用已经被正确译码的各个UE的译码结果重构其发送符号，然后通过最小二乘(LS)算法重新进行联合信道估计得到更新的信道估计结果，用于DMRS干扰消除。由于同样的原因，数据部分的干扰消除也需要使用LS信道估计更新的信道估计结果^[9]。

2 系统性能评估

本节我们将考虑实际网络部署中的一些因素，包括多小区网络与业务、覆盖情况、小区间干扰、实际信道估计、MMSE检测协方差矩阵估计、DMRS碰撞等，对免调度NOMA方案在实际系统中的性能表现进行系统级仿真评估分析。首先将简要描述系统级仿真(SLS)的链路到系统(L2S)映射方法，以及实际信道估计、DMRS碰撞、MMSE检测协方差矩阵估计的建模方法，然后给出系统级仿真假设与仿真结果。

2.1 仿真方法

L2S映射也可以称为物理层抽象，用来建模接收机处理过程，包括信道估计、MMSE检测、译码等。对于免调度NOMA，还需要建模用户识别、干扰消除等过程。

图2是免调度NOMA方案采用的MMSE Hard IC接收机的

L2S映射方法的流程图。如图2所示，该方法包括以下几个主要步骤：

(1)用户识别与信道估计。

对于预配置方式，由于漏检率和虚警率比较低，可以简化假设为理想用户识别。对于实际信道估计，可以通过在理想信道基础上添加信道估计误差来建模，如公式(1)所示：

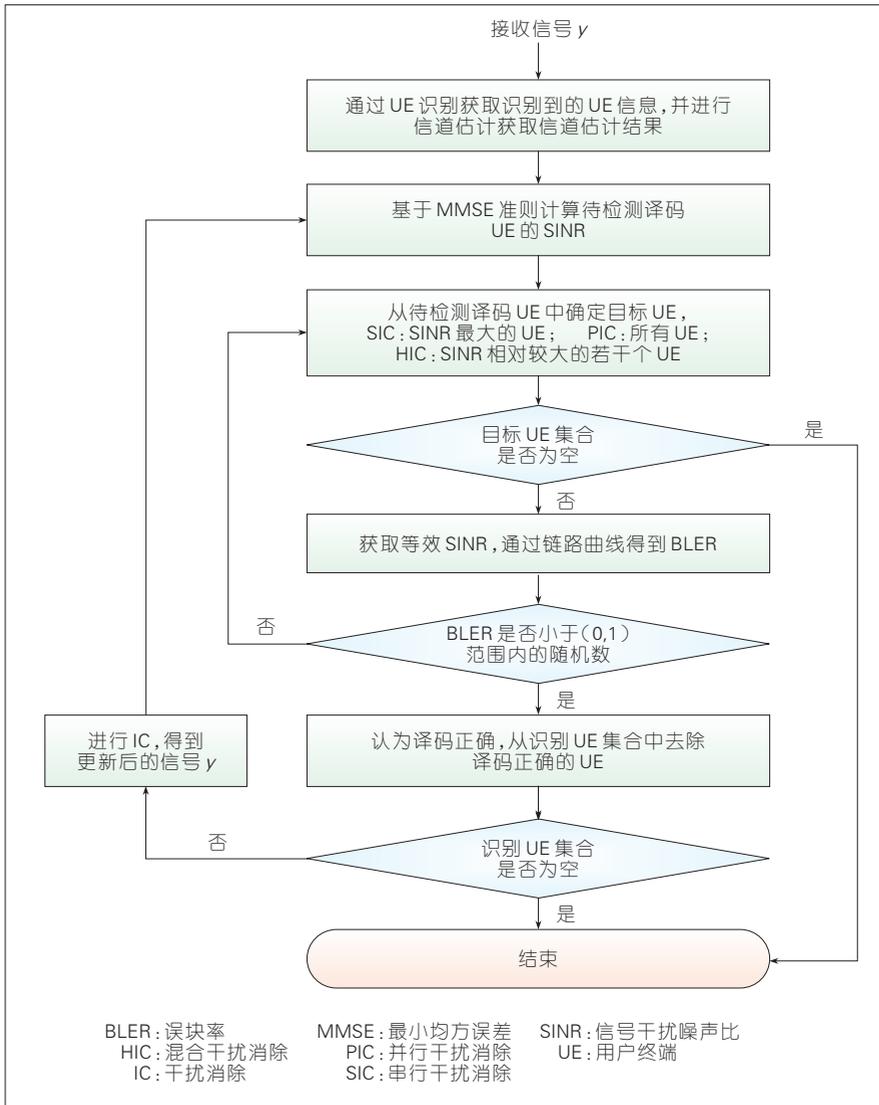
$$H_r = H_l + H_e, \quad (1)$$

其中， H_r 表示实际信道， H_l 表示理想信道， H_e 表示信道估计误差。在实际网络中， H_e 包括其他小区在DMRS上产生的干扰影响和噪声影响，与DMRS设计、信道估计方法、信道估计结果滤波平滑方法有关。可以假设其他小区在DMRS上产生的干扰统计上服从高斯分布，那么，我们则可以将 H_e 建模为均值为0、方差为 σ_e^2 的高斯分布随机变量。

对于存在DMRS碰撞的情况，需要考虑DMRS碰撞在用户识别、信道估计等方面的影响。由于2个甚至多个UE可能使用相同的DMRS，基站通过该DMRS仅能识别到1个UE，而且信道估计结果是这些碰撞UE的信道之和，例如，假设UE1和UE2使用了相同的DMRS，则信道估计结果可以按照公式(2)建模：

$$H_r = H_{r1} + H_{r2} + H_e, \quad (2)$$

其中， H_{r1} 和 H_{r2} 分别表示UE1



▲图2 免调度非正交多址接入方案采用的MMSE Hard IC接收机的链路到系统映射方法的流程图

和UE2的理想信道,信道估计误差 H_e 可以按照与上述描述类似的方法建模。

(2)基于MMSE准则计算待检测译码的UE的SINR。

在多小区网络中,接收信号 y 可以按照公式(3)描述:

$$y = \sum_{k=1}^K H_k s_k + \sum_{j=1}^J H_j s_j + n, \quad (3)$$

其中, K 为当前小区中进行

