

## 无源多址技术编码方案的性能分析

马丁<sup>1</sup>, 边东明<sup>2</sup>, 张更新<sup>1</sup>

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003; 2. 陆军工程大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 首先, 从线性码和压缩感知码两个方面对现有无源多址的编码方案进行了介绍, 分析比较了无源多址扩频方案中 Pradhan 和 Ahmadi 提出的两种扩频序列探测器的性能; 然后, 对于 Amalladinne 在 2020 年提出的压缩感知编码方案进行了功率的重新分配; 最后, 仿真结果显示, 在活跃用户数较低时, 改进后的方法有一定的性能提升。

**关键词:** 无源多址; 压缩感知码; 线性码; 扩频序列探测器

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00395

## Performance analysis of unsourced multiple access technology encoding scheme

MA Ding<sup>1</sup>, BIAN Dongming<sup>2</sup>, ZHANG Gengxin<sup>1</sup>

1. School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. School of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China

**Abstract:** Firstly, the existing unsourced multiple access coding schemes were introduced in two aspects: linear codes and compressed sensing codes. On this basis, two unsourced multiple access spread spectrum sequence detector schemes proposed by Pradhan and Ahmadi were analyzed and compared. Then, power was redistributed for the compressed sensing coding scheme proposed by Amalladinne in 2020. The simulation results showed that when the number of active users is low, a certain performance improvement is observed.

**Key words:** unsourced multiple access, compressed sensing code, linear code, spread spectrum sequence detector

### 0 引言

无源多址 (UMA, unsourced multiple access) 技术在 2017 年被 Polyanskiy<sup>[1]</sup> 首次提出, 旨在解决采用传统多址方式应对海量低活跃度用户在相同时频资源上的多址难题<sup>[2]</sup>。UMA 也被称为无源随机接入 (URA, unsourced random access), 与基于授权的随机接入 (GB-RA, grant-based random access) 四步式相比, UMA 不需要经过基站 (BS, base station)

协调; 与免授权的两步式随机接入 (GF-RA, grant-free random access) 相比, UMA 不需要分配用户身份标识序列 (SS, signature sequence)<sup>[2]</sup>。由于具有这些特性, UMA 技术能够在采用相同码本后解决传统多址接入在应对大规模物联网中海量设备接入时的高额信令开销和极端用户碰撞的问题。在文献[2]中, UMA 被视为一种无协调免授权大规模随机接入 (UGFMA, uncoordinated grant-free massive random access), 并与基于压缩感知的免授权随机接入

收稿日期: 2024-03-13; 修回日期: 2025-04-19

通信作者: 边东明, bian\_dm@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. U21A20450); 江苏省基础研究计划 (前沿引领技术) 项目 (No. SBK2019050020)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No. U21A20450), The Jiangsu Province Basic Research Program (Frontier Leading Technology) Project (No. SBK2019050020)

进行了对比，凸显出UMA在海量用户接入和低时延传输场景下的优越性。

UMA技术的核心是其编码方案的设计<sup>[1]</sup>，所以自从文献[1]提出UMA的概念后，一些高效编码方案相继被提出。最初的编码方案主要集中在高斯信道条件下，探索目标错误率所需要最小信噪比。在此基础上，文献[4-5]分别开启了瑞利衰落信道和莱斯衰落信道条件下的探索。文献[6]将已有的UMA编码方案拓展到多输入多输出（MIMO, multiple-input multiple-output）下以获得更大的增益。对于UMA编码方案的分类目前主要有两种：一种是基于T折叠ALOHA（T-Fold-ALOHA）协议对内码纠错能力的强弱分为基于T-Fold ALOHA协议的UMA方法和基于编译码增强的UMA方法<sup>[2]</sup>；另一种是根据UMA的传输方式分为T-Fold-ALOHA传输、T折叠-不规则重复时隙ALOHA（T-Fold irregular repetition slotted ALOHA, T-Fold-IRSA）协议传输和直接序列扩频传输<sup>[3]</sup>。

鉴于Polyanskiy所提框架的新颖性，本文将采用UMA的说法，从压缩感知码和线性码两个角度出发，阐述各种UMA编码方案，仿真比较典型编码方案的性能和线性码方案中两种扩频序列探测器<sup>[7-8]</sup>的优劣，重新分配文献[9]提出的压缩感知码方案的功率。

## 1 基于线性码编码的UMA

文献[1]推导了UMA随机编码的性能边界，并与ALOHA、编码时隙ALOHA、码分多址（CDMA, code division multiple access）等多址方案进行比较，随着接入设备的增加，上述方案与随机编码的性能边界差距较大。文献[10]提出了第一个UMA编码方案，该方案在T-Fold-ALOHA的基础上，基于计算前向和二进制加性信道码，将编码结构划分为两个部分：外码和内码。外码采用重叠码（SC, superposed code），确保单个时隙中的 $T$ 个用户能够成功被区分；而内码采用二进制线性码，使外码阶段成

功区分的码字能够成功被译码。其中，T-fold-ALOHA协议采用能够区分 $T$ 个用户的外码来减少多用户干扰（MAI, multiple access interference）<sup>[3]</sup>。图1展示了Polyanskiy的UMA编码框架<sup>[11]</sup>。

