

基于频谱感知和非正交多址的大规模免授权随机接入方案

张晶^{1,2}, 马林³, 高宏旭⁴, 陆音^{1,2}, 吴烁雨⁵, 朱洪波^{1,2}

(1.南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003; 2.江苏省无线通信与物联网重点实验室, 江苏 南京 210003;
3.华为技术有限公司南京研究所, 江苏 南京 210012; 4.中邮建技术有限公司, 江苏 南京 210012;
5.南京邮电大学波特兰学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 针对大规模机器类型通信场景, 提出一种基于认知无线电 (CR) 频谱感知和非正交多址 (NOMA) 的大规模免授权随机接入方案。首先, 提出 CR-NOMA 三步免授权随机接入协议, 支持终端用户通过频谱感知获取上行信道状态信息以便有针对性地降低随机接入冲突; 然后, 设计了基于频谱感知结果的接入信道和功率电平优选策略, 建立了用户上行传输信号模型和基站接收信号模型; 最后, 提出了联合信道滤波、功率电平检测、前导和数据检测、冲突检测的多用户信号检测算法, 对随机接入性能进行了理论分析和仿真。仿真结果表明, 相比现有方案, 所提 CR-NOMA 方案在系统高负载时用户接入概率和过载率提升了近一倍, 过载能力更强, 鲁棒性更好。

关键词: 大规模免授权随机接入; 频谱感知; 非正交多址; 接入概率

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025052

Spectrum sensing and non-orthogonal multiple access based massive grant-free random access scheme

ZHANG Jing^{1,2}, MA Lin³, GAO Hongxu⁴, LU Yin^{1,2}, WU Shuoyu⁵, ZHU Hongbo^{1,2}

1. School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China
2. Jiangsu Province Key Lab of Wireless Communications and Internet of Things, Nanjing 210003, China
3. Huawei Technologies Co., Ltd. Nanjing Research Institute, Nanjing 210012, China
4. China Post Construction Technology Co., Ltd., Nanjing 210012, China
5. School of Portland, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

Abstract: A massive grant-free random access scheme based on spectrum sensing provided by cognitive radio (CR) and non-orthogonal multiple access (NOMA) was proposed for massive machine type communication scenarios. Firstly, a three-step grant-free random access protocol based on CR-NOMA was put up, which could support end users to obtain uplink channel state information through spectrum sensing so as to reduce random access conflicts in a targeted manner. Then, an access channel and power level optimization strategy according to spectrum sensing results was designed, and the uplink transmission signal model of users and reception signal model of base station were established. Finally, the multi-user signal detection algorithm with channel filtering, power level detection, preamble and data detection, as well as collision detection jointly was proposed. The performance of random access was theoretically analyzed and simulated, too. The simulation results show that, compared with existing solutions, the proposed CR-NOMA scheme has stronger overload capacity since it has nearly doubled the user access probability and overload rate under high system load. It also has better robustness.

Keywords: massive grant-free random access, spectrum sensing, non-orthogonal multiple access, access probability

收稿日期: 2024-11-26; 修回日期: 2025-03-09

通信作者: 张晶, jingzhang@njupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2020YFB1807202); 国家自然科学基金资助项目 (No.92067201); 江苏省重点研发计划基金资助项目 (No.BE2020084-1)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1807202), The National Natural Science Foundation of China (No.92067201), Key Research and Development Program of Jiangsu Province (No.BE2020084-1)

0 引言

随着物联网的飞速发展,大规模机器类型通信(mMTC, massive machine type communication)需求日益增长,旨在支持海量机器类型终端的无线连接与组网通信,以提供用户需求驱动的智能、个性化信息服务^[1-2]。作为5G移动通信系统的典型场景之一和6G移动通信系统的核心技术之一,mMTC极大地推动了制造、交通、医疗、家居等产业的智能化发展,成为“数字中国”战略的引擎。相比人-人通信,mMTC呈现出终端规模庞大、数据零星突发、上行短包传输等全新特征^[3-5],这要求无线多址技术具备全新能力:过载性能优越,单位资源承载的接入用户数足够大;支持随机接入,用户可以随时传输上行数据包;低开销轻量化,接入协议简单、接入时延低。

然而,传统的时分多址、码分多址等授权多址技术依赖基站进行接入授权,不支持随机接入。而且,授权多址受限于正交时频资源或正交扩频码的数量约束,接入承载能力有限。此外,授权多址的接入协议信令开销较大,应用于mMTC时大量信令挤占有限的上行传输资源,加剧了频谱拥塞,导致终端用户的接入成功率低、接入时延高。因此,授权多址技术难以支持大规模终端高效接入,探索面向mMTC的大规模免授权随机接入(MGFRA, massive grant-free random access)技术成为当前无线通信领域的研究重点和热点。

目前,大规模免授权随机接入研究已经开展很多^[6]。5G移动通信系统针对mMTC提出了2-Step免授权随机接入协议^[7-8]: 1) 终端发送前导和数据; 2) 基站反馈随机接入响应。该协议取消了接入授权过程,显著降低了接入时延和信令开销,终端能耗也大大降低。然而,每个终端需要从前导集合中随机选择一个前导序列执行接入竞争,选择相同前导的终端将发生接入冲突。为了降低接入冲突,文献[9]研究了基于接入类别禁止(ACB, access class barring)的随机接入方案。在该方案中,基站将ACB因子广播至小区中,活跃终端独立生成一个范围内[0,1]的随机数并将其与侦听到的ACB因子进行比较,如果随机数小于ACB因子,该终端发起随机接入;否则,该终端暂缓接入以避免接入冲突。文献[10]研究了基于业务负荷的随机退避方案,它根据网络拥塞情况确定最优退避因子以均衡

系统负荷,有效提高了终端随机接入成功率并获得了较高的上行吞吐量。文献[11]提出了一种随机功率回退方法,它在检测到前导时给终端分配一个固定功率回退值来缓解多址干扰,有效降低了终端随机接入碰撞概率。文献[12]研究了接入信道分配和流量控制联合优化问题,以解决海量终端接入导致的接入效率下降问题。

多天线的空间分集效应有助于提升MGFRA中用户传输前导的检测性能和随机接入成功率,因此结合多天线的MGFRA成为当前的研究热点。针对基于多输入多输出(MIMO, multiple input multiple output)的MGFRA中导频污染引起的接入冲突,文献[13]研究了单一正交前导(SOP, single orthogonal preamble)在多个蜂窝小区的复用策略,通过优化导频传输时间设计了一种最优的接入退避机制以提高终端接入成功率。文献[14]建立了终端业务流量的空时分布模型,在此基础上优化了终端随机退避概率,提高了上行MGFRA吞吐量。文献[15]提出基于级联正交前导(COP, concatenated orthogonal preamble)的竞争接入方案,它允许终端顺序传输多个随机选择的前导序列形成级联前导,由此扩展前导空间以降低随机接入冲突。文献[16]以文献[15]为基础,利用大规模MIMO信道准正交特性提出一种可靠的组合前导检测算法,有效提升了大规模终端随机接入成功率。然而,级联前导间通常局部非正交,这对基于相关运算的前导和数据检测带来了挑战;而且,级联前导占用多个竞争时隙,引起了频谱效率下降。为此,文献[17]提出一种大规模前导-数据叠加随机接入(mPDSRA, massive preamble-data superposition random access)方案,它允许一个终端的前导时隙与另一个终端的数据时隙重叠,支持前导和数据传输共享时频资源以提升频谱效率,但该方案要求系统具有严格的定时同步机制且所有用户数据包长度一致。

将非正交多址(NOMA, non-orthogonal multiple access)应用于MGFRA中,可以进一步提高大规模随机接入成功率和频谱效率。为此,文献[18]提出免授权非正交多址接入(GF-NOMA, grant-free non-orthogonal multiple access)框架,支持不同终端以多种功率电平在同一时频资源上随机传输上行数据,基站则采用连续干扰消除(SIC, se-

quential interference cancellation) 技术逐一恢复各功率电平承载的上行信号。由于引入了功率分集和干扰消除, 终端的接入性能获得了较大提升。考虑终端的随机分布特性, 文献[19]提出一种低复杂度分层GF-NOMA方案, 支持终端根据位置独立选择传输功率电平执行上行随机接入。借鉴级联前导的思想, 文献[20]提出一种基于多前导和NOMA的大规模免授权随机接入(MP-NOMA MGFRA, multiple preamble and NOMA based massive grant-free random access)方案, 仿真结果表明, 该方案的接入性能明显优于COP。借鉴竞争解决分集时隙ALOHA协议思想, 文献[21]提出基于多时隙导频分配(MSPA, multi-slot pilot allocation)的GF-NOMA随机接入协议, 允许终端在多个时隙上以随机选择的功率电平传输导频-数据包的多个副本, 联合时间分集和功率分集提升随机接入成功率, 但该方案系统负荷大且上行信号检测复杂度较高。文献[22]将强化学习应用于NOMA-MGFRA中优化终端功率电平选择, 有效提高了随机接入效率, 但该方案对基站算力有较高要求。