NOMA传输的UE数量, s_k 为当前小区中第 k 个UE发送的调制符号, H_k 为当前小区中第 k 个UE的包括空域和码域的联合信道系数。那么, H_k 可以表示为 $NL \times 1$ 的矢量,其中 N 为接收天线数量, L 为扩展序列长度; J 表示其他小区中在相同资源上进行传输的小区间干扰UE的数量, s_j 为第 j 个小区干扰UE发送的调制符号, H_j 为第 j 个小区

间干扰UE的包括空域和码域的联合信道系数, H_j 也可以表示为 $NL \times 1$ 的矢量, n 为均值为0、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声(AWGN)。

那么,MMSE检测权重可以按照公式(4)计算:

$$W_k = H_k^H * R_{yy}^{-1} = H_k^H * \left(\sum_{i=1}^k H_i H_i^H + \sum_{j=1}^J H_j H_j^H + \sigma^2 I \right)^{-1}, \quad (4)$$

其中,假设当前小区中第 k 个UE为待检测的目标UE, $()^H$ 表示共轭转置, R_{yy} 为接收信号 y 的自相关矩阵, I 为 $NL \times NL$ 的单位矩阵。

进一步,第 k 个UE的MMSE检测结果可以表示为 $\hat{s}_k = W_k \times y$,那么其SINR可以按照公式(5)计算:

$$SINR_k = \frac{|W_k H_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^k |W_k H_i|^2 + \sum_{j=1}^J |W_k H_j|^2 + W_k(\sigma^2 I)W_k^H} \quad (5)$$

需要注意的是,在理想情况下,计算MMSE权重和SINR时,可以使用理想信道;但在实际场景下,需要进行实际信道估计和 R_{yy} 估计。那么,在计算MMSE权重时, H_k 需要使用当前小区中第 k 个UE的实际信道估计结果, R_{yy} 估计可以根据接收信号 y 来估计。具体地,可将接收信号 y 转换为 $NL \times T$ 的矩阵 Y ,其中 T 为UE发送的调制符号的数量,则有 $R_{yy} = YY^H / T$;而对于MMSE检测结果的SINR,由于根据 $\hat{s}_k = W_k * y$ 计算,各个UE的理想信道自然的包含在接收信号 y 中,仍然可以使用各个UE的

理想信道。

(3) 获取等效 SINR, 通过链路曲线得到 BLER。

按照基于接收比特互信息率 (RBIR) 方法^[10]将当前小区中第 k 个 UE 的 SINR 映射为等效 SINR, 如公式 (6) 所示:

$$SINR_k^{eff} = \varphi^{-1}\left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \varphi(SINR_{k,m})\right), \quad (6)$$