在图1所示的编码结构中，一旦单个时隙内的用户数量超过阈值 $T$ ，将超出外部译码器的译码能力，直接导致译码错误的判定。在文献[10]中，为确保外部译码器成功译码，采用了大量时隙来减少用户消息在同一时隙内发送的概率。尽管该方法牺牲了频谱效率，但保障了外码能够在单个时隙内解决 $T$ 个用户消息的碰撞。为了解决频谱效率低效的问题，文献[8]提出了T-Fold-IRSA协议，在T-Fold-ALOHA的基础上允许在多个时隙中发送同一数据包副本，解决了T-Fold-ALOHA需要大量时隙的问题。文献[12]推导了 $T$ 不同取值的性能边界，并结合密度演进技术<sup>[13]</sup>对已知活跃用户数以及活跃用户数服从泊松分布的情况进行了模拟。结果表明，这两种场景下的性能差距并不显著。文献[14]对该结果进行了进一步验证。

尽管文献[10]提出的方案与随机编码的性能边界存在显著差距，但采用的级联编码结构为未来UMA编码技术的研究提供了关键思路。之后的编码方案开始基于文献[10]的级联编码结构和T-Fold-ALOHA协议，致力于探索性能更加优异的编码方案。

### 1.1 基于低密度奇偶校验码的UMA

文献[15]将非二进制低密度奇偶校验码（LDPC, non-binary low-density parity-check code）作为外码来解决多用户干扰问题。在单个时隙内，接收端采用最大似然解码器对内码中的线性二进制码（LBC, linear binary code）进行译码，采用低复杂度迭代 $q$ 元和积算法（QSPA, q-ary sum-product algorithm）对外码中的非二进制LDPC进行译码。此外，在接收端通过连续干扰消除（SIC, successive interference cancellation）进一步提升性能。

文献[16]在T-Fold-ALOHA协议的基础上，将

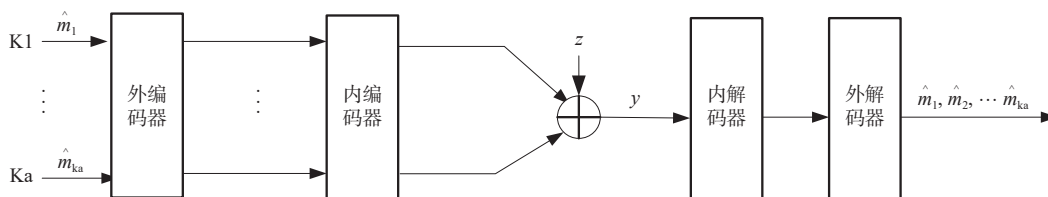


图1 Polyanskiy的UMA编码框架

发送的消息分为两部分：第一部分用于前导索引以进行交织器的选择，并对消息本身进行压缩感知编码，接收端采用最小非负二乘（NNLS, non-negative least squares）对压缩感知编码部分进行译码；第二部分用作有效负载，采用LDPC进行编码，接收端使用迭代联合译码算法进行译码。活跃用户随机选择时隙并重复发送编码码字，接收端结合SIC算法，性能得到了显著提升。

文献[17]采用互信息转换图<sup>[18]</sup>优化中使用的LDPC<sup>[16]</sup>，优化后的LDPC在联合解码算法下具有更好的性能。

文献[19]同样将用户消息分为两个部分，即前导序列和有效负载。同时在文献[16]的基础上添加了重复码字模块和补零模块，重复码字的次数根据前导序列决定，补零码字的数目根据帧长和重复后的编码码字长度共同确定。文献[19]提出的编码方案等价于引入了稀疏交织多址技术，进一步缩小了与随机编码性能边界的差距。

文献[20]则是在文献[19]的基础上，先将前导序列经过稀疏回归码编码，再进行交织器的选择和压缩感知编码，有效负载部分仍然采用LDPC进行编码。

文献[21]将文献[20]中的交织器替换为索引调制器。然后，前导部分用于确定索引调制多路访问（IMMA, index modulation multiple access）模式和进行压缩感知编码。有效负载经过LDPC编码后通过IMMA传输。接收端基于LDPC和IMMA因子图的渐进消息传递（AMP, approximate message passing）算法对编码比特进行解码。

文献[22]简化了文献[21]的编码流程，采用扩频传输的方案，将前导部分用于扩频序列的选择，有效负载部分通过LDPC编码后与选择的扩频序列进行Kronecker乘积。在接收端，通过最小均方误差（MMSE, minimum mean square error）估计器和LDPC因子图之间来回传递软信息，实现了软输入软输出，从而提高了性能。采用的LDPC使用密度进化技术精心设计<sup>[18]</sup>以匹配迭代过程。

文献[23]采用了文献[22]的编码结构。不同的是，文献[23]采用了较短的扩频序列，并将其提出的方案拓展到MIMO的场景下，获得了更大的增益。

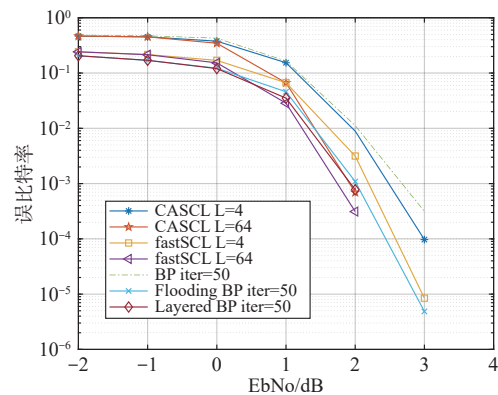
文献[4]提出了在瑞利衰落信道条件下的LDPC编码时隙方案，并与逆界<sup>[4]</sup>进行了比较。结果表明，

