

6G 新型多址技术探讨



Next Generation Multiple Access for 6G

严春林/YAN Chunlin¹, 袁弋非/YUAN Yifei²,
王森/WANG Sen², 吕思颖/LYU Siying²

(1. 中关村泛联移动通信技术创新应用研究院, 中国 北京 100080;
2. 中国移动通信有限公司研究院, 中国 北京 100053)

(1. ZGC Institute of Ubiquitous-X Innovation and Applications, Beijing
100080, China;
2. China Mobile Communication Research Institute, Beijing 100053, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202401003

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20240223.1925.004.html>

网络出版日期: 2024-02-26

收稿日期: 2024-01-10

摘要: 6G大规模通信场景迫切需要使用新型多址技术解决海量终端随机接入问题, 其他多种场景也需要6G新型多址来提高传输速率, 降低接入时延, 增强传输可靠性。回顾了5G非正交多址的标准化历程, 总结了各种非正交多址技术的特点, 以及在标准化过程中的经验, 研究并评估了稀疏交织多址和基于Reed-Muller码的无源多址两种新型多址性能。本研究可为未来6G新型多址的选型和标准化提供有益参考。

关键词: 非正交多址接入; 6G新型多址接入; 压缩感知; 稀疏交织多址接入

Abstract: The 6G massive machine type communication urgently requires new multiple access technology to support random access of massive machine type terminals, and other scenarios in 6G systems also need new multiple access to increase the data rate, reduce transmission delay and enhance transmission reliability. The standardization process of 5G non-orthogonal multiple access and the properties of various non-orthogonal multiple access techniques are reviewed. The experience in the standardization process is then introduced. The performance of two new types of multiple access is studied, including sparse interleave division multiple access and unsourced multiple access based on Reed-Muller code. This study can provide useful references for the scheme selection and the standardization of the 6G multiple access technology in the future.

Keywords: non-orthogonal multiple access; 6G new multiple access; compressed sensing; sparse interleaver multiple access

引用格式: 严春林, 袁弋非, 王森, 等. 6G新型多址技术探讨[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(1): 3-11. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401003

Citation: YAN C L, YUAN Y F, WANG S, et al. Next generation multiple access for 6G [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(1): 3-11. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401003

非正交多址接入(NOMA)是无线空口重要基础技术之一, 它一改前几代移动通信系统以正交方式为主的多址方式, 使得同一小区的多个用户可以在相同的时频域和空域资源上叠加传输, 有望大幅提升系统容量, 解决碰撞冲突问题, 因此一直受到学术界和工业界的广泛关注^[1-3]。5G时代第3代合作伙伴计划(3GPP)启动了NOMA的研究项目, 深入研究了NOMA在增强移动宽带(eMBB)、大规模机器通信(mMTC)、超高可靠超低时延通信(URLLC)三大场景的潜在能力^[1-2]。

2023年6月, 国际电信联盟(ITU)完成了国际移动通信(IMT)面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书, 提出6G的六大使用场景, 对5G中的eMBB、mMTC、URLLC场景进行演进^[4]。为满足这些场景的需求, 需要研究新一代的多址技术。

在ITU的目标建议书发布之前, 中国学术界和工业界对

6G应用场景进行了分析和预测^[5-7], 其中包括海量连接场景、密集紧要连接场景、空天地一体化场景和大容量场景, 如图1所示。海量连接场景主要针对物联网, 这是因为物联网终端数量巨大, 每平方公里就有千万个终端需要连接。密集紧要连接场景主要针对工业互联网, 它对通信时延和可靠性有很高的要求。空天地一体化场景需要考虑卫星和地面终端接入, 服务终端数量大, 信号往返时延大, 卫星移动速度快。大容量场景主要是针对增强现实(AR)、虚拟现实(VR)、扩展现实(XR)等极高速数据传输场景。为进一步提高连接密度, 降低接入时延, 提高传输可靠性, 为移动用户提供空天服务, 我们需要研究新型多址技术。

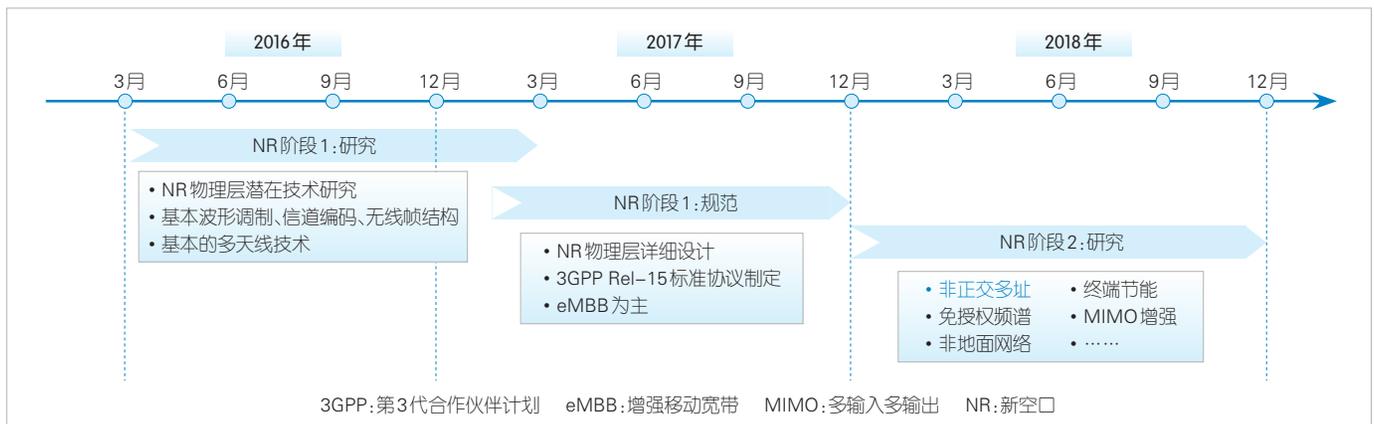
表1给出了海量连接场景、密集紧要连接场景、空天地一体化场景和大容量场景在5G时代的能力, 以及6G时代使用新型多址需要解决的问题。在以上多种场景中, 海量连接场景最具挑战性且需求紧迫。新型多址在海量连接下的研究