综上所述, 设计高效接入冲突避免机制是当前MGFRA研究的核心问题^[23-24], 它依赖于上行频谱资源数量及其占用状态的先验信息。然而, 免授权随机接入无须基站进行接入授权, 终端难以获知上行时频资源状态, 这导致现有MGFRA方案的性能并不理想。鉴于认知无线电(CR, cognitive radio)能够赋予用户频谱感知能力, 本文创新性地将CR技术引入NOMA-MGFRA中, 提出一种基于CR和NOMA的大规模免授权随机接入(CR-NOMA MGFRA, CR and NOMA based massive grant-free random access)方案, 它允许终端用户感知信道干扰功率水平以获取当前信道的占用状态, 据此优选上行接入信道与传输功率电平, 有针对性地降低随机接入冲突, 提高用户的接入概率。本文主要工作与创新点包括: 1)提出了一种CR-NOMA三步免授权随机接入协议, 为终端用户获取信道状态信息以避免接入冲突开辟了新思路; 2)设计了基于感知结果的接入信道与发送功率电平优选方案, 建立了用户上行发送信号模型和基站接收信号模型; 3)设计了面向CR-NOMA的上行多用户信号检测算法, 对用户接入性能进行了理论分析。仿真结果表明, 相比现有MGFRA方案, 本文所提CR-NOMA MGFRA

方案极大提升了高负荷情况下的随机接入概率和用户过载率, 且对功率电平和基站接收灵敏度的变化较不敏感, 鲁棒性更好。

1 系统模型与接入协议

1.1 系统模型

考虑图1所示的单蜂窝mMTC系统场景, 基站配备 M 根天线, N 个单天线终端用户均匀分布于小区中, 用户标号集合为 $I_a \triangleq \{1, 2, \dots, N\}$; 每个用户的单次突发业务数据长度为 v bit。系统中共有 N_c 个上行信道(频道)和 K 个长度为 J 的正交前导序列服务用户的上行随机接入, $K \leq J$ 。定义上行信道集合为 $\text{CH} \triangleq \{1, 2, \dots, N_c\}$, 前导序列集合为 $\text{SC} \triangleq \{s_1, \dots, s_k, \dots, s_K\}$, 其中 $s_k = [s_{k,1}, s_{k,2}, \dots, s_{k,J}]^T$ 表示第 k 个前导序列, $s_k \in \mathbb{C}^{J \times 1}$ 。各前导序列自相关为1且彼此正交, 即 $\forall s_k, s_p \in \text{SC}, k \neq p$, 有 $s_k^H s_p = 0, s_k^H s_k = 1$, 其中 s_k^H 表示集合SC中前导序列 s_k 的厄米向量。定义前导矩阵为 $\mathbf{S} = [s_1, \dots, s_K]^T, \mathbf{S} \in \mathbb{C}^{K \times J}$, 则有 $\mathbf{S}\mathbf{S}^H = \mathbf{I}_K$, 其中 \mathbf{S}^H 表示矩阵 \mathbf{S} 的厄米矩阵, \mathbf{I}_K 表示 K 维单位矩阵, $\mathbb{C}^{K \times J}$ 表示 K 行 J 列复数域。

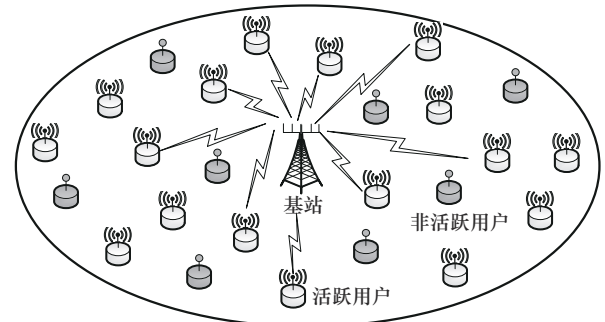


图1 系统模型

终端用户具备频谱感知能力, 每个活跃用户在接入传输前先进行频谱感知以获取信道状态信息, 上行传输帧结构如图2所示。其中, 感知时间为 τ , 传输时间为 T_d , 反馈等待时间为 T_w 。在感知时隙, 活跃用户采用宽带传感器逐一感知 N_c 个上行信道的干扰功率电平, 选择干扰功率电平最小且不高于阈值 q_{th}^c 的信道作为上行接入信道。在传输时隙, 活跃用户根据接入协议选择前导序列和发送功率电平, 以该前导对业务数据扩频后, 通过所选信道依次将前导序列和扩频业务数据传输至基站。在反馈时隙, 活跃用户等待来自

基地的接入响应消息，以便确认是否需要重传数据。

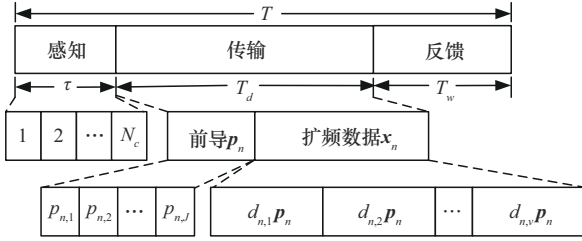


图2 上行传输帧结构

为了提高频谱利用率，系统支持用户采用多种功率电平即功率域 NOMA 传输上行信号。令用户发送功率电平集合为 $Q = \{q_1, \dots, q_l, \dots, q_L\}$ 且为基站已知， q_l 表示第 l 个功率电平， $l \in I_q$ ， $I_q \triangleq \{1, 2, \dots, L\}$ 为用户发送功率电平标号集合， L 表示最大功率标号，也等于功率电平数目； $\forall i, j \in I_q$ 且 $i < j$ ，总有 $q_i < q_j$ ，即集合 Q 中发送功率电平依升序排列。

记用户 n 感知的信道干扰功率电平集合为 $Q_n^s = \{q_{n,1}^s, \dots, q_{n,u}^s, \dots, q_{n,N_c}^s\}$ ，其中 $q_{n,u}^s$ 表示用户 n 感知的信道 u 的干扰功率电平。基于频谱感知的用户上行信道和发送功率电平优选准则设计如下。

1) 用户 n 基于当前感知结果选择干扰功率电平不高于阈值 q_{th}^c 且最小的信道 \hat{u}_n 作为上行接入信道，即最佳上行信道标号为

$$\hat{u}_n = \arg \min_{u \in CH} \{q_{n,u}^s | q_{n,u}^s \leq q_{th}^c\} \quad (1)$$

2) 用户 n 根据所选信道 \hat{u}_n 的干扰功率电平 q_{n,\hat{u}_n}^s 所属干扰区间确定上行最佳发送功率电平 $q_{l^*,n}$ ，最佳发送功率电平序号 l^* 计算式为

$$l^* = L + 1 - \arg \left\{ i | i \in I_q, q_{n,\hat{u}_n}^s \in [q_{i-1}^c, q_i^c) \right\} \quad (2)$$

其中， $[q_{i-1}^c, q_i^c)$ 表示第 i 个干扰区段， q_{i-1}^c 和 q_i^c 分别表示第 i 个干扰区段的起点和终点，计算式为

$$q_{i-1}^c = (i-1) \frac{q_{th}^c}{L}, q_i^c = i \frac{q_{th}^c}{L}, 1 \leq i \leq L \quad (3)$$

显然， $q_{l^*,n} \in Q$ 。对于 $q_{n,\hat{u}_n}^s = q_{th}$ ，补充规定 $l^* = 1$ 。

基站联合采用频带滤波、功率域 SIC、前导检测逐帧恢复上行多用户信号。基于上述准则，活跃用户所选信道的干扰功率电平越低，其上行发送功率电平越高，该用户信号在基站将被优先解调；反之，活跃用户所选信道的干扰功率电平越高，其上

行发送功率电平越低，以确保该用户的接入不会对复用该信道的其他用户造成过大干扰。

1.2 随机接入协议

根据系统模型，本文提出 CR-NOMA 免授权随机接入协议，如图 3 所示，具体步骤阐述如下。

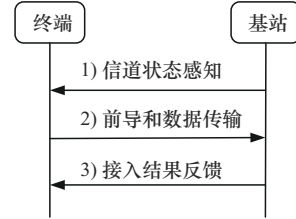


图3 CR-NOMA 免授权随机接入协议示意

1) 信道状态感知。每个活跃用户独立感知全部 N_c 个上行信道的干扰功率电平 $Q_n^s = \{q_{n,1}^s, \dots, q_{n,u}^s, \dots, q_{n,N_c}^s\}$ ，根据上行信道和发送功率优选准则选取最佳上行信道 \hat{u}_n 和发送功率电平 $q_{l^*,n}$ ，若当前所有信道上的干扰功率均高于阈值 q_{th}^c ，用户延迟一帧时间后重新尝试接入。

2) 前导和数据传输。活跃用户从前导集合 SC 中随机选择一个前导序列 s_n ，用该序列对 v bit 业务数据扩频，生成长度为 $D = vJ$ 的扩频数据序列；将扩频数据与前导序列顺序组合成一帧上行信号并调制到所选功率电平 $q_{l^*,n}$ 上，通过所选信道 \hat{u}_n 发送信号至基站。

3) 接入结果反馈。基站采用频带滤波获得不同信道上的接收信号，对其进行功率域 SIC 以检测各个功率电平信号，将检出的功率电平信号与前导矩阵进行相关运算以消除多址干扰、恢复每个功率电平承载的用户信号，进而计算用户接入冲突图样以获得竞争结果，并将竞争结果通过接入响应反馈用户。

根据上述协议，选择相同前导且功率电平相同的 2 个或 2 个以上用户必然发生接入冲突，为接入失败用户；信号能够被成功恢复的用户为接入成功用户。基站通过广播告知终端用户竞争结果，接入成功的用户继续传输或传输完成退出，接入失败的用户延迟一段时间再次进行接入尝试，直至接入成功或者等待时延超出最大限值后放弃接入。