提出的LDPC编码方案与逆界的差距进一步缩小。

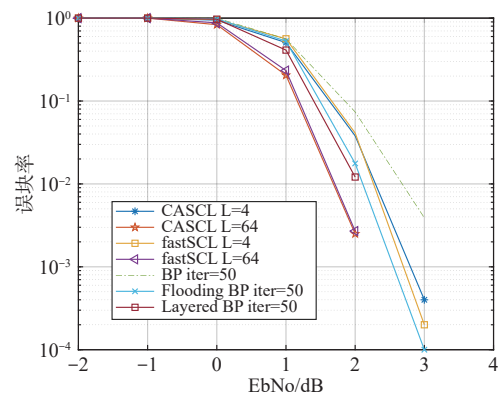
文献[24-25]将文献[4]的方案推广到异步瑞利衰落信道条件中，推导并提出了在该条件下的译码算法。仿真结果显示，所提出的译码算法在异步条件下与同步条件下的性能相差不大。

上述基于LDPC编码的UMA方案表现出了良好的性能，但是在短消息下，Polar码的性能要优于LDPC。短消息下LDPC和Polar码的性能比较如图2所示，相应参数 $K_{LDPC} = 288, N_{LDPC} = 576, K_{Polar} = 256, N_{Polar} = 512, CRC = 16, R = 1/2$ （LDPC码采用IEEE 802.11e方案，Polar码采用高斯近似在EbNo = 2.5 dB构造， $K$ 代表初始消息比特数， $N$ 代表编码后的比特数， $R$ 代表编码码率）。

图2(a)和图2(b)中对于Polar码分别采用列表长度为4和64的CRC辅助的连续消除列表译码（CASCL, CRC-aided successive cancellation list）、快速连续消除列表译码（fastSCL, fast successive cancellation list）和置信传播译码（BP, belief propagation），对于LDPC码，则采用迭代次数为50的洪水式置信传播译码（Flooding BP, flooding belief propagation）



(a) LDPC和Polar码不同译码算法的误比特率性能



(b) LDPC和Polar码不同译码算法的误块率性能

图2 短消息下LDPC和Polar码的性能比较

和分层置信传播译码 (Layered BP, layered belief propagation)。

### 1.2 基于Polar编码的UMA

在T-Fold-ALOHA协议的基础上, 文献[26]提出联合逐次消去译码表 (JSCL, joint successive cancellation decoding list) 算法和联合迭代译码的Polar编码方案, 为了优化Polar码的性能, 提出了一种冻结比特的设计方法, 同时比较了两种算法的性能, 优化后的Polar编码方案在JSCL算法下的性能得到了显著提升。

文献[27]将Polar编码和将干扰视为噪声 (TIN, treating interference as noise) 策略、SIC技术结合, 提出了瑞利衰落信道条件下的Polar编码方案, 同时推导了TIN-SIC技术在瑞利衰落信道条件下的性能边界, 距离逆界更加接近。

文献[28]采用文献[19]的编码方案来稀疏编码比特, 用Polar码代替LDPC对有效载荷进行编码, 同时采用可变长度编码, 以提供SIC更多的灵活性, 获得了比文献[19]的方案更加优越的性能。

文献[8]同样将文献[22]中的LDPC替换成短消息下性能更强的Polar码, 但是接收端采用硬输入软输出 (HISO, hard input soft output) 的形式, 性能并没有达到文献[22]中MMSE估计器和外部代码软信息交互的水平。

### 1.3 基于卷积码编码的UMA

文献[29]采用卷积码作为内码, 提出了稀疏Kronecker乘积 (SKP, sparse Kronecker-product) 编码方案。每个活动用户的消息被编码为两个分量码字的Kronecker乘积, 其中第一个分量经过索引调制后是稀疏的, 以便于进行基于压缩感知的多用户检测; 第二个分量进行卷积码编码以获得低复杂度的编码增益。当SKP的第一个分量不携带信息时, SKP编码可以看作稀疏码多址 (SCMA, sparse code multiple access) [30]。当第二个分量不携带信息时, SKP编码可以看作稀疏调制。

## 2 基于压缩感知编码的UMA

基于压缩感知编码的UMA方案同样采用了图1所示的级联结构。在文献[3]中, 比较了基于压缩感知编码和基于线性码编码的UMA方案。尽管基于压缩感知编码的UMA方案在性能上仍有一定差距, 但由于其复杂度较低, 引起了业内学者对其

进行深入研究兴趣。

### 2.1 基于压缩感知编码的同构UMA

文献[31]提出了耦合压缩感知编码 (CCS, coupled compressive sensing) 的方案, 用以解决UMA接入问题。该方案将用户传输的消息分割成更小的子块, 在传输过程中使用线性码添加冗余, 接着对添加冗余的块进行压缩感知编码。在接收端, 首先通过最小非负二乘方法对压缩信号进行恢复, 然后利用基于树的低复杂度算法将各个子块连接到一起, 从而实现原始消息的恢复。

文献[32]在文献[31]的基础上, 引入稀疏回归码作为内码, 同时采用渐进消息传递算法进行译码, 进一步提高了性能。

文献[7]对文献[31]中的树码进行改进, 将信息块和冗余块分开, 并对AMP译码器进行了改进, 使其能够与外部树译码器动态地进行信息交互, 充分发挥底层CCS结构的优势, 从而实现更高的增益。

在文献[33]中, 为了进一步降低复杂度, 提出了一种基于线性调频重建的压缩感知译码算法。该算法结合了二进制线性调频编码和线性调频重建算法<sup>[34]</sup>。然而, 尽管该算法成功地降低了系统的复杂度, 但同时也降低了系统的性能。