▲图1 新型多址接入的四大应用场景^[5]

▼表1 新型多址接入技术需求指标^[5]

应用场景	5G的能力	设计目标示例	面临的挑战
海量连接	一个宏基站支持每10 ms内完成300个终端的多址接入和小数据包传输	一个宏基站支持每10 ms内完成3 000个终端的多址接入和小数据包传输	需要支持超多用户随机接入、低碰撞概率导频设计、用户激活检测和信道估计,需要海量用户数据传输和检测方法
密集紧要连接	目前商用5G最大可支持400个左右的无线资源控制(RRC)连接;5G的通信时延是1 ms;不能同时满足5G三大场景需求	在单个基站覆盖范围内,同时满足下述指标:同时服务2 000个以上的设备、平均数据流量达到20 Gbit/s以上、通信时延小于0.1 ms、丢包率小于10 ⁻⁵ 等	对发射信号进行比特交织和比特重复(或扩频)处理,需要新的混合自动重传设计、信号功率激增设计等
空天地一体化	单载扇可以支持400个左右的RRC连接;控制面时延可能将占到总时域资源的20%以上,明显降低了系统的效率	每波束需要同时服务5万个窄带物联网设备,明显降低控制面的总时延,把控制面和数据面的空口交互次数降至2~4次,把信令交互的资源开销降至60%~80%	需要低时延随机接入方案,存在多用户干扰时大多普勒频率偏移估计和补偿等问题
大容量	要达到1 Tbit/s的峰值数据速率和5 Gbit/s的用户体验数据速率是非常困难的	达到1 Tbit/s的峰值数据速率、5 Gbit/s的用户体验数据速率	需要非正交多址传输方案、高速率信道编码调制器,以支持多用户快速收敛迭代检测



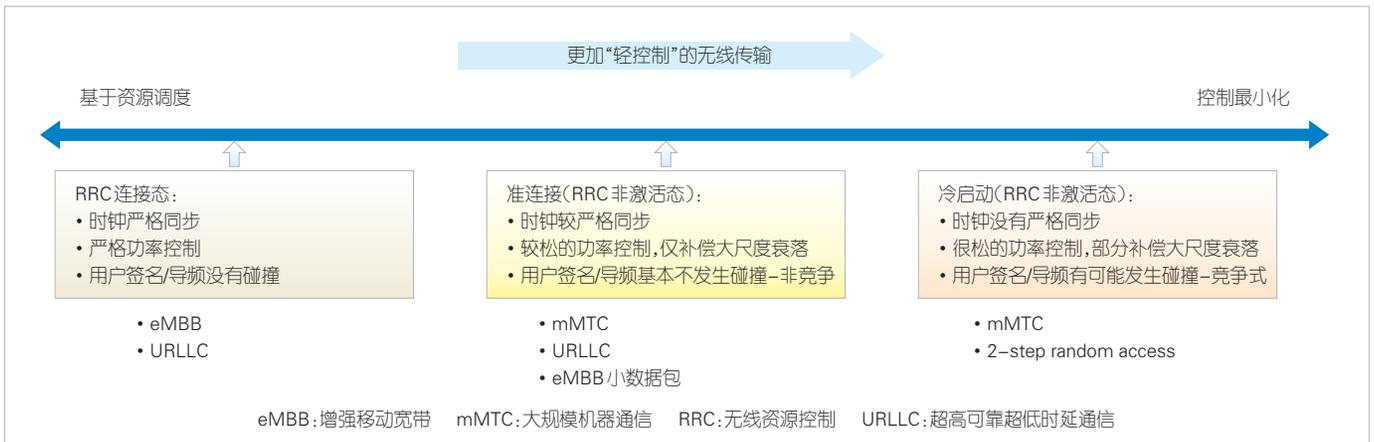
▲图2 3GPP NR研究历程

成果也可以应用到其他场景,因此,海量连接下新型多址将是本文关注的重点。

1 5G非正交多址研究

5G系统支持三大主要应用场景,即eMBB、mMTC和URLLC。NOMA可以实现较高的频谱效率、较多的用户接入数量、较低时延以及高可靠传输。在5G时代中国提出了多用户共享接入(MUSA)、图样分割多址接入(PDMA)、稀疏码分多址接入(SCMA)和交织多址接入(IDMA)等技术方案^[8-11]。其中,MUSA使用复数扩频序列来区分用户,PDMA使用不同的pattern来区分用户,SCMA采用不同的星座图映射及资源映射来区分用户,IDMA使用交织器来区分用户。3GPP在5G时代对NOMA进行了研究,研究历程如图2所示。

无限资源控制(RRC)连接态是NOMA研究中的一个重要特性。不同类别的RRC连接态如图3所示。RRC连接态有严格同步和功率控制两种,同时用户签名和导频是由系统调度的,可以避免碰撞。某些eMBB和URLLC场景属于这种分



▲图3 三大场景与RRC状态关系

类。当用户处于RRC非激活态（准连接）时，时钟严格同步，功率控制较松，用户签名和导频基本不碰撞。mMTC、URLLC和eMBB小包传输属于这种类型。在RRC空闲态（冷启动），时钟没有严格同步，只有开环功率控制，此时用户签名或导频会发生碰撞。mMTC和2-step random access属于这种类型。NOMA研究的主要场景是RRC非激活态和RRC空闲态下的mMTC、URLLC和eMBB小数据包业务。在NOMA研究过程中，为避免与NB-IoT的部署场景重叠，单用户的频谱效率不能低于0.1 bit/Hz。这种限制给NOMA研究带来了不利影响，限制了mMTC用户同时接入数。

5G新空口（NR）物理层的基本处理模块，包括波形调制、信道编码等已在NR阶段1完成。这使得NR非正交多址的设计空间大大受限。NOMA的波形调制采用的是正交频分复用（OFDM）或离散傅里叶变换扩频正交频分复用（DFT-S-OFDM），信道编码是低密度奇偶校验码（LDPC）。mMTC、URLLC和eMBB这三大场景在小包传输时采用的码长较小，如50~200 bit。LDPC的优势主要体现在码长较大的情形，如大于1000 bit，而小码长时采用LDPC会有较大的性能损失。

