

# 共享码本随机接入 有限块长信息理论极限分析



## Fundamental Limits of Massive Random Access with A Common Codebook and Finite Blocklength

高俊园/GAO Junyuan, 吴泳澎/WU Yongpeng,  
张文军/ZHANG Wenjun

(上海交通大学, 中国 上海 200240)  
(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202401008

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20240226.1131.006.html>

网络出版日期: 2024-02-26

收稿日期: 2024-01-08

**摘要:** 超大规模机器通信 (umMTC) 是 6G 移动通信网络的典型应用场景。针对 umMTC 场景中的共享码本随机接入问题展开信息理论研究, 在给定基站天线数、码长、用户载荷和发送功率的情况下, 推导了平均每用户误差概率的非渐近可达界和逆定理。仿真结果证实了可达界和逆定理的紧致性, 并且证明了当用户数低于某一门限时存在多用户干扰消除效应。基站配置多天线能够显著降低平均每用户误差概率, 这对支持大量用户可靠接入具有重要意义。此外, 与独立码本随机接入相比, 共享码本随机接入在能效性方面更具优势。

**关键词:** 共享码本; 大规模随机接入; 有限块长; 可达界和逆定理

**Abstract:** Ultra-massive Machine Type Communication (umMTC) is expected to be a key use case in the 6th Generation wireless networks. The information-theoretical analysis for unsourced random access in umMTC scenarios is conducted. Thenon-asymptotic achievability and converse bounds are established on the per-user probability of error for given number of receive antennas, blocklength, payload size, and transmitting power. Simulation results verify the tightness of our bounds and demonstrate that when the number of users is below a threshold, the multi-user interference can be almost perfectly canceled. The per-user probability of error decreases as the number of receive antennas increases, highlighting the crucial role of MIMO in supporting reliable access for a large number of users. Moreover, it is shown that in contrast to random access with individual codebooks, random access with a common codebook achieves higher energy efficiency.

**Keywords:** common codebook; massive random access; finite blocklength; achievability and converse bounds

**引用格式:** 高俊园, 吴泳澎, 张文军. 共享码本随机接入有限块长信息理论极限分析 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(1): 41-45. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401008

**Citation:** GAO J Y, WU Y P, ZHANG W J. Fundamental limits of massive random access with a common codebook and finite blocklength [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(1): 41-45. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401008

随着物联网 (IoT) 的迅猛发展, 移动数据流量和物联网设备连接数量呈现出快速增长的趋势。IMT-2030 (6G) 推进组在《6G 典型场景和关键能力》白皮书中, 将超大规模机器通信 (umMTC) 列为 6G 的五大典型场景之一。与传统的多用户接入模型相比, 面向 umMTC 的大规模随机接入场景具有下述 4 个典型特点:

1) 海量的用户与设备接入。网络中有海量的潜在设备

是大规模随机接入场景最显著的特点。6G 关键性能指标为实现每平方千米 1 000 万设备的连接数密度。

2) 设备零星活跃进行数据传输。在 IoT 应用场景中, 数据的传输通常不具有连续性, 同一时刻只有零星的设备被激活进行数据传输。

3) 设备传输的数据量较小。在 umMTC 场景中, 终端通常为警报器、传感器等设备。当这些设备活跃时, 传输的多为传感信息以及控制信息等小数据包。

4) 设备具有低功耗需求。在 umMTC 场景中, 终端设备一般具有小型化和低成本的特点。例如, 在环境监测等应用场景中, 传感器往往部署于山区、深水等复杂环境中, 因

**基金项目:** 国家重点研发计划 (2018YFB1801102); 国家自然科学基金项目 (62122052、62071289); 中央高校基本科研业务费专项资金项目; 高等学校学科创新引智计划 (BP0719010); 上海市自然科学基金项目 (22DZ2229005)

此,设备通常具有较高的低功耗需求,从而保证超长的供电寿命以避免频繁的电池更换。

上述大规模随机接入场景的特点给现有移动通信系统的设计带来巨大的挑战。为此,全球学者针对大规模随机接入传输理论方法展开了深入研究。根据发送端码本的分配情况,随机接入可分为独立码本随机接入和共享码本随机接入两大类。在独立码本随机接入场景中,每个用户有一个独一无二的码本,接收端可以根据码本信息恢复出用户标识。共享码本随机接入由美国麻省理工大学的Y. POLYANSKIY教授于2017年提出<sup>[1]</sup>。当所有用户共享同一个码本时,可能会有码字冲突,但不需要为每个用户设计和分配独立的码本,这样可以避免资源浪费。在这种情况下,接收端只需要检测发送的码字集合,而不需要还原用户的标识。由于搜索的码字空间更小,因此可以实现比独立码本随机接入更高的频谱利用效率。如果需要的话,用户可以通过发送的信息来承载该用户的标识。接收端在恢复码字集合后,就可以根据承载的信息识别用户身份。

考虑到共享码本随机接入在避免码本分配资源损耗以及提升频谱利用效率方面的优势,针对该场景展开信息理论研究对于揭示umMTC场景的理论极限具有重要意义。假设活跃用户数已知,文献[1]针对加性高斯白噪声(AWGN)信道,推导了用户共享码本随机接入时平均每用户误差概率(PUPE)的非渐近可达界。针对信道状态信息未知的单天线瑞利衰落信道模型,文献[2]和[3]基于PUPE准则,推导了为支持每个活跃用户可靠传输 $J$ 比特信息所需每比特能量的非渐近可达界和逆定理。文献[4]进一步考虑了活跃用户数未知的情况,定义了基于平均每用户漏检概率和虚警概率约束的大规模随机接入码,并推导了AWGN信道中共享码本随机接入时的非渐近可达界。在码长 $n$ 趋于无穷的渐近情况下,文献[5]针对AWGN信道中的共享码本随机接入问题,推导了可支持的活跃用户数的渐近标度律。