其中, M 为资源单元数量, 每个资源单元上有 1 个 SINR 计算结果, $\varphi(\cdot)$ 为用于进行 RBIR 映射的非线性可逆函数。然后, 根据等效 SINR 查找 AWGN 信道场景下的 BLER vs. SNR 链路曲线得到 BLER, 作为本次传输的 BLER。进一步地, 将该 BLER 与 (0, 1) 范围内的 1 个随机数进行比较, 如果小于则认为本次传输可以译码正确, 否则认为本次传输译码失败。

图 2 中当 1 个或 1 组 UE 没有被正确译码时, 我们则可以尝试对剩余 UE 继续进行译码, 这样做可以改善性能, 尤其是对于 SIC 而言^[9]。

(4) 进行 IC, 得到更新后的信号 y 。

当 1 个 UE 被正确译码后, 可以针对该 UE 进行干扰消除。首先重构该 UE 的发送符号, 然后根据其信道, 得到该 UE 的接收信号, 并将其减去, 实现干扰消除。

需要注意的是, 在实际场景下需要使用实际信道估计结果进行干扰消除, 对于预配置方式, 如前文所述, 可以根据信道

估计误差 H_e 来建模干扰消除残留误差。对于存在 DMRS 碰撞的情况, 如前文所述, 由于碰撞的影响, 原来基于 DMRS 的信道估计结果可能并不准确; 因此, 可以考虑利用已经被正确译码的各个 UE 的重构发送符号进行 LS 联合信道估计得到各个 UE 的更新的信道估计结果, 并用于干扰消除。随着被正确译码的 UE 数量越来越多, LS 联合信道估计结果会越来越准确。这里假设 UE1 被正确译码, 经过分析, 其 LS 信道估计的归一化误差可以按照公式 (7)^{[9]、[11]} 近似建模, 其他情况可以以此类推:

$$\frac{|h_e|^2}{|h_1|^2} \approx \frac{\sum SNR_{im} + 1}{(x_1^H x_1) SNR_1}, \quad (7)$$

其中, h_1 为 UE1 在 1 个天线上频域信道系数, h_e 为 UE1 的 LS 信道估计误差, x_1 为 UE1 发送的

数据符号, SNR_1 为 UE1 的理想 SNR, SNR_{im} 则可以包括其他尚未被正确译码的干扰 UE 的理想 SNR。

对于存在 DMRS 碰撞的情况, 由于 DMRS 碰撞, UE 识别会出现漏检; 因此当 1 个 UE 被正确译码并且针对该 UE 进行干扰消除后, 可以重新执行如图 2 所示的过程, 即重新进行用户识别等步骤。这样有利于发现之前被漏检的用户, 从而改善性能。

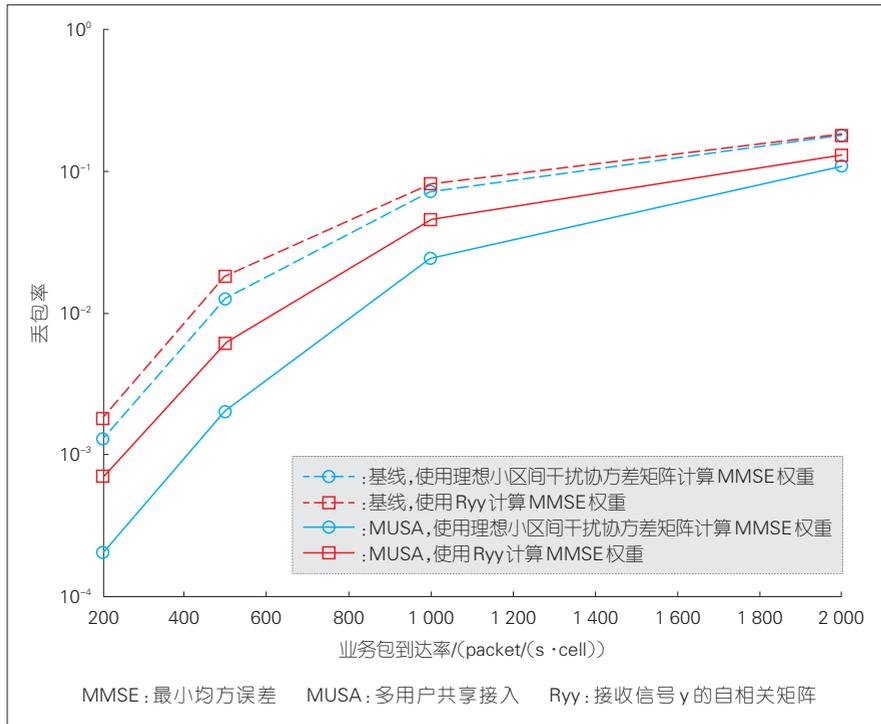
2.2 仿真结果

下面我们将在 mMTC 场景下对免调度 NOMA 方案在实际系统中的性能表现进行系统级仿真评估。仿真假设参考文献 [2], 另外一些仿真假设如表 1 所示。仿真评估了 2 种方案, 包括预配置免调度 MUSA 方案和随机选择免调度 MUSA 方案。