NOMA传输方案包括以下几种典型方案。符号线性扩展类的传输方案用线性扩展序列区分用户。该方案直接在调制符号上扩展，具有较高的可扩展性和灵活性。扰码/交织不用于区分用户。沿用经典调制方式的有正交相移键控（QPSK）等，eMBB场景的信道编码方式有5G NR LDPC码等。典型接

收机为最小均方误差-连续干扰消除（MMSE-SIC）。该接收机较依赖最小均方误差（MMSE）解调器来抑制用户间的干扰。此外，接收机也可以使用基于MMSE的迭代接收机^[12]。该传输方案支持采用面向竞争式免调度的设计^[13]。

扰码/交织类的传输方案扰码/交织用于区分用户，具有较高的可扩展性和灵活性。该方案沿用经典调制方式和eMBB的信道编码方式。典型接收机为：匹配滤波器/最小均方误差（MMSE）的基本信号估计（ESE）+软比特输出的译码，较为依赖迭代译码解调。扰码/交织类传输方案的缺陷是缺乏面向竞争式免调度的设计。

调制与扩展联合优化类的传输方案符号调制与符号扩展联合设计，直接从编码比特映射到扩展的调制符号。该方案沿用传统信道编码方式和5G NR LDPC码。典型接收机为期望传播算法（EPA）+软比特输出的译码，较为依赖迭代译码解调，其缺陷是缺乏竞争式免调度的设计。

5G NOMA多址方案的分类如表2所示。

5G NOMA研究最终没有形成标准化，原因在于：

- 没有明确的场景需求，尽管有每平方公里百万连接数的指标，但同时接入的用户数不是很多，并未真正体现海量接入的挑战性。
- 缺乏基础理论的突破，尤其在短数据包下的竞争式免调度传输。
- 所研究的免调度传输主要是非竞争式的，研究相对透彻，但相关设计不适合竞争式免调度。

▼表2 非正交多址方案及其特点

方案类别	多址签名数量	竞争式免调度机理	邻区干扰抑制能力
线性扩展类	32~196	无导频的盲检测	有一定的抑制能力
扰码/交织类	没有限制	缺乏相关设计	困难
调制扩展联合设计类	12~24	缺乏相关设计	困难

- 对比方案是低码率方案LCRS且接收天线较多时，在并发用户数不高的情况下NOMA方案相比LCRS方案增益有限。

- 对系统级仿真中的邻区干扰认识不足，很多方案存在性能瓶颈。

随着无线通信需求的发展，6G时代对新型多址的研究热潮再次掀起。与5G时代每平方公里百万连接不同，6G时代连接密度是5G的10~100倍^[5-7]。使用传统的正交多址难以实现如此高的连接密度，5G时代研究的NOMA也难以满足要求，因此6G时代需要研究新的多址技术。最近通信理论的突破也为6G多址提供了很好的理论基础。5G时代复用的用户数一般不超过15，当前所研究的6G新型多址支持的用户数可达300，远大于5G时代的指标。同时6G研究考虑了竞争式免调度，其导频设计及信号检测都与5G时代有很大的不同。因此，5G NOMA未能完成的使命将在6G时代重新启动。

2 6G潜在新型多址技术

6G多址与当前学术界的一些最新研究成果密不可分，因此，这里我们将介绍当前的最新理论成果。

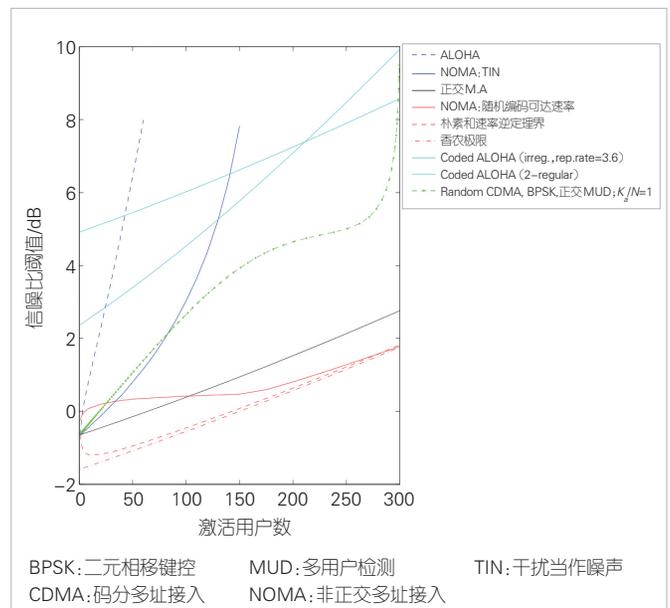
2.1 多址理论的最新成果

假设一个高斯多址接入信道有 K_a 个用户处于激活状态，即正在进行上行传输。这些用户到基站的信道增益（路径损耗和小尺度信道衰落）均为1，噪声为高斯白噪声。与传统的多用户信息论不同，这里所有用户均采用同一个编码码本。同时差错事件是对每个用户定义的，而不是全体用户的联合差错事件。另外，有限码长的因素也需考虑。这些定义比较适合免调度情形下的海量小包业务传输。