文献[35]提出了一种基于马尔可夫叠加传输<sup>[36]</sup> (BMST, block Markov superposition transmission) 的压缩感知方案。外码先进行循环冗余校验 (CRC, cyclic redundancy check) 添加冗余, 再通过BMST, 内码采用稀疏回归码。在接收端, 引入连续消除 (SC, successive cancellation) 和AMP组成的混合解码器<sup>[37]</sup>, 进一步降低了复杂度。

文献[38]将Raptor Q码嵌入文献[32]的CCS方案, 活跃用户的消息先用固定速率的Raptor Q码进行编码, 再通过文献[32]的编码结构。在接收端引入了一种新的协调树Raptor译码算法, 取得了比文献[7]更优异的性能。

文献[39]在文献[7]的基础上, 提出了能够纠正 $t$ 个错误的树码结构, 并且推导出了该结构的性能界限, 使其在瑞利衰落信道中的性能得到了显著提高。

### 2.2 基于压缩感知编码的异构UMA

文献[40]基于压缩感知的同构方案, 考虑物联网设备的不同需求, 进一步引入了异构无源随机接入 (HetURA, heterogeneous unsourced random ac-

cess) 模型。该模型用于处理具有不同功率水平的用户情况, 同一组中的用户仍采用相同的码本。接收端使用 AMP 译码器来恢复信号分组。

文献[41]在文献[40]的基础上, 改进文献[32]中的级联编码结构, 提出了一种基于 AMP 的联合迭代译码算法, 该算法在不增加计算复杂度的基础上, 用于解决 HetURA 的信号恢复问题。

文献[42]为了解决文献[41]中外部 LDPC 因子图多个码字导致的性能丢失问题, 对用户集合进行静态分组。将用户的有效载荷划分为两个部分, 第一个部分用于确定采用的内码和外码的编码器。为了准确推断每个分组的用户数量, 每个用户同时传递一个长度等于分组数的向量。第二个部分通过选定的编码器进行联合编码。在接收端, 仍采用文献[41]的译码结构。

编码分组 (CD, coded demixing) 的性能对比如图3所示,  $K_a = 25$ ,  $w_1 = 128$  bit,  $R_1 = 1/2$ ,  $w_2 = 96$  bit,  $R_2 = 3/8$  为相应参数设置。文献[41]提出的分组方案与 TIN 和 SIC 的方案进行了比较, 结果显示, 采用分组的方案在性能上表现出了显著的优势。其中,  $K_a$  表示活跃用户数,  $w_i$  表示第  $i$  组的信息比特,  $R_i$  表示第  $i$  组的编码码率。

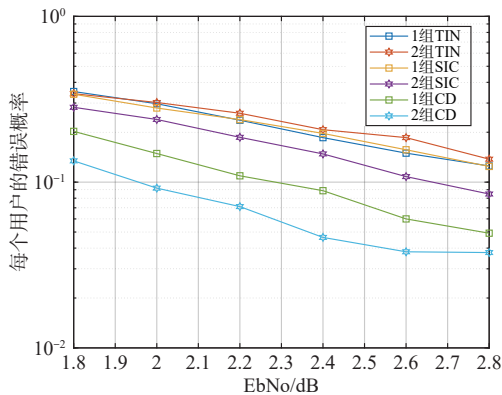


图3 编码分组的性能对比

### 3 实验结果分析

#### 3.1 UMA 扩频探测器的性能比较和分析

在基于线性码编码的 UMA 方案中, 文献[22]

提出的扩频方案首次达到了随机编码的性能边界。在接收端, 该方案先对用户使用的扩频序列进行检测, 再进行 MMSE 估计, 最后将其转为对数似然比 (LLR, log-likelihood ratio) 进行单用户解码, 解码成功后进行串行干扰消除。其中, 接收端对于扩频序列的检测尤为重要。目前的探测器主要有两种, 分别是文献[7]中的能量探测器和文献[8]中的协方差探测器。本文用 MATLAB 对这两种探测器在复杂度相近的条件下进行了仿真。其中,  $K_a$  表示活跃用户数, 而  $K\delta + K_a$  表示探测器输出列表的大小。探测器比较参数取值见表1, 两种探测器的复杂度比较见表2。

表2 两种探测器的复杂度比较

探测器	复杂度
协方差探测器	$N = n_s^2 n_c + 2^B n_s^2 + 2^B n_s$
能量探测器	$N = n_s n_c 2^{(g+B)}$

随着输出列表  $K\delta + K_a$  的增加, 扩频序列探测器的性能逐渐得到提升。在信噪比较低的条件下, 协方差探测器略优于能量探测器, 两种扩频序列探测器的对比如图4所示。总体而言, 两者的探测性能差异并不显著。然而值得注意的是, 能量探测器可以通过增加参数  $g$  的值来降低探测错误的概率, 但相应的代价是复杂度急剧增加<sup>[8]</sup>, 同时带来的性能提升也是有限的, 不同  $g$  值下的能量探测器和协方差探测器性能对比如图5所示。

#### 3.2 UMA 压缩感知编码的功率分配

在基于压缩感知的 UMA 编码方案中, AMP 译码算法普遍采用均匀功率分配。本文在此基础上, 采用文献[43]的功率分配方法, 对文献[9]提出的方案进行功率的重新分配。为了便于比较, 与文献[9]保持相同的参数设置, 功率分配参数取值见表3。UMA 压缩感知方案的功率分配如图6所示, 活跃用户数固定时, 在目标错误率的前提下达到最小信噪比所需的参数  $(a, f)$  被标记在图6中, 其中  $a$  表示调节算法早期段的功率衰减速度因子, 避免功率浪费;  $f$  表示调节算法扁平化起始点的因子, 保障后期段功率。