2 上行接入传输方案

2.1 用户发送信号模型

考虑用户 n 选择信道 \hat{u}_n 作为上行接入信道，

选择功率电平 $q_{l,n}^* = q_{l,n}$ 作为发送功率电平。进一步, 令用户 n 选择第 c_n 个前导参与接入竞争, $c_n \in L_p$, $L_p \triangleq \{1, 2, \dots, K\}$ 表示前导标号集合。于是, 用户 n 的前导选择向量可表示为 $\mathbf{a}_n = [1_{[c_n=1]}, 1_{[c_n=2]}, \dots, 1_{[c_n=K]}]^T$, 其中 $1_{[x]}$ 为指示函数, 当条件 x 成立时 $1_{[x]} = 1$, 否则 $1_{[x]} = 0$ 。于是, 用户 n 发送的前导序列 \mathbf{p}_n 表示为

$$\mathbf{p}_n = \mathbf{s}_{c_n}^T = \mathbf{a}_n^T \mathbf{S} \quad (4)$$

其中, \mathbf{a}_n^T 表示向量 \mathbf{a}_n 的转置, $\mathbf{p}_n \in \mathbb{C}^{1 \times J}$, $\|\mathbf{p}_n\|^2 = 1$ 。

令 $\mathbf{d}_n = [d_{n,1}, d_{n,2}, \dots, d_{n,t}, \dots, d_{n,v}]$ 表示活跃用户 n 的业务数据, $d_{n,t} \in \{1, -1\}$; 规定静默用户的业务数据为零。利用前导 \mathbf{p}_n 对 \mathbf{d}_n 扩频, 生成扩频数据 \mathbf{x}_n 为

$$\mathbf{x}_n = [x_1, x_2, \dots, x_D] = [d_{n,1}\mathbf{p}_n, d_{n,2}\mathbf{p}_n, \dots, d_{n,v}\mathbf{p}_n] \quad (5)$$

其中, $\mathbf{x}_n \in \mathbb{C}^{1 \times D}$, $\|\mathbf{x}_n\|^2 = 1$, $D = vJ$ 。

将前导序列 \mathbf{p}_n 和扩频数据 \mathbf{x}_n 合并排列, 形成用户 n 在时域的一帧信号 \mathbf{z}_n 为

$$\mathbf{z}_n = \sqrt{q_{l,n}} [\mathbf{p}_n, \mathbf{x}_n]^T \quad (6)$$

引入 $\mathbf{u}_n = [1_{[\hat{u}_n=1]}, 1_{[\hat{u}_n=2]}, \dots, 1_{[\hat{u}_n=N_c]}]$ 作为用户 n 的接入信道选择向量, 用户 n 在时频二维空间上发送的一帧信号 \mathbf{F}_n 表示为

$$\mathbf{F}_n = \mathbf{z}_n \mathbf{u}_n = [\mathbf{f}_{n,1}, \mathbf{f}_{n,2}, \dots, \mathbf{f}_{n,N_c}] \quad (7)$$

其中, $\mathbf{f}_{n,u} = 1_{[\hat{u}_n=u]} \mathbf{z}_n \in \mathbb{C}^{(J+D) \times 1}$ 表示用户 n 在信道 u 上的传输信号向量, $\mathbf{F}_n \in \mathbb{C}^{(J+D) \times N_c}$ 。

2.2 基站接收信号分析

考虑用户至基站的上行信道为瑞利衰落联合加性白高斯噪声信道, 且在一帧时间内信道特性保持恒定。由于 N 个用户同时接入, 基站接收到的一帧信号 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{M \times (J+D)}$ 为 N 个用户的和信号, 表示为

$$\mathbf{G} = \sum_{n=1}^N \mathbf{H}_n \mathbf{F}_n^T + \mathbf{N} = \sum_{n=1}^N \sqrt{q_{l,n}} \mathbf{H}_n \mathbf{u}_n^T [\mathbf{p}_n, \mathbf{x}_n] + \mathbf{N} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{H}_n = [\mathbf{h}_{n,1}, \mathbf{h}_{n,2}, \dots, \mathbf{h}_{n,M}]^T \in \mathbb{C}^{M \times N_c}$ 表示用户 n 至基站 M 根天线在 N_c 个上行信道上的衰减系数矩阵; $\mathbf{h}_{n,m} = [h_{n,1}^m, h_{n,2}^m, \dots, h_{n,N_c}^m]^T$ 表示用户 n 至基站天线 m 在 N_c 个上行信道上的衰减系数向量, $h_{n,u}^m$ 表示用户 n 至基站天线 m 在第 u 个上行信道上的衰减系数, 它服从均值为 0、方差为 1 的高斯分布; \mathbf{N} 表示白

噪声矩阵, $\mathbf{N} \in \mathbb{C}^{M \times (J+D)}$, 其每个元素均服从均值为 0、方差为 σ^2 的高斯分布。鉴于信道准静态, 噪声 \mathbf{N} 的各列相同且信道衰减系数矩阵 \mathbf{H}_n 在一帧时间中保持恒定。假定基站天线数目 M 足够大, 信道衰减系数矩阵 \mathbf{H}_n 满足准正交特性^[25], 即

$$\frac{\mathbf{H}_n^H \mathbf{H}_{n'}}{M} \approx \begin{cases} \mathbf{I}_{N_c}, n = n' \\ 0, n \neq n' \end{cases} \quad (9)$$

其中, \mathbf{H}_n^H 表示矩阵 \mathbf{H}_n 的共轭转置矩阵。

2.3 基站接收信号滤波

根据系统模型, 用户可能接入 N_c 个上行信道中的任一信道传输数据。因此, 基站接收信号 \mathbf{G} 是一个包含 N_c 个频带的宽带信号; 对其进行 N_c 路带通滤波, 即可得到 N_c 个上行信道的接收信号。

令上行信道 u 上的接收信号为 \mathbf{G}_u , $u \in \text{CH}$, 它可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_u &= \sum_{n=1}^N 1_{[\hat{u}_n=u]} \sqrt{q_{l,n}} \mathbf{H}_n \mathbf{u}_n^T [\mathbf{p}_n, \mathbf{x}_n] + \mathbf{N}_u = \\ &= \sum_{n=1}^N 1_{[\hat{u}_n=u]} \sqrt{q_{l,n}} \bar{\mathbf{h}}_{n,u} [\mathbf{p}_n, \mathbf{x}_n] + \mathbf{N}_u = \\ &= \sum_{n \in I_a^u} \sqrt{q_{l,n}} \bar{\mathbf{h}}_{n,u} [\mathbf{p}_n, \mathbf{x}_n] + \mathbf{N}_u \end{aligned} \quad (10)$$

其中, \hat{u}_n 表示用户 n 选择的接入信道; \mathbf{N}_u 表示信道 u 上的白噪声矩阵, $\mathbf{N}_u \in \mathbb{C}^{M \times (J+D)}$, 其元素服从均值为 0、方差为 σ^2 的高斯分布; $\bar{\mathbf{h}}_{n,u} = [h_{n,u}^1, \dots, h_{n,u}^M]^T$ 表示用户 n 至基站 M 根天线在信道 u 上的瑞利衰减系数, 它是矩阵 \mathbf{H}_n 的第 u 列向量; I_a^u 表示选择信道 u 的用户集合。

令 $\bar{\mathbf{H}}_u = [\bar{\mathbf{h}}_{1,u}, \bar{\mathbf{h}}_{2,u}, \dots, \bar{\mathbf{h}}_{N,u}] \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 表示 N 个用户至基站 M 根天线在信道 u 上的衰减系数矩阵, 引入 $\bar{\mathbf{F}}_u = [\mathbf{f}_{1,u}, \mathbf{f}_{2,u}, \dots, \mathbf{f}_{N,u}]^T \in \mathbb{C}^{N \times (J+D)}$ 表示 N 个用户在信道 u 上的发送信号, 于是式(10)可改写为

$$\mathbf{G}_u = \bar{\mathbf{H}}_u \bar{\mathbf{F}}_u + \mathbf{N}_u \quad (11)$$

对于滤波输出的各频道信号, 基站进一步采用功率域 SIC 从中检测不同功率电平承载的信号, 并通过前导检测恢复不同功率电平承载的用户信号。下面详细阐述上行多用户信号检测算法。

3 上行信号检测算法

3.1 功率电平检测

根据式(10), 基站在信道 u 上接收的一帧信号 \mathbf{G}_u 可以进一步改写为

$$\mathbf{G}_u = \sum_{n=1}^N 1_{[\hat{u}_n = u]} \sqrt{q_{l,n}} \bar{\mathbf{h}}_{n,u} [\mathbf{p}_n \mathbf{x}_n] + \mathbf{N}_u = \sum_{l=1}^L \mathbf{G}_u^l + \mathbf{N}_u$$

$$\mathbf{G}_u^l = \sum_{n \in I_{a,u}^l} \sqrt{q_{l,n}} \bar{\mathbf{h}}_{n,u} [\mathbf{p}_n \mathbf{x}_n] \quad (12)$$

其中, \mathbf{G}_u^l 表示信道 u 上功率电平 q_l 承载的一帧和信号, $\mathbf{G}_u^l \in \mathbb{C}^{M \times (J+D)}$; $I_{a,u}^l$ 表示信道 u 上功率电平 q_l 承载的用户集合。