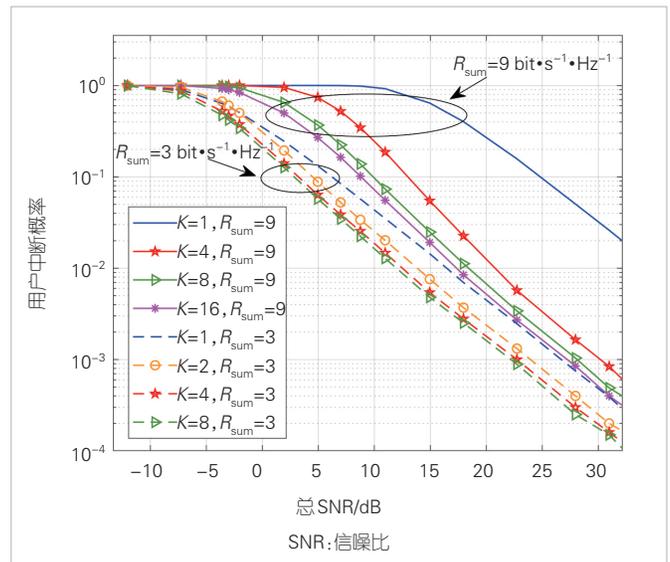
图4比较了不同传输方案的理论信噪比阈值，以及与激活用户数的关系^[14]。在经典ALOHA类型方案中，由于存在碰撞，信噪比阈值随激活用户数的增加而急剧增加。非正交单用户方案接收机需事先知道激活用户使用的签名，不是严格意义上的无物理层标识的传输。将其他用户信号的干扰当作噪声（TIN）的非正交单用户方案在用户数小于120时的性能优于经典ALOHA。匹配滤波之后再行干扰消除（多用户检测）的非正交单用户方案，在用户数较大时的性能也优于经典ALOHA方案，但信噪比阈值较大。正交单用户传输性能虽然较好，但这需要事先划分好资源，不适合随机接入和数据传输的场景。非正交随机多用户编码是严格意义上的无物理层标识的传输。当激活用户数 K_a 低于100时，非正交随机多用户编码稍微逊于正交单用户传输；但当用户数超

过100之后，非正交随机多用户编码的性能优于正交单用户传输，并且这个差距会随着用户数的增加进一步扩大。

图5是Rayleigh衰落多址信道在总的频谱效率一定的情形下，不同复用用户数下的平均中断概率^[15]。其中 K 是用户数， $K=1$ 的情况相当于正交传输，只不过系统把所有的资源都分给了一个用户。随着用户数的增多，每个用户的频谱效率下降，用户间的干扰也愈明显，但是总的信噪比要求在逐步降低。从平均中断概率的分析结果可以看出，相比于 $K=1$ 的单用户情形，无物理层标识的非正交传输通过降低每个用户频谱效率提高了多用户迭代检测的性能，从而提高了多用



▲图4 高斯多址接入信道不同传输方案的理论信噪比阈值与激活用户数的关系^[14]



▲图5 Rayleigh衰落多址信道的用户平均中断概率^[15]

户系统的频谱效率。多用户的增益随着系统负载（即用户数或者总频谱效率）的增大而变得更加显著。

压缩感知（CS）是学术界近年提出的信号处理方法，可有效检测稀疏信号的数值^[16-20]。如果信号是稀疏的，可由远低于采样定理要求的采样点重建恢复。压缩感知的核心是信号在某个变换域是稀疏的，可以用一个与变换基不相关的观测矩阵将变换所得信号投影到另外一个信号空间上，通过不断的迭代检测来完成对原始信号的精确估计。压缩感知理论为新型多址导频设计、检测提供了理论基础，可用于多用户激活检测及信道估计。

2017年，Y. POLYANSKIY给出了无源多址接入（UMA）传输方案，支持300个用户的随机接入，与5G时代的十几个并发用户相比，大大提高了接入用户数^[21]。同时，此方案包含了导频设计、用户激活检测、信道估计，以及多用户数据检测。此方案引入了业界最新的压缩感知技术，用于用户激活检测和信道估计。通过使用大的压缩感知矩阵，支持的码本可高达 2^{15} 。在 2^{15} 码本随机选取300用户时，用户碰撞概率很低。此方案一经提出，就引发了极大关注。后来又有学者提出稀疏IDMA传输方案，以实现300用户的随机接入^[22]。稀疏IDMA方案利用压缩感知矩阵进行导频设计。将 $2^{15} \times 2^{15}$ 的FFT矩阵行随机交织并截短成 2000×2^{15} 矩阵，可以实现300用户的激活检测和信道估计。通过在数据传输部分使用IDMA进行用户区分，同时在数据里加入大量零来有效降低用户间的干扰，稀疏IDMA可以较好地实现大规模用户接入和数据传输。下面我们介绍两种潜在6G新型多址方案并给出初步性能评估。

2.2 6G新型多址方案

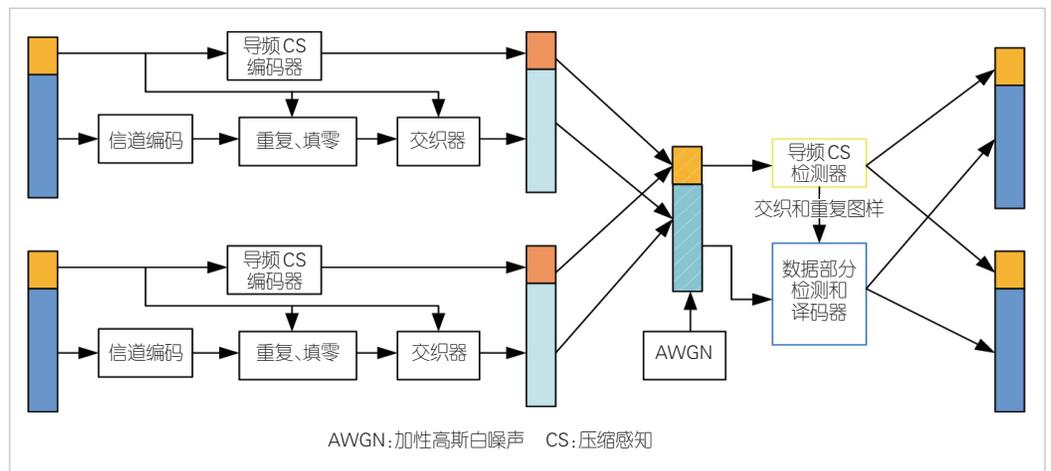
2.2.1 单时隙传输方案

稀疏IDMA+压缩感知是海量用户无源随机接入的重要技术方案^[22]。稀疏IDMA方案的核心设计思想是结合两项技术。第一项技术是基于压缩感知的导频编码。为了支持无物理层标识传输，该技术需要指示用户独特信息，可以将交织图样、比特重复次数、填零数目等信息组成一个很大的码本。通过码