▼表 1 系统级仿真假设

仿真参数	仿真假设
载频与站间距	700 MHz, 1 732 m
仿真带宽	6 个物理资源块
业务包大小	20~200 bytes, 帕累托分布, 成形参数 $\alpha = 2.5$, 协议开销 29 bytes
传输块大小	将业务包进行分包, 每个传输块 25 bytes, 其中包含 5 bytes 分包开销
扩展序列	长度为 4 的复数扩展序列 ^[7]
HARQ/重复	对于预配置方案, HARQ 传输次数最多为 8; 对于随机选择方案, 则将 UE 分为 3 组, 每组 UE 采用不同的重复次数
丢包判断准则	如果 1 个传输块在 HARQ/重复传输后没有被正确接收, 则认为丢包
每个小区的 UE 数量	100 个
UE 功率控制	开环功率控制: 对于预配置方案, $P_0 = -100$ dBm, $\alpha = 1$; 对于随机选择方案, $P_0 = -95$ dBm, $\alpha = 1$
基站天线数量	2 Rx
基站天线下倾角	92
信道估计	实际信道估计
基站接收机	MMSE-PIC 接收机

HARQ: 混合自动重传请求 MMSE: 最小均方误差 PIC: 并行干扰消除 UE: 用户终端

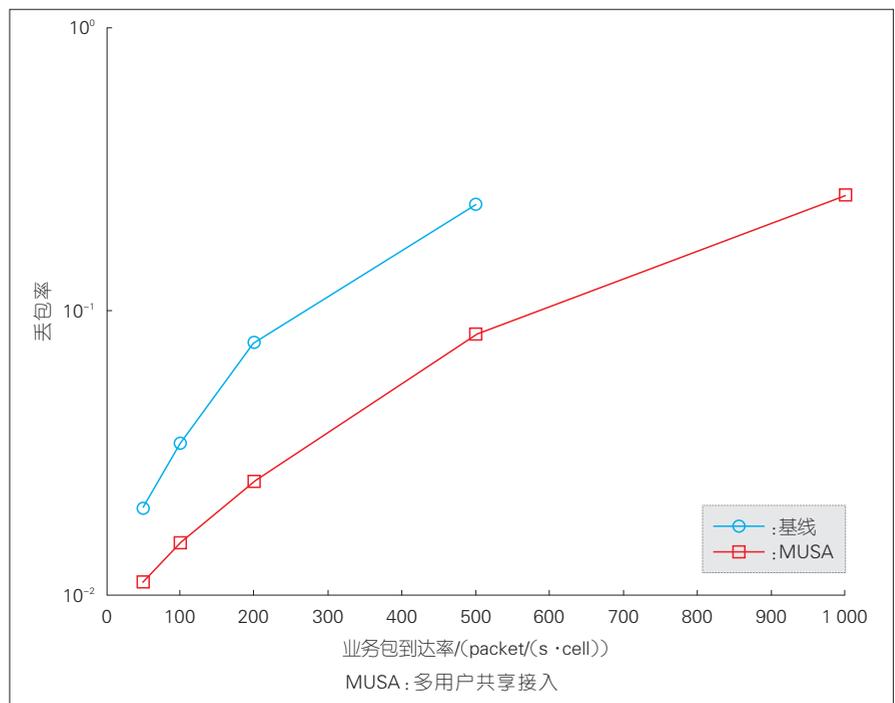


▲图3 预配置免调度MUSA方案的仿真结果

图3给出了预配置免调度MUSA方案的仿真结果。按照mMTC场景的仿真假设,UE和基站间的最大耦合损耗达到了144 dB,可以将UE的发射功率集中在1个物理资源块(PRB)上传输,以便改善覆盖的性能;因此,在该方案下,每个UE使用1 PRB + 6 ms的资源单元。另外,在该仿真中,基线方案没有进行扩展,MUSA方案采用长度为4的复数扩展序列进行扩展。从仿真结果可以看到,当MMSE权重计算采用理想的小区干扰协方差矩阵时,MUSA相对于基线在丢包率=1%处大约有70%的性能增益;当MMSE权重计算采用Ryy估计时,MUSA相对于基线在丢包率=1%处有接近50%的性能增益。需