考虑不同用户的上行信道已知且彼此正交, 则矩阵 $\bar{\mathbf{H}}_u$ 具有正交特性, 即 $\bar{\mathbf{H}}_u^H \bar{\mathbf{H}}_u \approx \mathbf{M} \mathbf{I}_N$ 。假定信道衰减系数已知, 信道 u 上承载的用户 n 的信号功率可以根据式(11)表示为

$$P_{u,n} = \frac{1}{M(J+D)} \left\| [\bar{\mathbf{H}}_u^H \mathbf{G}_u](n, :) \right\|^2 \quad (13)$$

将 $P_{u,n}$ 与各功率电平比较, 即可初步获知用户 n 在信道 u 上的活跃状态及其发送功率电平, 进而获知集合 $I_{a,u}^l$ 。

基站由高到低顺序检测各功率电平 q_l 承载的信号 \mathbf{G}_u^l 。根据 SIC 原理^[18], 基站能够检测功率电平信号 \mathbf{G}_u^l 的条件是功率电平信号 $\mathbf{G}_u^l, \mathbf{G}_u^{l-1}, \dots, \mathbf{G}_u^1$ 的信干噪比 Γ_u^l 大于或等于接收机检测门限 $\bar{\Gamma}$, 即

$$\Gamma_u^k = \frac{\sum_{n \in I_{a,u}^k} \|\mathbf{G}_u^k\|^2}{\sum_{j=1}^{k-1} \sum_{n \in I_{a,u}^j} \|\mathbf{G}_u^j\|^2 + \sigma^2} = \frac{N_{u,k} q_k}{\sum_{j=1}^{k-1} N_{u,j} q_j + \sigma^2} \geq \bar{\Gamma},$$

$$k = l, l+1, \dots, L \quad (14)$$

其中, $\|\mathbf{G}_u^k\|^2$ 表示功率电平信号 \mathbf{G}_u^k 的平均功率, 计算式为

$$\|\mathbf{G}_u^k\|^2 = \frac{1}{M(J+D)} \text{Trace}((\mathbf{G}_u^k)^H \mathbf{G}_u^k) \approx N_{u,k} q_k \quad (15)$$

其中, $\text{Trace}(\cdot)$ 表示求矩阵的迹; $I_{a,u}^k$ 和 $I_{a,u}^j$ 分别表示信道 u 上功率电平 q_k 和 q_j 承载用户的集合, $q_j < q_k$; $N_{u,k}$ 和 $N_{u,j}$ 分别表示信道 u 上功率电平 q_k 和 q_j 承载用户的数目, $N_{u,k} = \|I_{a,u}^k\|_0$, $N_{u,j} = \|I_{a,u}^j\|_0$ 。

对于基站接收的上行 NOMA 信号 \mathbf{G}_u , 设计基于 SIC 的功率电平检测算法如算法 1 所示。

算法 1 基于 SIC 的功率电平检测算法

输入 滤波后的上行接收信号 $\mathbf{G}_u, u \in \text{CH}$, 当前待检测信道标号 $u = 1$, 当前待检测最大功率电平标号 $i_{\max} = L$, 从信道 u 上检出的功率电平信号集合 $Z_u = \phi$

输出 检出的功率电平信号集合 $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_{N_c}\}$, 其中 $Z_u = \{\tilde{\mathbf{G}}_u^1, \tilde{\mathbf{G}}_u^2, \dots, \tilde{\mathbf{G}}_u^L\}$

Step1 判断待检测信号 \mathbf{G}_u 中功率电平为 $q_{i_{\max}}$ 的信号 $\mathbf{G}_u^{i_{\max}}$ 是否满足式(14); 若是, 转至 Step2; 否则, 信道 u 上的功率电平信号检测失败, 转至 Step5;

Step2 从信号 \mathbf{G}_u 中检出最大功率电平 $q_{i_{\max}}$ 承载的信号 $\mathbf{G}_u^{i_{\max}}$, 检测结果记为 $\tilde{\mathbf{G}}_u^{i_{\max}}$, 更新检出的功率电平信号集合 $Z_u = Z_u + \{\tilde{\mathbf{G}}_u^{i_{\max}}\}$;

Step3 更新待检测信号 $\mathbf{G}_u = \mathbf{G}_u - \tilde{\mathbf{G}}_u^{i_{\max}}$, 最大功率电平标号 $i_{\max} = i_{\max} - 1$;

Step4 判断 $i_{\max} > 0$ 是否成立, 若是, 转至 Step1; 否则, 当前信道的功率电平信号检测结束, 集合 $Z_u = \{\tilde{\mathbf{G}}_u^1, \tilde{\mathbf{G}}_u^2, \dots, \tilde{\mathbf{G}}_u^L\}$ 为信道 u 上承载的 L 个功率电平信号的集合, 转至 Step5;

Step5 判断 $u < N_c$ 是否成立; 若是, $u = u + 1$, 转至 Step1 执行下个信道的功率电平信号检测; 否则, 所有信道上的功率电平信号均已检出, 结束。

基站从信道 u 上检出的功率电平信号 $\tilde{\mathbf{G}}_u^l$ 可以改写为 $\tilde{\mathbf{G}}_u^l = [\mathbf{Y}_u^l, \mathbf{X}_u^l]$, 其中 $\mathbf{Y}_u^l \in \mathbb{C}^{M \times J}$ 和 $\mathbf{X}_u^l \in \mathbb{C}^{M \times D}$ 分别表示信道 u 上功率电平 q_l 承载的前导信号和数据信号, 计算式为

$$\mathbf{Y}_u^l = \sum_{n \in I_{a,u}^l} \sqrt{q_{l,n}} \bar{\mathbf{h}}_{n,u} \mathbf{p}_n + \mathbf{N}_u^l = \sum_{n \in I_{a,u}^l} \mathbf{Y}_{u,n}^l \quad (16)$$

$$\mathbf{X}_u^l = \sum_{n \in I_{a,u}^l} \sqrt{q_{l,n}} \bar{\mathbf{h}}_{n,u} \mathbf{x}_n + \mathbf{N}_u^l = \sum_{n \in I_{a,u}^l} \mathbf{X}_{u,n}^l \quad (17)$$

其中, \mathbf{N}_u^l 表示残留噪声; $\mathbf{Y}_{u,n}^l$ 和 $\mathbf{X}_{u,n}^l$ 分别表示信道 u 上功率电平 q_l 承载的用户 n 的前导信号和数据信号, $\mathbf{Y}_{u,n}^l \in \mathbb{C}^{M \times J}$, $\mathbf{X}_{u,n}^l \in \mathbb{C}^{M \times D}$ 。

假设系统具有良好的定时同步机制, 基站可以从功率电平信号 $\tilde{\mathbf{G}}_u^l$ 中直接提取前导信号 \mathbf{Y}_u^l 与数据信号 \mathbf{X}_u^l , 进而检测前导信号 $\mathbf{Y}_{u,n}^l$ 并恢复数据信号 $\mathbf{X}_{u,n}^l$ 。下面阐述前导检测和数据重构方案。

3.2 前导检测和数据重构

根据式(11)和式(16), 基站在信道 u 上接收的功率电平 q_l 承载的前导信号 $\mathbf{Y}_u^l \in \mathbb{C}^{M \times J}$ 可改写为

$$\mathbf{Y}_u^l = \sum_{n \in I_{a,u}^l} \sqrt{q_{l,n}} \bar{\mathbf{h}}_{n,u} \mathbf{p}_n + \mathbf{N}_u^l = \sqrt{q_l} \bar{\mathbf{H}}_u \mathbf{U}_u \mathbf{Q}_l \mathbf{P} + \mathbf{N}_u^l = \sqrt{q_l} \bar{\mathbf{H}}_u \mathbf{A}_u^l \mathbf{P} + \mathbf{N}_u^l \quad (18)$$

其中, $\bar{\mathbf{H}}_u = [\bar{\mathbf{h}}_{1,u}, \bar{\mathbf{h}}_{2,u}, \dots, \bar{\mathbf{h}}_{N,u}] \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 表示信道 u 上 N 个用户至基站 M 根天线的衰减系数矩阵; $\mathbf{U}_u = \text{Diag} \{1_{[\hat{u}_1 = u]}, 1_{[\hat{u}_2 = u]}, \dots, 1_{[\hat{u}_N = u]}\} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示用户对信道 u 的选择关系矩阵; $\mathbf{Q}_l = \text{Diag} \{1_{[q_{l1} = q_l]},$

$1_{[q_{12}=q_l]}, \dots, 1_{[q_{LN}=q_l]}$ 表示用户对功率电平 q_l 的选择关系矩阵, $\mathbf{Q}_l \in \mathbb{C}^{N \times N}$; $\mathbf{A}_u^l = \mathbf{U}_u \mathbf{Q}_l \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示 N 个用户对信道 u 和功率电平 q_l 的联合选择矩阵; $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1^T, \mathbf{p}_2^T, \dots, \mathbf{p}_N^T]^T \in \mathbb{C}^{N \times J}$ 表示 N 个用户的发送前导矩阵。

将前导信号 \mathbf{Y}_u^l 与前导矩阵 \mathbf{S} 执行相关运算, 其结果 \mathbf{B}_u^l 为

$$\mathbf{B}_u^l = \mathbf{Y}_u^l \mathbf{S}^H = \sqrt{q_l} \bar{\mathbf{H}}_u \mathbf{A}_u^l \mathbf{P} \mathbf{S}^H + \mathbf{N}_u^l \mathbf{S}^H \quad (19)$$