表1 探测器比较参数取值

活跃用户数( $K_a$ )	扩频序列携带比特( $B_s$ )	编码比特( $B_c$ )	极化码(CRC)	扩频序列长度( $n_s$ )	编码长度( $n_c$ )	扩频码本
25	12	88	16	59	512	归一化高斯码本
250	13	87	12	117	256	归一化高斯码本

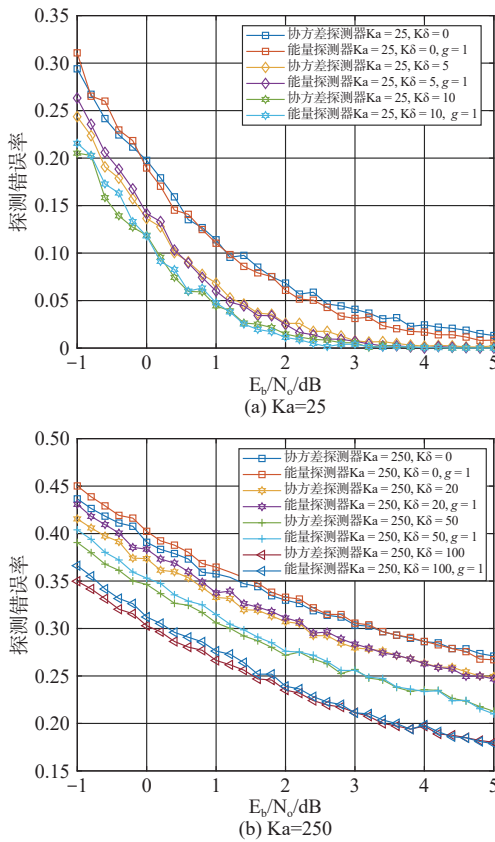


图4 两种扩频序列探测器的对比

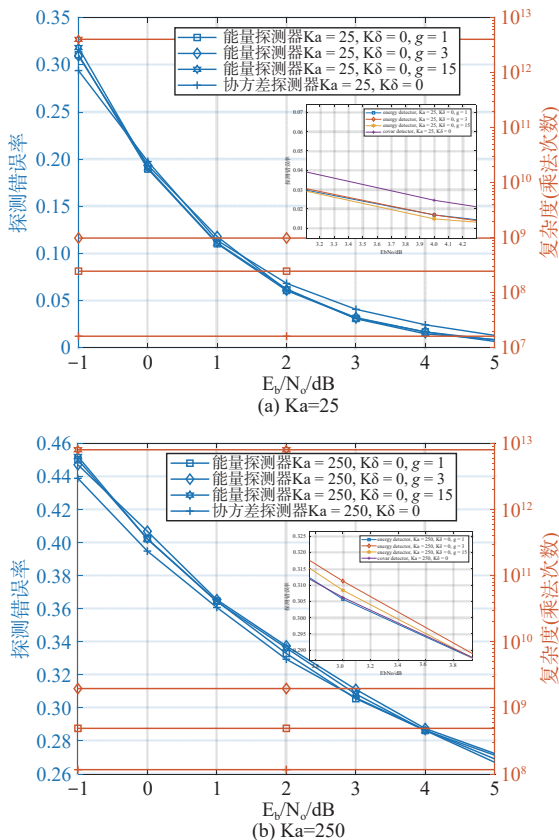


图5 不同g值下的能量探测器和协方差探测器性能对比

仿真结果表明，在活跃用户数为25~50时，采用的功率分配方法带来了一定的性能提升。然而，在活跃用户数大于150时，该方法的性能不仅没有得到改善，反而出现了恶化的趋势。其原因在于，采用衰减功率分配后，虽然降低了前一部分的虚警概率，但却以提高后一部分的虚警概率为代价。虽然修饰的指数功率分配能够通过调整参数 $a$ 改变原衰减分配的陡峭度，但在活跃用户数量较大时，性能会出现恶化。对于这一点，可以考虑在后一部分添加更多的奇偶校验位，以改善后一部分的高虚警概率导致的性能下降。

表3 功率分配参数取值

参数	取值
信息比特 $w$	128
片段数量 $L$	16
最终编码数 $N$	38 400
编码子块长度 $v_1$	16
单个片段长度 $m$	$2^6$
错误率上限	0.05

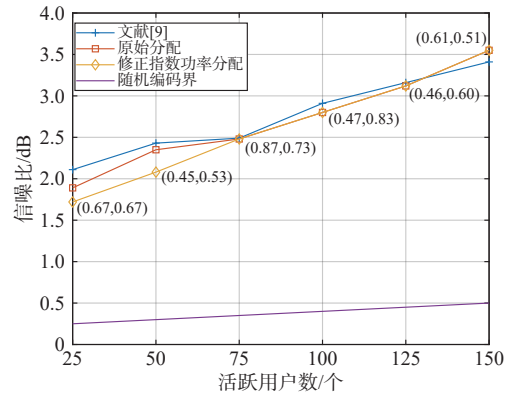


图6 UMA压缩感知方案的功率分配

### 3.3 UMA编码方案的性能比较

为了比较前述UMA编码方案的性能，本文分别对UMA线性码编码和压缩感知码编码的典型方案进行了仿真，比较其编码方案在高斯信道条件下译码错误概率 $\epsilon \leq 0.05$ 时所需要的最小信噪比和在瑞利衰落信道条件下译码错误概率 $\epsilon \leq 0.1$ 时所需要的最小信噪比，基于线性码编码的UMA方案如图7所示，UMA的压缩感知编码方案如图8所示，其余仿真参数与原文献中的方案保持一致。