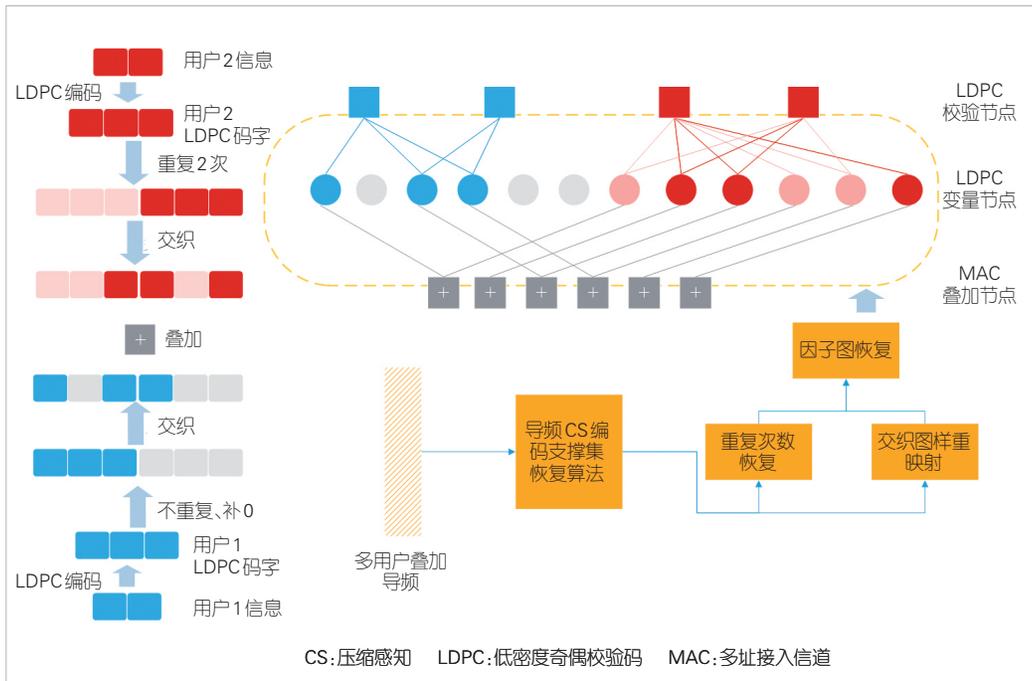
本中码字序号区分不同用户的独特信息。码本序号经过压缩感知映射成为较短的导频，附加在数据部分之前，组成复合包进行传输。第二项技术是稀疏IDMA叠加编码。该技术采用重复、填零、交织、叠加方式，通过比特重复来提高抗多用户干扰的能力，加入大量零元素来有效降低多用户干扰，使用不同交织器来区分用户并随机化多用户干扰。使用这些技术可以大大提高多用户检测的性能。

图6展示了稀疏IDMA的系统架构，该架构包括两个部分：导频编码和稀疏IDMA编码。导频编码的一种方式是采用快速傅里叶变换（FFT）矩阵，将FFT正交矩阵的行随机交织后打孔，得到一个维度较小的矩阵作为导频编码集合。在接收端，导频与IDMA码字分开译码，先通过导频恢复交织图样、比特重复次数、填零数目，然后在已知的叠加因子图结构上进行置信传播（BP）或ESE译码，最终将对应的两部分信息译码结果拼合得到用户的完整发送信息。以两个用户多址接入信道（MAC）系统为例，稀疏IDMA的编解码原理如图7所示。用户1和用户2都采用同样的LDPC码进行编码（这里以LDPC编码为例），它们各自的校验节点到变量节点的因子图是相同的。用户1经过LDPC编码之后没有重复，只是补0，所以因子图中相应部分的边数没有增加。用户2经过LDPC编码之后重复2次，因子图相应部分的边数加倍。比特交织之后，因子图的边分布进一步随机化。两个用户分别的因子图通过MAC叠加节点联系起来，构成一个三层的整体因子图。整个因子图的配置信息，包括重复次数和交织图样，都通过导频的压缩感知恢复算法解出，以辅助IDMA的BP译码。

稀疏IDMA信道编码也可以采用其他编码方式，如卷积码、不规则重复累积码和多元低密度奇偶校验码（NBLDPC）。由于使用了迭代检测，信道编码的译码器需要



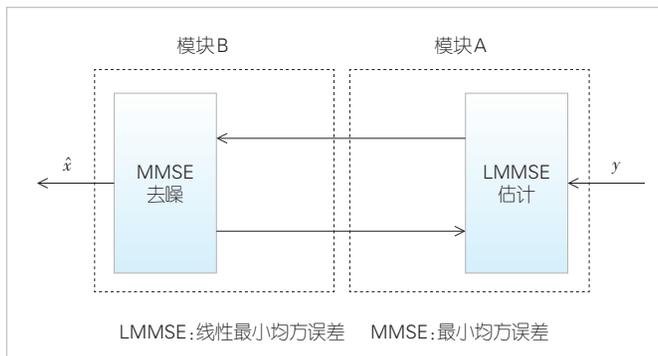
▲图6 稀疏交织多址接入(IDMA)的系统架构^[22]



▲图7 稀疏交织多址接入(IDMA)的编解码原理

提供软入软出的译码信息。极化码难以提供软入软出的译码信息，或提供的软入软出译码信息有较大的性能损失，一般在稀疏 IDMA 里不使用。使用密度演进可以计算出用户使用不同重复次数的性能（度分布优化），并找出最优的重复次数。

图 8 是一个用 Turbo 压缩感知检测的例子。Turbo 压缩感知包含两部分。模块 A 是一个线性 MMSE 估计器，输入是接收信号 y 和模块 B 的输入。模块 B 通过合并 x 的先验信息和模块 A 的输入进行 MMSE 去噪。信息在两个模块间不断迭代以得到更精确的 x 值。迭代次数与用户数、导频长度和感知矩阵维度的大小有关。控制迭代次数可以控制计算的复杂度。降低感知矩阵的维度也可以有效降低计算复杂度。AMP 算法存在某些条件下不收敛的缺点，基于此正交近似消息传递 (OAMP) 被提出。通过正交化输入估计误差和输出估计