令 $\mathbf{A}_u^l = \mathbf{A}_u^l \mathbf{P} \mathbf{S}^H$, $\mathbf{W}_u^l = \mathbf{N}_u^l \mathbf{S}^H$, 式(19)可简化为

$$\mathbf{B}_u^l = \sqrt{q_l} \bar{\mathbf{H}}_u \mathbf{A}_u^l + \mathbf{W}_u^l \quad (20)$$

其中, $\mathbf{A}_u^l = [\mathbf{a}_{1,u}^l, \dots, \mathbf{a}_{N,u}^l]^T$ 表示 N 个用户在信道 u 和功率电平 q_l 上的前导选择矩阵, $\mathbf{a}_{n,u}^l \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 表示用户 n 在信道 u 和功率电平 q_l 上的前导选择向量, 若 $\mathbf{a}_{n,u}^l$ 的第 k 个元素为1, 即 $\mathbf{a}_{n,u}^l(k) = 1$, 表示用户 n 在信道 u 上以功率电平 q_l 发送前导序列 \mathbf{s}_k ; \mathbf{W}_u^l 表示残留噪声矩阵, 由于 $\mathbf{S} \mathbf{S}^H = \mathbf{I}_K$, \mathbf{W}_u^l 仍服从均值为0、方差为 σ^2 的高斯分布, 即 $\mathbf{W}_u^l \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_M)$ 。

假定信道衰减系数矩阵 $\bar{\mathbf{H}}_u$ 已知, 前导选择矩阵 \mathbf{A}_u^l 的估计值 $\bar{\mathbf{A}}_u^l$ 可以表示为

$$\bar{\mathbf{A}}_u^l = \frac{1}{\sqrt{q_l} M} \bar{\mathbf{H}}_u^H (\mathbf{B}_u^l - \mathbf{W}_u^l) \quad (21)$$

其中, $\bar{\mathbf{H}}_u^H \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 表示矩阵 $\bar{\mathbf{H}}_u$ 的厄米矩阵。考虑到 $\bar{\mathbf{A}}_u^l \in \mathbb{C}^{N \times K}$ 的元素可能为非整数, 对其四舍五入取整, 得到 \mathbf{A}_u^l 的近似估计值为 $\hat{\mathbf{A}}_u^l = [\hat{\mathbf{a}}_{1,u}^l, \hat{\mathbf{a}}_{2,u}^l, \dots, \hat{\mathbf{a}}_{N,u}^l]^T$, 其中 $\hat{\mathbf{a}}_{n,u}^l$ 表示用户 n 在信道 u 和功率电平 q_l 上的前导选择向量 $\mathbf{a}_{n,u}^l$ 的估计值。

根据系统模型, 每个用户仅选择一个前导, 因此矩阵 $\hat{\mathbf{A}}_u^l$ 的任一行至多有一个元素为1, 其他元素全部为0。于是, 用户 n 在信道 u 上以功率电平 q_l 发送的前导序列标号 $c_{n,u}^l$ 的估计值 $\hat{c}_{n,u}^l$ 可以表示为

$$\hat{c}_{n,u}^l = \begin{cases} k, & \hat{\mathbf{a}}_{n,u}^l(k) = 1 \\ 0, & \hat{\mathbf{a}}_{n,u}^l(k) = 0 \end{cases} \quad (22)$$

其中, $\hat{\mathbf{a}}_{n,u}^l(k)$ 表示向量 $\hat{\mathbf{a}}_{n,u}^l$ 的第 k 个元素, $k \in I_p$, $\hat{\mathbf{a}}_{n,u}^l(k) = 1$ 表示用户 n 同时选择了信道 u 和功率电平 q_l 并以第 k 个前导 \mathbf{s}_k 执行竞争接入; $\hat{\mathbf{a}}_{n,u}^l(k) = 0$ 表示用户 n 未同时选择信道 u 和功率电平 q_l , 此时规定其在信道 u 和功率电平 q_l 传输的前导序号 $\hat{c}_{n,u}^l = 0$ 。相应地, 矩阵 \mathbf{A}_u^l 的估计值 $\hat{\mathbf{A}}_u^l$ 可以重构为

$$\hat{\mathbf{A}}_u^l = \text{Diag} \{ 1_{[\hat{c}_{1,u}^l > 0]}, 1_{[\hat{c}_{2,u}^l > 0]}, \dots, 1_{[\hat{c}_{N,u}^l > 0]} \} \quad (23)$$

由于每个用户仅选择一个信道和一个功率电平, 即有且仅有一个 $\hat{c}_{n,u}^l \neq 0$, 因此用户 n 选择的前导序号 c_n 的估计值 \hat{c}_n 可以表示为

$$\hat{c}_n = \sum_{u \in \text{CH}^l} \sum_{l \in I_q} \hat{c}_{n,u}^l \quad (24)$$

相应地, 用户 n 发送的前导序列 \mathbf{p}_n 的估计值 $\hat{\mathbf{p}}_n$ 可以表示为

$$\hat{\mathbf{p}}_n = \mathbf{s}_{\hat{c}_n}^T \quad (25)$$

全部 N 个用户发送的前导序列矩阵 \mathbf{P} 的重构为 $\hat{\mathbf{P}} = [\hat{\mathbf{p}}_1^T, \hat{\mathbf{p}}_2^T, \dots, \hat{\mathbf{p}}_N^T]^T$, $\hat{\mathbf{P}} \in \mathbb{C}^{N \times J}$ 。

类比式(18), 信道 u 上功率电平 q_l 承载的数据信号 $\mathbf{X}_u^l \in \mathbb{C}^{M \times D}$ 可以表示为

$$\mathbf{X}_u^l = \sqrt{q_l} \bar{\mathbf{H}}_u \mathbf{A}_u^l \mathbf{X} + \mathbf{N}_u^l = \sqrt{q_l} \bar{\mathbf{H}}_u \mathbf{V}_u^l + \mathbf{N}_u^l \quad (26)$$

其中, $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T, \dots, \mathbf{x}_N^T]^T \in \mathbb{C}^{N \times D}$ 表示 N 个用户的扩频信号矩阵; $\mathbf{V}_u^l = \mathbf{A}_u^l \mathbf{X}$ 表示用户在信道 u 上以功率电平 q_l 发送的扩频信号矩阵, 其估计值为 $\hat{\mathbf{V}}_u^l \in \mathbb{C}^{N \times D}$, 根据式(26)计算为

$$\hat{\mathbf{V}}_u^l = \frac{1}{M \sqrt{q_l}} \bar{\mathbf{H}}_u^H (\mathbf{X}_u^l - \mathbf{N}_u^l) \quad (27)$$

由于每个用户仅选择单一信道和单一功率电平, 用户的扩频信号矩阵 \mathbf{X} 可以估计为

$$\hat{\mathbf{X}} = \sum_{u \in \text{CH}^l} \sum_{l \in I_q} \hat{\mathbf{V}}_u^l = [\hat{\mathbf{X}}_1, \dots, \hat{\mathbf{X}}_b, \dots, \hat{\mathbf{X}}_v] \quad (28)$$

其中, $\hat{\mathbf{X}}_b = \hat{\mathbf{X}}(:, (b-1)J:bJ)$, $b = 1, 2, \dots, v$ 。

利用发送前导矩阵 $\hat{\mathbf{P}}$ 对扩频信号矩阵 $\hat{\mathbf{X}}$ 进行解扩, 即矩阵 $\hat{\mathbf{P}}$ 的每行分别与 $\hat{\mathbf{X}}_b$ 的每行执行相关运算后合并排列, 就能重构用户的业务数据矩阵为 $\hat{\mathbf{D}} = [\hat{\mathbf{d}}_1^T, \dots, \hat{\mathbf{d}}_n^T, \dots, \hat{\mathbf{d}}_N^T]^T$, 其中 $\hat{\mathbf{d}}_n = [\hat{d}_{n,1}, \hat{d}_{n,2}, \dots, \hat{d}_{n,v}]$ 表示重构的用户 n 的业务数据向量, $\hat{d}_{n,b}$ 表示重构的用户 n 的第 b 个业务数据, 即

$$\hat{d}_{n,b} = \hat{\mathbf{X}}_b(n, (b-1)J:bJ) \hat{\mathbf{p}}_n^T \quad (29)$$

3.3 接入冲突用户检测

根据系统模型, 在功率电平信号均能正常检测的前提下, 选用同一信道且使用相同功率电平和相同前导的2个或2个以上用户将发生接入冲突。

令信道 u 上功率电平 q_l 承载的用户集合为 $I_{a,u}^l = \{n_u^l\}$, n_u^l 表示为

$$n_u^l = \text{Arg} \{n \mid \|\mathbf{a}_{n,u}^l\|_0 = 1, n \in I_a\}, l \in I_q, u \in \text{CH} \quad (30)$$

其中, 函数 Arg 表示取标号函数; $\|\mathbf{a}_{n,u}^l\|_0$ 表示向量 $\mathbf{a}_{n,u}^l$ 的 0-范数, 即向量 $\mathbf{a}_{n,u}^l$ 中非零元素的个数。很显然, 处于同一集合 $I_{a,u}^l$ 中的用户才可能发生接入冲突, 且冲突用户的前导选择向量 $\mathbf{a}_{n,u}^l$ 必相同。