UMA编码的性能主要由编码方式、传输方式和译码方式共同决定，UMA编码性能的主要因素见表4。

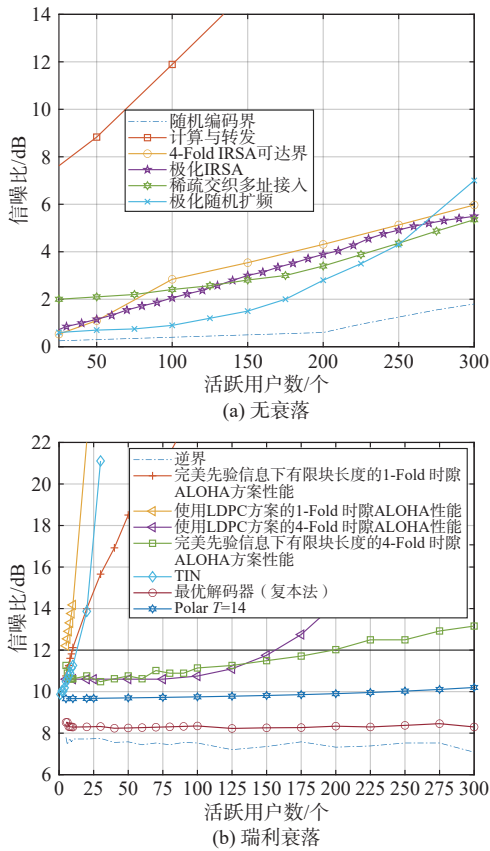


图7 基于线性码编码的UMA方案

对于线性码编码方案，将纠错性能更强的Polar码作为内码后，理论上性能会得到提高。文献[27]用Polar码作为内码，沿用文献[24]的TIN-SIC译码器结构，获得比LDPC作为内码更优异的性能，如图7(b)所示。但根据文献[44]图2.1的仿真结果，文献[22]在LDPC作为内码的基础上，译码端采用软信息交互的译码方式比文献[7]采用Polar码作为内码的性能更优。除此之外，根据图7(a)的仿真结果，内码都采用Polar码时，扩频方案的性能比ALOHA传输的方案性能更优。因为基于T-Fold-ALOHA传输结构在单个时隙的活跃用户数超过 $T$ 时，将无法对用户进行区分，更不能成功译码，所以在T-Fold-ALOHA的编码方案中，通过增加时隙数来减少同一时隙的活跃用户数，从而提高系统性能，但该方式降低了频谱效率。而基于T-Fold-IRSA的传输结构在T-Fold-ALOHA的基础上，通过将单个传输消息在多个时隙传输，增加成功译码概率的同时，也解决了T-Fold-ALOHA传输结构中频谱效率低的问题。但是T-Fold-IRSA的传输结构在活跃用户数量增大时，仍要增加时隙数来确保单

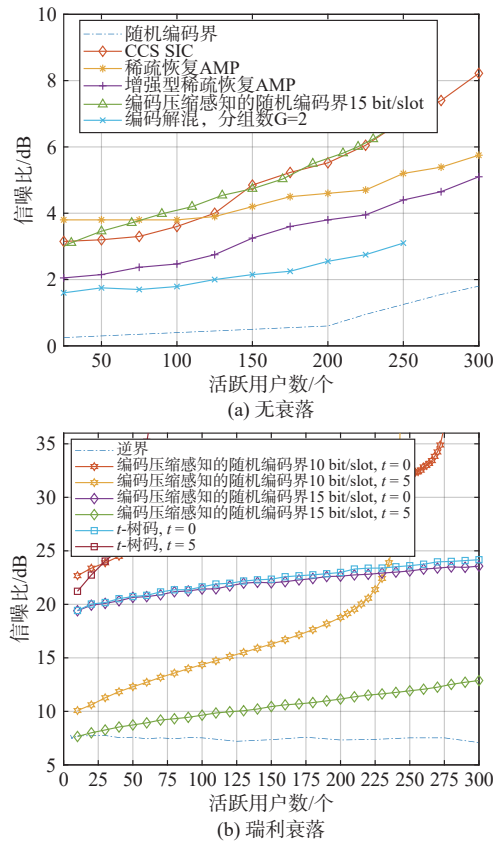


图8 UMA的压缩感知编码方案

注：CCS RCB即编码压缩感知的随机编码界

表4 UMA编码性能的主要因素

主要因素	分类
编码方式	外码编码方式、内码编码方式
传输方式	T-Fold-ALOHA传输、T-Fold-IRSA传输、扩频传输
译码方式	联合译码、串行译码

个时隙中的用户不超过 $T$ 值。基于扩频传输的传输结构不同于ALOHA的传输方式，它是通过扩大扩频码本中的扩频条目稀疏活跃用户数，使得活跃用户碰撞的概率能够控制在一定范围内，从而极大地提高了系统的性能。

对于压缩感知码编码方案的性能差距主要体现在编码方式和译码方式上，因为现有的压缩感知码方案普遍采用T-Fold-ALOHA传输结构。编码方式对编码性能的影响体现在外码和内码的构建上。图8(a)比较了现有的两种外码——树码和能够纠正 $t$ 个错误的树码。结果显示，与基于树码的方案相比，纠正 $t$ 个错误的树码将编码压缩感知方案的性能提高了7~10 dB。图8(b)比较了采用树码作为外码的压缩感知编码方案，由于外码一致，所以性能