▲图8 基于压缩感知的迭代检测

误差，OAMP 在奇异信道（如相关信道等）取得比 AMP 更优的性能。但 OAMP 里有 MMSE 矩阵求逆操作，复杂度较大。通过在记忆近似消息传递 (MAMP) 中引入记忆，严格的正交性使得估计器错误成为渐进独立同分布的高斯信号。在 MAMP 中当前输出估计错误与所有输入估计错误正交。MAMP 不需要矩阵求逆也可以取得和 OAMP 一样的性能，因此具有较好的应用前景。

2.2.2 多时隙传输方案

Reed-Muller 码可以生成高维度的正交矩阵。如同高维度的 FFT 矩阵，Reed-Muller 码生成的正交矩阵也可以用于压缩感知^[23]。这种正交矩阵在无源多址中可以用于用户激活检测和信道估计。利用 Reed-Muller 码的无源多址方案如图 9 所示。其中， K 表示用户信息比特， $K-2p$ 个比特用于 Reed-Muller 码的编码。

基于 Reed-Muller 码的无源多址方案使用 2^p 时隙传输多用户数据。用户 $2p$ 个信息比特可用于确定传输时隙的序号（总的时隙数是 2^p ）。为提高用户检测成功概率，每个用户在两个时隙上传输。两个时隙同时都检测失败的概率较低，因此，这种策略可以提高用户检测成功的概率。当一个用户信息在时隙 A 被成功检测，其在时隙 B 的信号将被干扰消除，以增加其他用户在时隙 B 的检测成功概率。我们可以使用用户信息比特的最后 $2p$ 个比特确定用户在两个时隙传输的序号，此时用户用于 Reed-Muller 码编码的比特数是 $K-2p$ 。Reed-Muller 码的用户激活检测和检测的算法描述如算法 1 所示^[24]。

算法 1: 码元重构算法

Input: measurements $y \in \mathbb{R}^n$, where $n = 2^m$; target sparsity S .

Initialization: $\Phi = []$; iteration count $s = 0$.

While $\|y\| > \epsilon$ and $s \leq S$ do

$s \leftarrow s + 1$

$(P_s, b_s) \leftarrow \text{findPb}(y)$

$\Phi \leftarrow [\Phi \ \phi_{P_s, b_s}]$



▲图9 基于Reed-Muller码无源多址方案^[24]

$$c_s \leftarrow \Phi^{-1} y$$

$$y \leftarrow y - \Phi c_s$$

end while

Output: $\{P_s, b_s, c_s\}$

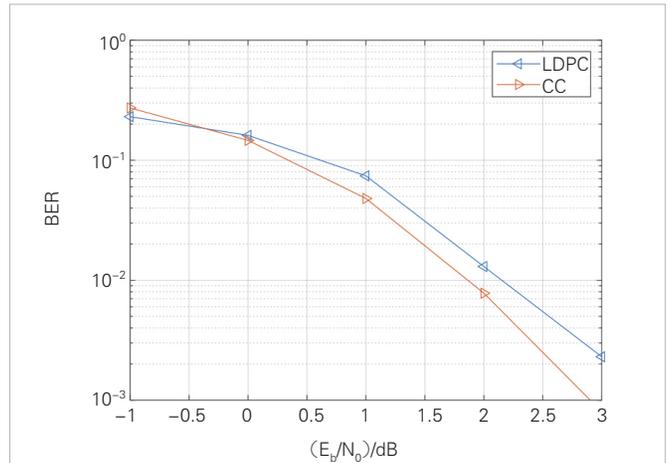
其中， y 是接收信号， m 是Reed-Muller码的阶数，编码后的数据长度是 2^m 。findPb(y)是Reed-Muller码根据接收信号 y 的Reed-Muller码译码，译码后得到矩阵 P_s 和矢量 b_s 。 $\phi_{p,b}$ 是根据 P_s 和 b_s 进行Reed-Muller编码后的结果。 Φ 是长度为 2^m 的Reed-Muller码组成的矩阵， C_s 是信道增益， Φ^{-1} 是对矩阵 Φ 求伪逆。

3 仿真结果

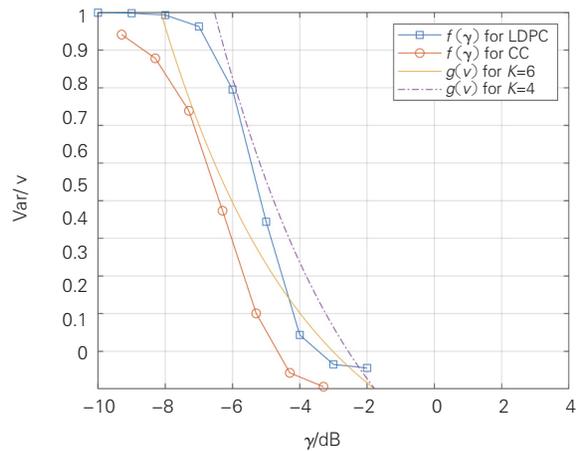
表3给出了仿真参数设置，如信道、信道编码、码率、调制、信息比特长度、编码后长度以及激活用户数。图10(a)给出了单用户使用LDPC码和卷积码的性能。可以看出，卷积码在误码率(BER)小于0.1后有明显的性能增益。

▼表3 仿真参数配置

参数	配置
信道	加性高斯白噪声
调制	二元相移键控
信道编码	5G低密度奇偶校验码、卷积码
卷积码生成多项式	$[133, 171]_8$ 进制
重复次数	2
信道编码码率	0.5
压缩感知导频长度	2 000
多用户数据传输长度	28 000
压缩感知信息比特长度	13
每用户数据部分信息比特长度	87
激活用户数	50 ~ 275