因此, 定义用户 n, n' 在信道 u 和功率电平 q_l 上的导频冲突图样 $\mathbf{E}_{u,l}(n, n')$ 为用户前导选择向量 $\mathbf{a}_{n,u}^l$ 和 $\mathbf{a}_{n',u}^l$ 的乘积, 即

$$\mathbf{E}_{u,l}(n, n') = (\mathbf{a}_{n,u}^l)^T \mathbf{a}_{n',u}^l, n, n' \in I_{a,u}^l, n \neq n' \quad (31)$$

根据式(31), 若集合 $I_{a,u}^l$ 中的 2 个用户 n, n' 选择相同前导, 则 $\mathbf{E}_{u,l}(n, n') = 1$; 否则, $\mathbf{E}_{u,l}(n, n') = 0$ 。于是, 设计如下的用户接入冲突判断方法。

$$\forall n, n' \in I_{a,u}^l, n \neq n', l \in I_q, u \in \text{CH}$$

1) 若 $\mathbf{E}_{u,l}(n, n') = 1$, 用户 n, n' 发生接入冲突, 二者均竞争接入失败。

2) 若 $\mathbf{E}_{u,l}(n, n') = 0$, 用户 n, n' 未发生接入冲突, 二者均竞争接入成功。

需要说明的是, 基站仅能通过式(21)获知用户 n 和 n' 的前导选择向量的估计值 $\hat{\mathbf{a}}_{n,u}^l$ 和 $\hat{\mathbf{a}}_{n',u}^l$, 进而通过式(31)得到导频冲突图样 $\mathbf{E}_{u,l}(n, n')$ 的估计值 $\hat{\mathbf{E}}_{u,l}(n, n')$ 。因此, 式(31)中 $\mathbf{a}_{n,u}^l$ 和 $\mathbf{a}_{n',u}^l$ 分别可用 $\hat{\mathbf{a}}_{n,u}^l$ 和 $\hat{\mathbf{a}}_{n',u}^l$ 代替, 结果 $\mathbf{E}_{u,l}(n, n')$ 可用 $\hat{\mathbf{E}}_{u,l}(n, n')$ 代替。遍历全部用户集合 $I_{a,u}^l$, 即可获知所有用户的接入结果。

对于接入成功的用户, 基站继续解调其数据信号并反馈“接入成功”消息给用户; 对于接入失败的用户, 基站反馈“接入失败”消息给用户并通知其延迟一段时间尝试再接入。

综上, 大规模用户免授权随机接入信号联合检测算法如算法 2 所示。

算法 2 上行多用户信号联合检测算法

输入 上行接收信号 \mathbf{G} , 前导矩阵 \mathbf{S} , 用户数量 N , 信道数量 N_c , 功率电平数量 L ; 接入成功用户集合 $\text{ASU} = \emptyset$, 接入失败用户集合 $\text{AFU} = \emptyset$

输出 重构的上行信号 $\hat{\mathbf{d}}_n = [\hat{d}_{n,1}, \hat{d}_{n,2}, \dots, \hat{d}_{n,v}]$; 接入成功用户集合 ASU ; 接入失败用户集合 AFU

Step1 通过频带滤波获得每个上行信道上的接收信号 \mathbf{G}_u , $u \in \text{CH}$;

Step2 利用算法 1 获得各功率电平承载信号的估计值 $\tilde{\mathbf{G}}_u^l$, $u \in \text{CH}, l \in I_q$;

Step3 对于非零的 $\tilde{\mathbf{G}}_u^l$, 检测其承载的前导序列和数据序列并识别接入冲突;

for $u = 1:N_c$

for $l = 1:L$

将接收信号 $\tilde{\mathbf{G}}_u^l$ 分解为 $\tilde{\mathbf{G}}_u^l = [\mathbf{Y}_u^l, \mathbf{X}_u^l]$, 其中 \mathbf{Y}_u^l 为前导信号, \mathbf{X}_u^l 为数据信号; 利用式(18)~式(21)计算用户前导选择矩阵的估计值 $\bar{\mathbf{A}}_u^l$, 对其元素四舍五入取整, 得到 $\bar{\mathbf{A}}_u^l$ 的近似估计值 $\hat{\mathbf{A}}_u^l = [\hat{\mathbf{a}}_{1,u}^l, \hat{\mathbf{a}}_{2,u}^l, \dots, \hat{\mathbf{a}}_{N,u}^l]^T$;

for $n = 1:N$

利用式(22)估计用户 n 在信道 u 和功率电平 q_l 上发送前导的标号 $\hat{c}_{n,u}^l$;

end for;

利用式(23)估计用户对信道 u 和功率电平 q_l 的联合选择矩阵 $\hat{\mathbf{A}}_u^l$;

利用式(26)和式(27)估计信道 u 上以功率电平 q_l 传输的扩频信号 $\hat{\mathbf{V}}_u^l$;

end for;

end for;

利用式(28)计算用户数据矩阵估计值 $\hat{\mathbf{X}}$;

for $n = 1:N$

利用式(24)和式(25)估计用户 n 选择的前导序号 \hat{c}_n 和发送前导序列 $\hat{\mathbf{p}}_n$;

for $b = 1:v$

利用式(29)重构用户 n 的第 b 个业务数据 $\hat{d}_{n,b}$;

end for;

重构用户 n 的业务数据向量 $\hat{\mathbf{d}}_n = [\hat{d}_{n,1}, \hat{d}_{n,2}, \dots, \hat{d}_{n,v}]$;

end for;

Step4 估计用户接入冲突;

for $u = 1:N_c$

for $l = 1:L$

根据式(30)计算信道 u 上功率电平 q_l 承载的用户集合 $I_{a,u}^l = \{n_u^l\}$;

if $\|\hat{\mathbf{I}}_{a,u}^l\|_0 \geq 2$

根据式(31)计算 $\hat{\mathbf{I}}_{a,u}^l$ 中任意 2 个用户 n 和 n' 的导频冲突图样估计值

$\hat{E}_{u,l}(n,n')$;

若 $\hat{E}_{u,l}(n,n') \geq 1$, 用户 n 和 n' 发生碰撞, 接入失败, n 和 n' 进入集合 AFU 中;

否则, 用户 n 和用户 n' 接入成功, n 和 n' 进入集合 ASU 中;

else

集合 $\hat{I}_{a,u}^l$ 中的用户接入成功, $\hat{I}_{a,u}^l$ 中所有用户标号均进入集合 ASU。

end if

end for

end for

3.4 接入性能分析

定义用户接入概率为用户上行信号在基站处被成功解码的概率。它取决于3个因素: 1) 用户成功获取接入信道的概率; 2) 用户所选功率电平被成功检测的概率; 3) 用户所选信道和所选功率电平上使用唯一前导的概率。下面从这3个方面分析用户接入概率。

1) 用户成功获取接入信道的概率

根据系统模型, 当用户 n 感知到至少一个信道的干扰功率电平不高于干扰阈值 q_{th}^c 时, 它能够获得接入信道。因此, 用户 n 成功获取接入信道的概率 P_{ch} 为

$$P_{ch} = 1 - \prod_{u=1}^{N_c} \Pr(q_{n,u}^s > q_{th}^c) \quad (32)$$

其中, $\Pr(q_{n,u}^s > q_{th}^c)$ 表示用户 n 感知到信道 u 的干扰功率电平 $q_{n,u}^s$ 超过干扰阈值 q_{th}^c 的概率。根据系统模型, 一旦接入信道选定, 用户的上行功率电平就可以根据信道干扰功率直接确定。

2) 用户所选功率电平被正确检测的概率

不妨令用户 n 选择信道 u 和功率电平 q_l 执行随机接入。由于基站由高到低顺序检测各功率电平信号, 若第 l 个功率电平 q_l 信号能够成功检测, 第 $l+1$ 到 L 个功率电平信号均需成功检测。因此, 信道 u 上功率电平 q_l 承载的信号能够成功检测的概率 $P_{SIC,u}^l$ 为

$$P_{SIC,u}^l = \prod_{i=l}^L \Pr(\Gamma_u^i \geq \bar{\Gamma}) \quad (33)$$

其中, $\Pr(\Gamma_u^i \geq \bar{\Gamma})$ 表示信道 u 上第 i 个功率电平 q_i 能够成功检测的概率。

3) 用户所选信道和功率电平上使用唯一前导的概率

不妨令用户 n 选择了信道 u 和功率电平 q_l , 即 $n \in I_{a,u}^l$ 。若集合 $I_{a,u}^l$ 中的元素个数为 $N_{u,l}$, 即选择信道 u 和功率电平 q_l 的用户数为 $N_{u,l}$, 用户 n 在信道 u 和功率电平 q_l 上选择不冲突前导的概率 $P_{prea,u}^l$ 为

$$P_{prea,u}^l = \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{N_{u,l}-1} \quad (34)$$

其中, K 表示正交前导序列的数目。

综上, 用户 n 在信道 u 和功率电平 q_l 上的条件接入概率 $\Pr_{Acc,u}^l$ 为

$$\Pr_{Acc,u}^l = P_{ch} P_{SIC,u}^l P_{prea,u}^l = P_{ch} \prod_{i=l}^L \Pr(\Gamma_u^i \geq \bar{\Gamma}) \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{N_{u,l}-1} \quad (35)$$