差距主要由内码和译码方式共同决定。文献[45]进一步对两种因素的影响进行了仿真。不同内码和译码方式的UMA编码性能如图9所示,接收端采用NNLS译码,在活跃用户数为50的条件下BCH(Bose-Chaudhuri-Hocquenghem)码本的性能优于LDPC码本;在活跃用户数为300的条件下性能差距不明显。当采用高斯码本时,接收端用AMP算法重构时的性能最优。但是,采用高斯码本作为内码码本会提高AMP解码器的内存和计算负载。所以,现有的压缩感知方案大多采用哈达玛矩阵作为内码码本来减少AMP译码的复杂度<sup>[7]</sup>。

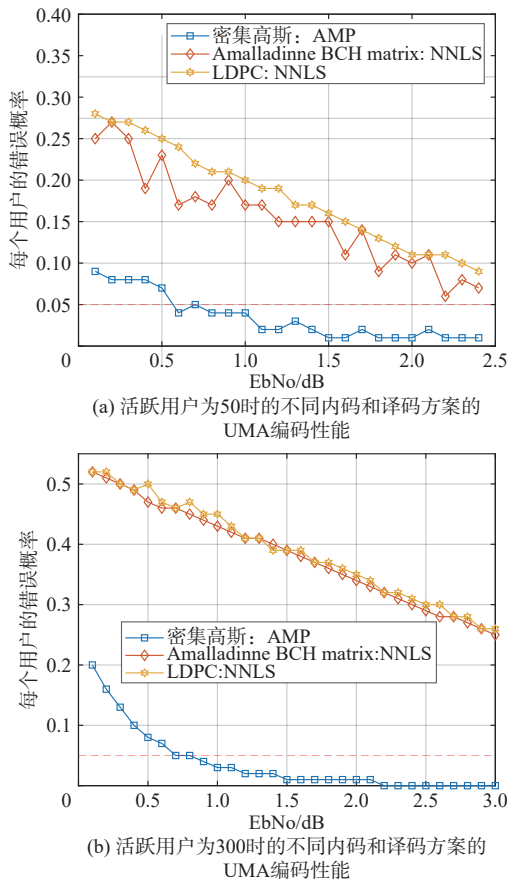


图9 不同内码和译码方式的UMA编码性能

## 4 结束语

本文从压缩感知码和线性码两个角度出发,从编码方式、传输方式和译码方式3个层面对当前UMA的编码方案进行了分析。在基于线性码编码的UMA方案中,通过对两种扩频序列探测器的比较和分析,得出了它们在复杂度相近的情况下具有等效性的结论。此外,本文还对基于压缩感知编码的UMA方案

进行了功率分配,并对结果进行了分析。然而,从结果可以注意到在用户密集的情况下,当前压缩感知编码的功率分配方法尚未达到令人满意的性能水平。

未来的研究方向之一是将研究重心转向编码分组,以进一步改善在用户密集场景下的功率分配效果。此外,在对性能优异的扩频方案和压缩感知方案内码码本的选择上,探索更具优势的码本和译码算法,将有助于提高整体系统的性能,并为UMA的进一步发展提供更多的可能性。

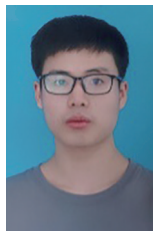
## 参考文献:

- [1] POLYANSKIY Y. A perspective on massive random-access[C]// Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Piscataway: IEEE Press, 2017: 2523-2527.
- [2] 范平志, 李里, 陈欢, 等. 面向大规模物联网的随机接入: 现状、挑战与机遇[J]. 通信学报, 2021, 42(4): 1-21.  
FAN P Z, LI L, CHEN H, et al. Random access for massive Internet of Things: current status, challenges and opportunities[J]. Journal on Communications, 2021, 42(4): 1-21.
- [3] LI Y J, DAI J C, SI Z W, et al. Unsourced multiple access for 6G massive machine type communications[J]. China Communications, 2022, 19(3): 70-87.
- [4] KOWSHIK S S, ANDREEV K, FROLOV A, et al. Energy efficient coded random access for the wireless uplink[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(8): 4694-4708.
- [5] TIAN F Y, CHEN X M, LIU L, et al. Design of massive unsourced random access over Rician channels[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 341-345.
- [6] FENGLER A, CAIRE G, JUNG P, et al. Massive MIMO unsourced random access[J]. arXiv preprint arXiv:1901.00828, 2019.
- [7] PRADHAN A K, AMALLADINNE V K, NARAYANAN K R, et al. Polar coding and random spreading for unsourced multiple access[C]//Proceedings of the ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [8] AHMADI M J, DUMAN T M. Random spreading for unsourced MAC with power diversity[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(12): 3995-3999.
- [9] AMALLADINNE V K, KUMAR PRADHAN A, RUSH C, et al. On approximate message passing for unsourced access with coded compressed sensing[C]//Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 2995-3000.
- [10] ORDENTLICH O, POLYANSKIY Y. Low complexity schemes for the random access Gaussian channel[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Information Theory