(a) 误码率性能对比



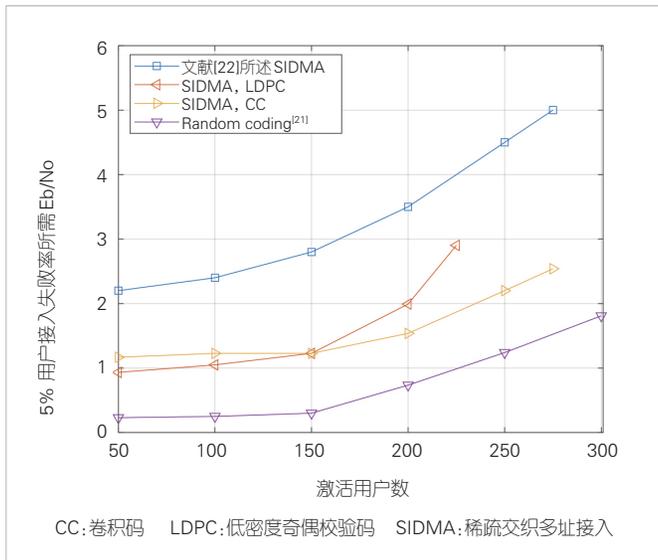
(b) $f(\gamma)$ 和 $g(v)$ 函数性能对比

BER: 误码率 FER: 误帧率 SNR: 信噪比
CC: 卷积码 LDPC: 低密度奇偶校验码

▲图10 卷积码和LDPC性能

卷积码的BER更小意味着用于多址接入时多用户干扰更小，因此可以取得更好的性能。图10(b)给出 $f(\gamma)$ 函数和 $g(v)$ 函数。稀疏IDMA在每个用户传输的信号里填入了大量的零，大大降低了用户间干扰。我们认为IDMA系统的用户数 $K=6$ 对应稀疏IDMA系统的激活用户数是250，IDMA系统的用户数 $K=4$ 对应稀疏IDMA系统的激活用户数是200。当 $K=6$ 时，卷积码的 $f(\gamma)$ 函数不与 $K=6$ 的 $g(v)$ 函数相交，表明此时使用卷积码可以迭代收敛；而 $K=6$ 时，LDPC码的 $f(\gamma)$ 函数与 $K=6$ 的 $g(v)$ 函数在 v 接近1的时候相交，这表明此时使用LDPC不能迭代收敛。当 $K=4$ 时，LDPC码的 $f(\gamma)$ 函数与 $g(v)$ 函数在 v 接近0.05的时候相交，表明此时使用LDPC可以迭代收敛。

图11给出了达到 $P_e=0.05$ 所需要的 E_b/N_0 。与文献[22]中性能相比，由于我们使用了FFT更小的压缩感知矩阵，我们



▲图11 门限随活跃用户数的变化关系

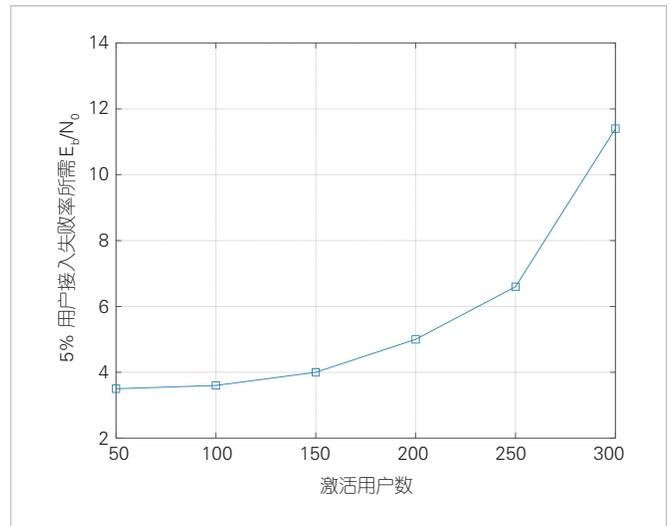
仿真的稀疏交织多址 (SIDMA) 性能更好 (同样是 LDPC 码)。由于我们的 SIDMA 没有对重复因子进行优化, 取值都是 2, SIDMA 使用 LDPC 时在用户较大时有明显的性能损失。同样是 SIDMA 方案, 使用 CC 码性能比 LDPC 更好。图中在 E_b/N_0 小于 3 dB 时使用 CC 可以支持 275 个用户, 使用 LDPC 仅仅支持 225 个用户。这说明信道编码对 SIDMA 性能有较大的影响。我们仿真结果 (使用 CC 的 SIDMA) 与理论界有大概 1 dB 的性能损失。此处仿真所有用户重复因子是 2。在进行重复因子的优化后, SIDMA 可以取得更好的性能, 如支持的激活用户数更大, 或需要的信噪比更低。

表 4 给出了基于 Reed-Muller 无码源多址方案性能仿真的参数设置。仿真结果如图 12 所示。可以发现, 当时隙数是 128 时, Reed-Muller 无源多址方案可支持 300 个用户。激活用户数大于 200 后, 由于用户间干扰加剧, 5% 用户接入失败率所需比特信噪比增加较快, 但在激活用户数小于 200 时基于 Reed-Muller 码无源多址方案性能较好。Reed-Muller 码的检测仅仅涉及相关运算, 计算复杂度较低, 因此适合作为信息比特数较小 (42 bit 左右) 的低复杂度无源多址方案。

▼表 4 基于 Reed-Muller 码的无源多址仿真参数

信道	AWGN
调制	BPSK
时隙数	128
激活用户数	50~300
信息比特数	42
编码后比特数	256
编码方法	Reed-Muller

AWGN: 加性高斯白噪声 BPSK: 二元相移键控



▲图12 基于Reed-Muller码无源多址方案性能

4 结论

本文中我们回顾了 5G NOMA 的研究历程, 总结了 NOMA 主要方案及其特点, 以及 5G NOMA 标准化的经验, 同时介绍了当前大规模通信的理论突破和 6G 新型多址的特点。6G 新型多址采用竞争式免调度设计, 支持海量用户接入, 导频设计和信号检测使用了新的范式。特别地, 我们介绍了两种典型方案: 稀疏 IDMA 和基于 Reed-Muller 码的多址方案。这两种方案都可以支持接近 300 用户的随机接入。针对稀疏 IDMA, 我们讨论了信道编码对其性能影响。在稀疏 IDMA 中使用卷积码可以取得比 LDPC 更好的性能。信息比特数较少时, Reed-Muller 码可以满足大规模用户随机接入, 并且计算复杂度较低。综合来说, 稀疏 IDMA 有更大的设计灵活性, 支持不同的用户数、不同长度的信息比特和不同类型的信道编码, 具有更好的应用前景。