要说明的是,小区内UE均采用如前文所述的实际信道估计。

图4给出了随机选择免调



▲图4 随机选择免调度MUSA方案的仿真结果

度MUSA方案的仿真结果。该仿真中,基线方案使用24个DMRS,没有进行扩展,使用的基本资源单元为1 PRB + 1 ms,3组UE的重复次数分别为1、4和16;MUSA方案使用64个DMRS,采用长度为4的复数扩展序列进行扩展,复数扩展序列的总数量同样为64个,DMRS和扩展序列一一对应,使用的基本资源单元为1 PRB + 4 ms,3组UE的重复次数分别为1、1和4,并且将第1组UE的扩展序列的总能量归一化为1,以便公平对比。从仿真结果看,MUSA采用64个DMRS及长度为4的复数扩展序列,碰撞概率更低,性能更好,而且有大约100%的性能增益。

3 结束语

免调度NOMA可以提升系

统容量,简化系统流程,节省信令开销,降低终端功耗和传输时延,从而可以应用于多种业务部署场景,包括 mMTC、eMBB、uRLLC 以及 V2V 等,可以应用于 RRC 连接状态以及 RRC 非激活状态。

本文中,我们对免调度 NOMA 方案进行了简要介绍,对免调度 NOMA 在实际应用中需要考虑和解决的用户识别与信道估计等一系列相关问题进行了讨论,给出了对免调度 NOMA 进行系统级评估的接收机建模方法,并对基于预配置方式和随机选择方式的免调度 MUSA 方案在实际系统中的性能表现进行了系统级仿真评估,仿真结果显示免调度 MUSA 方案具有更为明显的性能增益。

致谢

本研究得到中兴通讯股份有限公司袁志锋高级工程师、袁

弋非博士、田力博士的帮助,谨致谢意!

参考文献

- [1] Study on New Radio Access Technology: Physical Layer Aspects:TR 38.802 V14.2.0 [S]. 3GPP, 2016
- [2] Study on Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for NR: TR 38.812 V1.0.0 [S]. 3GPP, 2018
- [3] YUAN Z, YU G, LI W, et al. Multi-User Shared Access for Internet of Things [C] // 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). USA: IEEE, 2016 (1): 1-5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2016.7504361
- [4] TIAN L, YAN C, LI W, et al. On Uplink Non-Orthogonal Multiple Access for 5G: Opportunities and Challenges [J]. China Communications, 2017, 14(12): 142-152. DOI: 10.1109/CC.2017.8246331
- [5] ZTE. Procedures Related to NOMA: R1-1812174 RAN1#95 [S]. 3GPP, 2018
- [6] Qualcomm Incorporated. Procedures Related to NOMA: R1-1813407 RAN1#95 [S]. 3GPP, 2018
- [7] ZTE. Link-Level Simulation Results for mMTC Scenario: R1-1808155 RAN1#94[S]. 3GPP, 2018
- [8] ZTE. Complexity Analysis of NOMA Receivers: R1-1812173 RAN1#95 [S]. 3GPP, 2018
- [9] ZTE. Multi-User Receivers for NOMA: R1-1805841 RAN1#93 [S]. 3GPP, 2018
- [10] IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD): IEEE 802.16m-08/004r5 [S]. IEEE, 2009
- [11] ZTE. Physical Layer Abstraction for NOMA SLS: RAN1#94bis, R1-1810208 [S]. 3GPP, 2018

作者简介



李卫敏,中兴通讯股份有限公司无线研究院算法部技术预研高级工程师;主要负责 5G 物理层技术的研究工作,研究方向包括功率控制、干扰控制、非正交多址接入、海量机器通信等;发表论文 10 余篇。



唐红,中兴通讯股份有限公司无线研究院算法部技术预研高级工程师;主要负责 5G 物理层技术的链路级仿真和系统级仿真等工作。



李剑,中兴通讯股份有限公司无线研究院算法部技术预研高级工程师;主要从事系统级仿真工作,目前研究方向包括超密集网络、非正交多址接入、高可靠低时延通信等;申请专利 20 余篇。



胡宇洲,中兴通讯股份有限公司无线研究院算法部技术预研高级工程师;主要负责 5G 物理层新空口标准、非正交多址接入技术方面的工作。