考虑所有信道地位均等且信道干扰功率服从均匀分布, 则用户 n 选择任一信道 u 的概率相同, 选择任一功率电平 q_l 的概率也相同。于是, 用户 n 对信道 u 和功率电平 q_l 的联合选择概率 $p_{u,l}$ 为

$$p_{u,l} = \frac{1}{N_c L} \quad (36)$$

进一步地, 选择信道 u 和功率电平 q_l 的用户数为 $N_{u,l}$, $0 \leq N_{u,l} \leq N$ 的概率分布为

$$\Pr(N_{u,l}) = C_N^{N_{u,l}} (p_{u,l})^{N_{u,l}} (1 - p_{u,l})^{N - N_{u,l}} \quad (37)$$

对条件接入概率 $\Pr_{Acc,u}^l$ 关于 $N_{u,l}$ 求统计平均, 得到用户的平均接入概率 \Pr_{succ} 为

$$\Pr_{succ} = E[\Pr_{Acc,u}^l] = \sum_{N_{u,l}=1}^N \sum_{u=1}^{N_c} \sum_{l=1}^L \Pr_{Acc,u}^l \Pr(N_{u,l}) p_{u,l} = \sum_{N_{u,l}=1}^N \sum_{u=1}^{N_c} \sum_{l=1}^L \frac{\Pr(N_{u,l}) P_{ch}}{N_c L} \prod_{i=l}^L \Pr(\Gamma_u^i \geq \bar{\Gamma}) \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{N_{u,l}-1} \quad (38)$$

值得说明的是, 用户的接入概率在统计意义上等同于成功接入用户数与活跃用户总数的比值。

4 仿真分析

考虑瑞利衰落信道, 本节基于 MATLAB 软件仿真研究 CR-NOMA 免授权随机接入方案的性能, 同时与文献[13]的单一前导 (SOP)、文献[15]的级联前导 (COP)、文献[18]的免授权 NOMA (GF-NOMA) 以及文献[20]的多前导 NOMA (MP-NOMA) 等 MGFRA 方案进行比较。鉴于 MP-

NOMA 方案的性能总体优于 SOP、COP 和 GF-NOMA 方案，本文重点比较 CR-NOMA 与 MP-NOMA 这 2 种 MGFRA 方案。除特别说明外，仿真参数设置如表 1 所示，接入过载率定义为用户数与前导数之比^[15]，即 $\frac{N}{K}$ 。规定无活跃用户时接入概率为 0，仿真结果为 500 次随机实验的平均值。

表 1 仿真参数设置

仿真参数	参数取值
基站天线数目 M	8
上行信道数目 N_c	4
终端用户数目 N	30
终端数据包长 v/bit	8
调制方式	QPSK
前导类型	Walsh 序列
前导数目 K	8
前导长度 J	8
发射功率电平集合 Q_r/mW	{1, 3, 5}
信道噪声方差 σ^2	1
感知干扰功率电平 $q_{n,u}^s/\text{mW}$	[0,5]均匀分布
信道噪声门限 q_{th}^c/mW	3
基站接收灵敏度 $\bar{\Gamma}/\text{dB}$	-10
级联前导数目 N_p	4

图 4 描绘了不同前导数目下终端用户接入概率与用户数目的关系曲线。从图 4 可以看到，随着用户数目逐渐增加，本文所提 CR-NOMA 方案的接入概率先快速上升而后缓慢下降，存在一个特定用户数目，即最佳系统负荷使用户接入概率达到最大；前导数目增加，用户接入概率上升，最佳系统负荷也增大，用户增加引起的接入概率下降速度随之变慢。SOP、COP 和 MP-NOMA 方案具有类似变化规律，但 SOP、COP 在用户数目增加时接入概率下降得极其迅速，而 MP-NOMA 方案接入概率的变化趋势与 CR-NOMA 方案接近。尽管 CR-NOMA 方案的最佳系统负荷略低于 MP-NOMA 方案，但其接入概率在用户快速增长时的下降速度明显更慢，因此在高系统负荷时所

支持的用户接入概率更高。例如，给定前导数目 $K=16$ ，当系统负荷超过 40 个用户时，CR-NOMA 方案的接入概率才略微高于 MP-NOMA 方案。将前导数目减少为 $K=8$ ，当系统负荷超过 12 个用户时，CR-NOMA 方案的接入概率已经高于 MP-NOMA 方案；当系统负荷达到 50 个用户即过载率^[15] $\frac{N}{K}=3.125$ 时，MP-NOMA 方案的接入概率已经降至 0.25，但 CR-NOMA 方案的接入概率依然达到 0.50，提升了近 1 倍。这表明，CR-NOMA 方案在高负载情况下的接入概率有了明显提升，且前导资源越少，其性能优势越明显。

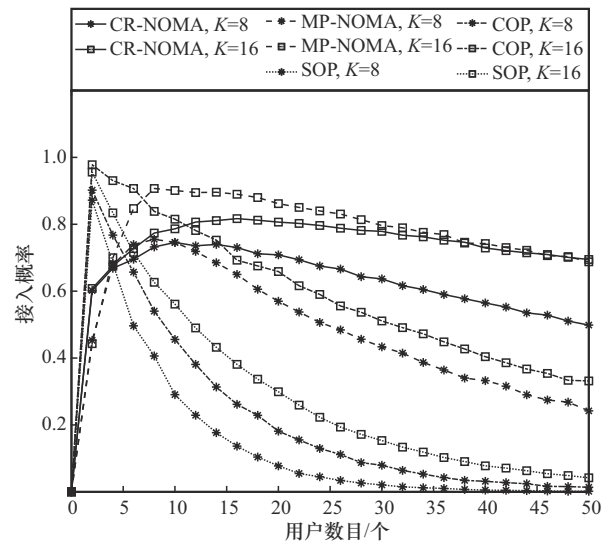


图 4 不同前导数目下终端用户接入概率与用户数目的关系曲线

图 5 展示了信道和用户数目对用户接入概率的影响。为保证资源公平，当 CR-NOMA 方案的感知信道数目 N_c 发生变化时，COP 和 MP-NOMA 方案的级联前导数目 N_p 同步变化。从图 5 可以看到，增加感知信道数目，CR-NOMA 方案的接入概率随之增大，但用户接入概率峰值都出现在系统负荷为 10 个用户即过载率 $\frac{N}{K}=1.5$ 处，这表明上行信道数目不影响最佳系统负荷。COP 和 MP-NOMA 方案的接入概率在级联前导数目变化时具有类似结论。当过载率超过 2，COP 方案的接入概率低于 CR-NOMA 和 MP-NOMA 方案；本文所提 CR-NOMA 方案在上行信道数目较少时性能优于 MP-NOMA 方案，且随着用户数目的增加其接入性能优势更明显。例如，给定 $N_c=N_p=4$ 和目标接入概率 0.6，MP-NOMA 方案的系统负荷仅为

28 个用户，即过载率为 $\frac{28}{8}=2.25$ ；CR-NOMA 方案的系统负荷为 34 个用户，过载率为 $\frac{34}{8}=4.25$ ，过载率提升了近 1 倍。这表明，本文所提方案在资源受限情况下的过载接入性能有了明显提升，这意味着多信道感知对提升随机接入性能十分有利。

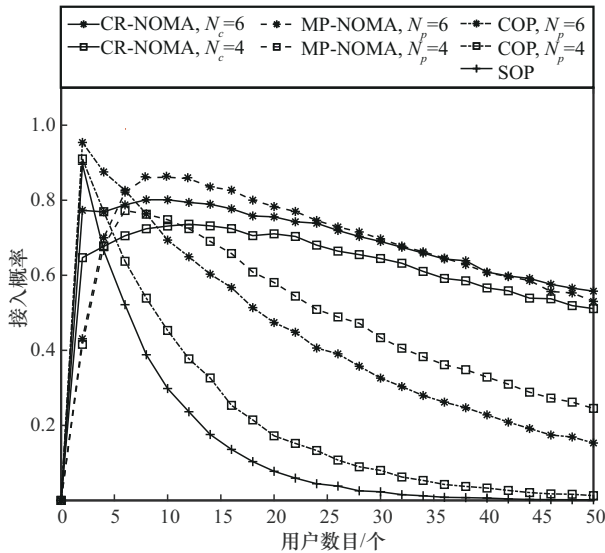


图5 信道和用户数目对用户接入概率的影响

图6研究了发送功率电平数目对用户接入概率的影响。从图6可以看到，发送功率电平数目 L 对用户接入概率的影响并非单调的。对于CR-NOMA方案，当系统负荷小于7个用户时，单一功率电平传输的接入性能最佳；当系统负荷大于25个用户时，多功率电平的优势凸显，功率电平越多，用户接入概率越大，系统过载能力越好。MP-NOMA和GF-NOMA方案存在类似结论。对于给定的功率电平集合，CR-NOMA方案的接入概率最高，MP-NOMA方案次之，GF-NOMA方案最低。例如，给定 $L=3$ ，系统负荷为50个用户时，MP-NOMA方案的接入概率降至0.25，此时CR-NOMA方案的接入概率仍有0.50，接入概率提升了1倍。给定 $L=3$ 和目标接入概率0.6，MP-NOMA方案的系统负荷为19个用户，即过载率为 $\frac{19}{8}=2.375$ ；此时CR-NOMA方案的系统负荷为35个用户，即过载率为 $\frac{35}{8}=4.375$ ，过载率提升了近1倍。这意味着根据负荷调整发送功率电平数目有助于提升随机接入性能。