参考文献

- [1] 3GPP. Study on non-orthogonal multiple access (NOMA) for NR: 38.812 [S]. 2018
- [2] YUAN Y F, YUAN Z F, TIAN L. 5G non-orthogonal multiple access study in 3GPP [J]. IEEE communications magazine, 2020, 58(7): 90-96. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900450
- [3] YAN C L, YUAN Z F, LI W M, et al. Non-orthogonal multiple access schemes for 5G [J]. ZTE communications, 2016, 14(4): 11-16. DOI:10.3969/j.issn.1673-5188.2016.04.002
- [4] ITU-R. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond [R]. 2023
- [5] 中国移动通信集团有限公司. 6G 新型多址接入技术白皮书 [R]. 2023
- [6] IMT-2030(6G)推进组. 6G 典型场景和关键能力白皮书 [R]. 2022
- [7] IMT-2030(6G)推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书 [R]. 2021
- [8] YUAN Z F, YU G H, LI W M, et al. Multi-user shared access for

- Internet of Things [C]//Proceedings of IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2016: 1–5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2016.7504361
- [9] DAI X M, CHEN S Z, SUN S H, et al. Successive interference cancelation amenable multiple access (SAMA) for future wireless communications [C]//2014 IEEE International Conference on Communication Systems, IEEE, 2014: 222–226
- [10] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access [C]//2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013, IEEE: 332–336
- [11] PING L, LIU L H, LEUNG W K. A simple approach to near-optimal multiuser detection: interleave-division multiple-access [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking, 2003. IEEE, 2003: 391–396. DOI: 10.1109/WCNC.2003.1200381
- [12] YAN C L, YUAN Y F. Spreading based multi-branch non-orthogonal multiple access transmission scheme for 5G [C]//Proceedings of IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019–Spring). IEEE, 2019: 1–5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2019.8746411
- [13] YUAN Z F, YAN C L, YUAN Y F, et al. Blind multiple user detection for grant-free MUSA without reference signal [C]//Proceedings of IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC–Fall). IEEE, 2017: 1–5. DOI: 10.1109/VTCFall.2017.8288402
- [14] POLYANSKIY Y. A perspective on massive random-access [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2017: 2523–2527. DOI: 10.1109/ISIT.2017.8006984
- [15] YUAN Y F, WANG S, WU Y P, et al. NOMA for next-generation massive IoT: performance potential and technology directions [J]. IEEE communications magazine, 2021, 59(7): 115–121. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000997
- [16] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. IEEE transactions on information theory, 2006, 52(4): 1289–1306. DOI: 10.1109/TIT.2006.871582
- [17] CANDÈS E, TAO T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies [EB/OL]. (2004–10–25) [2024–01–10]. <https://arxiv.org/abs/math/0410542>
- [18] DONOHO D L, MALEKI A, MONTANARI A. Message passing algorithms for compressed sensing: II. analysis and validation [C]//Proceedings of IEEE Information Theory Workshop on Information Theory (ITW 2010, Cairo). IEEE, 2010: 1–5. DOI: 10.1109/ITWKSPS.2010.5503228
- [19] MA J J, YUAN X J, PING L. Turbo compressed sensing with partial DFT sensing matrix [J]. IEEE signal processing letters, 2015, 22(2): 158–161. DOI: 10.1109/LSP.2014.2351822
- [20] LIU L, LIANG C L, MA J J, et al. Capacity optimality of AMP in coded systems [J]. IEEE transactions on information theory, 2021, 67(7): 4429–4445. DOI: 10.1109/TIT.2021.3083748
- [21] ORDENTLICH O, POLYANSKIY Y. Low complexity schemes for the random access Gaussian channel [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2017: 2528–2532. DOI: 10.1109/ISIT.2017.8006985
- [22] PRADHAN A K, AMALLADINNE V K, VEM A, et al. Sparse IDMA: a joint graph-based coding scheme for unsourced random access [J]. IEEE transactions on communications, 2022, 70(11): 7124–7133. DOI: 10.1109/TCOMM.2022.3183590
- [23] HOWARD S D, CALDERBANK A R, SEARLE S J. A fast reconstruction algorithm for deterministic compressive sensing using second order reed-muller codes [C]//Proceedings of 42nd Annual Conference on Information Sciences and Systems. IEEE, 2008: 11–15. DOI: 10.1109/CISS.2008.4558486
- [24] CALDERBANK R, THOMPSON A. CHIRRAP: a practical algorithm for unsourced multiple access [J]. Information and inference: a journal of the IMA, 2020, 9(4): 875–897. DOI: 10.1093/imaia/iaz029

作者简介



严春林，中关村泛联移动通信技术创新应用研究院资深研究员；长期从事Beyond 3G、4G、5G、6G研究工作，主要研究方向为6G新型多址、6G新波形、非正交多址、压缩感知、MIMO检测、非线性预编码；2014年独立提出基于Gray映射的多用户下行传输方案，该技术是3GPP MUST项目的关键技术，2016年起参与3GPP 5G NOMA项目，提出的传输方案达到业界先进水平；发表论文30余篇，申请发明专利20余项。



袁弋非，中国移动研究院首席专家、IEEE Fellow、海外高层次人才、工信部无线与卫星通信委员会委员、《IEEE Communications Letters》《China Communications》编委、《汉斯-无线通信》期刊主编、3GPP 5G NOMA（非正交多址）Study Item 报告人、IMT-2030（6G）新型多址接入任务组组长；长期从事3G、4G、5G、6G的空口关键技术研究 and 标准化工作；获IEEE通信协会亚太杰出论文奖，发表论文60余篇，出版专著12部，获美国授权专利70余项。



王森，中国移动研究院无线领域主任研究员、6G新型无线传输团队负责人，IMT-2030推进组语义通信任务组副组长；主要研究方向为无线系统优化理论、5G/6G空口关键技术及标准；发表论文30余篇，获发明专利100余项。



吕思颖，中国移动研究院研究员；研究方向为6G超大规模MIMO、6G新型多址技术；申请专利10余项。