- (ISIT). Piscataway: IEEE Press, 2017: 2528-2532.
- [11] WU Y P, GAO X Q, ZHOU S D, et al. Massive access for future wireless communication systems[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(4): 148-156.
- [12] GLEBOV A, MATVEEV N, ANDREEV K, et al. Achievability bounds for T-fold irregular repetition slotted ALOHA scheme in the Gaussian MAC[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [13] LIVA G. Graph-based analysis and optimization of contention resolution diversity slotted ALOHA[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(2): 477-487.
- [14] NGO K H, LANCHO A, DURISI G, et al. Unsourced multiple access with random user activity[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2023, 69(7): 4537-4558.
- [15] USTINOVA D, GLEBOV A, RYBIN P, et al. Efficient concatenated same codebook construction for the random access Gaussian MAC[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [16] VEM A, NARAYANAN K R, CHENG J, et al. A user-independent serial interference cancellation based coding scheme for the unsourced random access Gaussian channel[C]//*Proceedings of the 2017 IEEE Information Theory Workshop (ITW)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 121-125.
- [17] GLEBOV A, MEDOVA L, RYBIN P, et al. On LDPC code based massive random-access scheme for the Gaussian multiple access channel[M]//*Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2018: 162-171.
- [18] LIVA G, CHIARI M. Protograph LDPC codes design based on EXIT analysis[C]//*Proceedings of the IEEE GLOBECOM 2007 - IEEE Global Telecommunications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2007: 3250-3254.
- [19] PRADHAN A, AMALLADINNE V, VEM A, et al. A joint graph based coding scheme for the unsourced random access Gaussian channel[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [20] LI T Y, WU Y P, ZHENG M F, et al. SPARC-LDPC coding for MIMO massive unsourced random access[C]//*Proceedings of the 2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [21] SU Y W, ZHENG J P. Index modulation multiple access for unsourced random access[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(5): 794-798.
- [22] PRADHAN A K, AMALLADINNE V K, NARAYANAN K R, et al. LDPC codes with soft interference cancellation for uncoordinated unsourced multiple access[C]//*Proceedings of the ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [23] SU Y W, ZHENG J P, LIANG Z J, et al. Massive MIMO enabled unsourced random access through LDPC coding and random spreading[C]//*Proceedings of the 2022 IEEE 22nd International Conference on Communication Technology (ICCT)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 178-183.
- [24] ANDREEV K, KOWSHIK S S, FROLOV A, et al. Low complexity energy efficient random access scheme for the asynchronous fading MAC[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [25] KOWSHIK S S, ANDREEV K, FROLOV A, et al. Short-packet low-power coded access for massive MAC[C]//*Proceedings of the 2019 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 827-832.
- [26] MARSHAKOV E, BALITSKIY G, ANDREEV K, et al. A polar code based unsourced random access for the Gaussian MAC[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [27] ANDREEV K, MARSHAKOV E, FROLOV A. A polar code based TIN-SIC scheme for the unsourced random access in the quasi-static fading MAC[C]//*Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 3019-3024.
- [28] ZHENG M F, WU Y P, ZHANG W J. Polar coding and sparse spreading for massive unsourced random access[C]//*Proceedings of the 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [29] HAN Z Y, YUAN X J, XU C B, et al. Sparse kronecker-product coding for unsourced multiple access[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(10): 2274-2278.
- [30] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access[C]//*Proceedings of the 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. Piscataway: IEEE Press, 2013: 332-336.
- [31] AMALLADINNE V K, VEM A, SOMA D K, et al. A coupled compressive sensing scheme for unsourced multiple access[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 6628-6632.
- [32] FENGLER A, JUNG P, CAIRE G. SPARCs and AMP for unsourced random access[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 2843-2847.
- [33] CALDERBANK R, THOMPSON A. CHIRRUP: a practical algorithm for unsourced multiple access[J]. *Information and Inference: A Journal of the IMA*, 2020, 9(4): 875-897.
- [34] 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 the 2008 42nd Annual Conference on Information Sciences and Systems*. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-6.

- away: IEEE Press, 2008: 11-15.
- [35] CAO H W, XING J Y, LIANG S S. CRC-aided sparse regression codes for unsourced random access[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(8): 1944-1948.
- [36] MA X, LIANG C L, HUANG K C, et al. Block Markov superposition transmission: construction of big convolutional codes from short codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(6): 3150-3163.
- [37] BARBIER J, KRZAKALA F. Approximate message-passing decoder and capacity achieving sparse superposition codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2017, 63(8): 4894-4927.
- [38] JIANG D X, FAN P Z. A raptor code based unsourced random access with coordinated tree-raptor decoding algorithm[C]//Proceedings of the 2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [39] ANDREEV K, RYBIN P, FROLOV A. Coded compressed sensing with list recoverable codes for the unsourced random access[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(12): 7886-7898.
- [40] HAO A, RINI S, AMALLADINNE V, et al. An exploration of the heterogeneous unsourced MAC[J]. arXiv preprint arXiv:2011.10900, 2020.
- [41] AMALLADINNE V K, HAO A, RINI S, et al. Multi-class unsourced random access *via* coded demixing[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Piscataway: IEEE Press, 2021: 3080-3085.
- [42] EBERT J R, AMALLADINNE V K, RINI S, et al. Coded demixing for unsourced random access[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2022, 70: 2972-2984.
- [43] GREIG A, VENKATARAMANAN R. Techniques for improving the finite length performance of sparse superposition codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(3): 905-917.
- [44] AHMADI M J. Novel unsourced random access algorithms over Gaussian and fading channels [D]. Ankara: Bilkent University, 2024.
- [45] ROMANOV E, ORDENTLICH O. On compressed sensing of binary signals for the unsourced random access channel[J]. Entropy, 2021, 23(5): 605.

## [作者简介]



马丁(2000-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为卫星物联网等。



边东明(1976-), 男, 博士, 陆军工程大学通信工程学院副教授, 主要研究方向为卫星通信、天地一体化、卫星测控等。



张更新(1967-), 男, 博士, 南京邮电大学通信与信息工程学院教授, 主要研究方向为空间信息网络、卫星通信等。