此外，相比MP-NOMA方案，CR-NOMA方案对功率电平数目变化的敏感性略低，即鲁棒性更好。

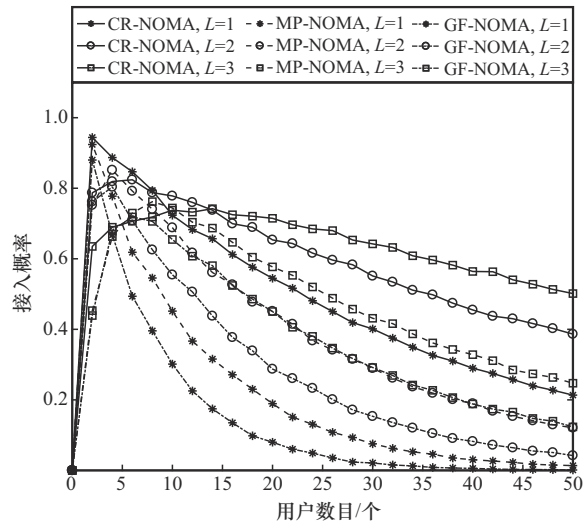


图6 发送功率电平数目对用户接入概率的影响

图7研究了用户接入概率与基站接收灵敏度的关系。从图7可以看到，无论是采用CR-NOMA、MP-NOMA还是GF-NOMA方案，随着基站接收灵敏度增大，用户接入概率均呈现明显的阶跃效应，即存在一个灵敏度门限使用户接入概率迅速下降。就CR-NOMA方案而言，当基站接收灵敏度小于-5 dB时，用户接入概率恒定；当接收灵敏度大于0 dB时，用户接入概率迅速下降。MP-NOMA和GF-NOMA方案存在类似结论，但门限值有所下降，均为-5 dB。这表明CR-NOMA方案对基站接收灵敏度要求最低。当基站接收灵敏度超过门限值后，CR-NOMA方案接入概率下降最缓慢，GF-NOMA方案次之，MP-NOMA方案下降最快，这表明CR-NOMA方案对接收灵敏度的变化相对不敏感。给定30个活跃用户，当基站接收灵敏度为10 dB时，MP-NOMA和GF-NOMA方案的接入概率为0，而CR-NOMA方案的接入概率仍有0.35。因此，本文所提CR-NOMA方案对基站接收灵敏度要求更低。

综上所述，本文提出的CR-NOMA大规模免授权随机接入方案具有更好的随机接入性能，在高负载情况下的用户接入概率更高，过载率更大，上行信号检测的鲁棒性更好。

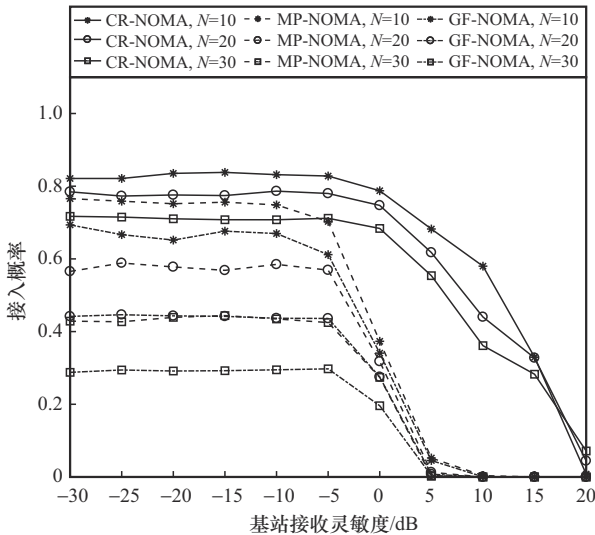


图7 用户接入概率与基站接收灵敏度的关系

5 结束语

本文针对大规模终端上行传输场景，提出了一种基于CR-NOMA的免授权随机接入方案，并详细阐述了多用户上行传输协议与上行信号接收检测算法。该方案支持终端用户通过信道感知获取信道状态信息，据此优选上行信道，降低接入冲突；通过非正交多址提高频谱利用率，基于感知结果优选发送功率电平，进一步提高用户接入概率。基站依次通过信道滤波、功率电平检测、前导与数据检测、冲突检测4个步骤消除多址干扰、重构上行信号，并向终端用户反馈接入结果，由此完成免授权大规模随机接入。仿真结果表明，相比现有MGFRA方案，本文所提CR-NOMA MGFRA方案的接入性能有了明显提升，在高负载情况下用户接入概率和过载率提升了近1倍，过载接入能力更强；并且该方案对发送功率电平变化的敏感性相对较低，而支持的基站接收灵敏度门限值更高，鲁棒性更好。

参考文献:

- [1] 赛迪智库电子信息研究所. 5G终端产业白皮书(2019年)[R]. 赛迪智库, 2019.
China Center for Information Industry Development (CCID). White paper on 5G terminal industry (2019)[R]. CCID Think Tank, 2019.
- [2] 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.
- [3] BOCKELMANN C, PRATAS N, NIKOPOUR H, et al. Massive machine-

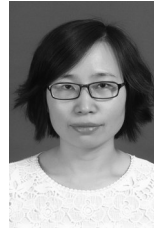
type communications in 5G: physical and MAC-layer solutions[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(9): 59-65.

- [4] MEHMETI F, LA PORTA T F. Modeling and analysis of mMTC traffic in 5G base stations[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 652-660.
- [5] ZHANG Z Q, XIAO Y, MA Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 28-41.
- [6] 肖玉可. 大规模机器通信中随机接入技术的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
XIAO Y K. Research on random access technology in large-scale machine communication[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [7] ZHAN W, SUN X H, WANG X J, et al. Performance optimization for massive random access of mMTC in cellular networks with preamble retransmission limit[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(9): 8854-8867.
- [8] DING J, QU D M, JIANG H, et al. Success probability of grant-free random access with massive MIMO[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(1): 506-516.
- [9] LIEN S Y, LIAU T H, KAO C Y, et al. Cooperative access class barring for machine-to-machine communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(1): 27-32.
- [10] LIN G Y, CHANG S R, WEI H Y. Estimation and adaptation for bursty LTE random access[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 2560-2577.
- [11] PIAO Y J, KIM Y, LEE T J. Random power back-off for random access in 5G networks[J]. IEEE Access, 2021, 9: 121561-121569.
- [12] OH C Y, HWANG D, LEE T J. Joint access control and resource allocation for concurrent and massive access of M2M devices[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(8): 4182-4192.
- [13] ZHANG Q, ZHANG J, JIN S. Grant-free random access in pilot-reused multicell massive MIMO systems with backoff mechanisms[J]. China Communications, 2023, 20(9): 185-195.
- [14] XIA Y W, ZHANG Q, YANG H H, et al. On the grant-free random access in multicell massive MIMO systems: spatiotemporal modeling and backoff scheme optimization[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(14): 12508-12520.
- [15] JIANG H, QU D M, DING J, et al. Multiple preambles for high success rate of grant-free random access with massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(10): 4779-4789.
- [16] CHOI J. An approach to preamble collision reduction in grant-free random access with massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(3): 1557-1566.
- [17] DING J, CHOI J. Preamble-data superposition random access in massive MIMO systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(6): 906-910.
- [18] SHAHAB M B, ABBAS R, SHIRVANIMOGHADDAM M, et al. Grant-free non-orthogonal multiple access for IoT: a survey[J]. IEEE

Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(3): 1805-1838.

- [19] JIANG H, CUI Q M, GU Y, et al. Distributed layered grant-free non-orthogonal multiple access for massive MTC[C]//Proceedings of the 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). New York: ACM Press, 2018: 1-7.
- [20] 王靖文, 张晶, 梁楚龙. 基于多功率电平-多前导的mMTC免授权随机接入方案[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(8): 2606-2614.
WANG J W, ZHANG J, LIANG C L. Grant-free random access scheme for mMTC based on multi-power level and multi-preamble[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(8): 2606-2614.
- [21] JIAO J, XU L, WU S H, et al. MSPA: multislot pilot allocation random access protocol for mMTC-enabled IoT system[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(24): 17403-17416.
- [22] JANG H S, JUNG B C, QUEK T Q S, et al. Resource-hopping-based grant-free multiple access for 6G-enabled massive IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(20): 15349-15360.
- [23] ZHANG J Z, TAO X F, WU H C, et al. Deep reinforcement learning for throughput improvement of the uplink grant-free NOMA system[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(7): 6369-6379.
- [24] CIRIK A C, BALASUBRAMANYA N M, LAMPE L, et al. Toward the standardization of grant-free operation and the associated NOMA strategies in 3GPP[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2019, 3(4): 60-66.
- [25] DING J, CHOI J. Comparison of preamble structures for grant-free random access in massive MIMO systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(2): 166-170.

[作者简介]



张晶 (1980-), 女, 湖北襄阳人, 博士, 南京邮电大学副教授, 主要研究方向为移动通信、物联网、无线资源管理、认知无线电等。



马林 (1997-), 男, 山西大同人, 华为技术有限公司工程师, 主要研究方向为无线通信、大规模随机多址、压缩感知技术等。

高宏旭 (1979-), 男, 黑龙江伊春人, 中邮建技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为物联网、云计算等。

陆音 (1970-), 男, 江苏南京人, 博士, 南京邮电大学教授, 主要研究方向为无线通信、无线定位、物联网等。

吴烁雨 (2001-), 女, 江苏无锡人, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为6G移动通信、大规模接入等。

朱洪波 (1956-), 男, 江苏扬州人, 博士, 南京邮电大学教授, 主要研究方向为无线通信、物联网等。