此外,多输入多输出(MIMO)技术通过配置大量天线来同时服务多个用户,能够显著提升共享码本随机接入的频谱利用效率,进一步增强网络覆盖和系统容量。具体地,假设活跃用户数事先已知但信道状态信息未知,在码长 $n$ 和基站天线数 $L$ 趋于无穷的渐近情况下,文献[6]证明频谱利用效率的数量级能够达到 $O(n \ln n)$ ;当采用级联编码降低译码复杂度后,频谱利用效率的数量级可达 $O(n/\ln n)$ 。考虑到MIMO技术能够显著提升系统的频谱利用效率,探索MIMO信道中共享码本随机接入的信息理论极限对万物互联有着重要意义。

## 1 系统模型

考虑一般性的上行共享码本大规模随机接入系统,系统中的总用户数为 $K$ ,其中活跃用户数为 $K_a$ ,活跃用户集合记为 $\mathcal{K}_a$ 。假设所有用户共享同一个码本,该码本包含 $M = 2^J$ 个长度为 $n$ 的码字,将码本矩阵记为 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_M] \in \mathbb{C}^{n \times M}$ 。每个码字满足最大功率约束,即码字总能量不超过 $nP$ 。令 $S_e = \frac{K_a J}{n}$ 表示频谱利用效率, $E_b = \frac{nP}{J}$ 表示每比特能量。

考虑MIMO准静态瑞利衰落信道模型,基站配置的天线数为 $L$ ,用户配置单天线。假设信道状态信息未知,即接收端不知道信道衰落系数但知道其分布。基站第 $l$ 个天线的接收信号可表示为:

$$\mathbf{y}_l = \sum_{k \in \mathcal{K}_a} h_{k,l} \mathbf{x}_{w_k} + \mathbf{z}_l \in \mathbb{C}^n, \quad (1)$$

其中, $h_{k,l} \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 表示用户 $k$ 和基站第 $l$ 个接收天线之间的信道衰落系数,不同的用户和不同的接收天线之间的信道衰落系数满足独立同分布; $\mathbf{z}_l \sim \mathcal{CN}(0, \mathbf{I}_n)$ 表示加性高斯白噪声; $w_k$ 表示活跃用户 $k$ 发送的信息,在集合 $[M]$ 中服从均匀分布,对应的码字记为 $\mathbf{x}_{w_k}$ 。 $L$ 个天线上的接收信号 $\mathbf{Y} = [\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_L]$ 可表示为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} \Phi \mathbf{H} + \mathbf{Z} \in \mathbb{C}^{n \times L}, \quad (2)$$

其中,信道系数矩阵 $\mathbf{H} = [h_1, \dots, h_L] \in \mathbb{C}^{K \times L}$ ,对于任意 $l \in [L]$ , $h_l = [h_{1,l}, \dots, h_{K,l}]^T \in \mathbb{C}^K$ ;噪声矩阵 $\mathbf{Z} = [\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_L] \in \mathbb{C}^{n \times L}$ ;二元选择矩阵 $\Phi \in \{0,1\}^{M \times K}$ 表征用户发送的信息,具体而言,如果第 $k$ 个用户活跃并发送第 $w_k$ 个码字时, $[\Phi]_{w_k,k} = 1$ ,否则 $[\Phi]_{w_k,k} = 0$ 。

接收端基于接收信号进行译码,将译出信息的集合记为 $\hat{\mathcal{W}}$ ,满足 $|\hat{\mathcal{W}}| = K_a$ 。此时,平均每用户误差概率PUPE可表示为:

$$P_e = \frac{1}{K_a} \sum_{k \in \mathcal{K}_a} \mathbb{P} \left[ \{W_k \notin \hat{\mathcal{W}}\} \cup \{W_k = W_i \text{ for } i \neq k\} \right]. \quad (3)$$

## 2 非渐近可达界

在接收端信道状态信息未知的情况下,定理1给出了MIMO准静态瑞利衰落信道中共享码本随机接入时PUPE的可达界。

定理1:假设 $K$ 个潜在用户中共有 $K_a$ 个活跃用户,用户均配置单天线,基站的天线数为 $L$ 。所有用户共享一个码本,包含 $M = 2^J$ 个长度 $n$ 的码字,满足最大功率不超过 $nP$

约束。在MIMO准静态瑞利衰落信道中，当信道状态信息未知且活跃用户数 $K_a$ 确定已知时，系统的PUPE的上界为：

$$P_e \leq \min_{0 < P' < P} \left\{ p_0 + \sum_{t=1}^{K_a} \frac{t}{K_a} \min\{1, p_t\} \right\}, \quad (4)$$

其中，

$$p_0 = \frac{\binom{K_a}{2}}{M} + K_a \left[ 1 - \frac{\gamma\left(n, \frac{nP}{P'}\right)}{\Gamma(n)} \right], \quad (5)$$

$$p_t = \min_{0 \leq \omega \leq 1, 0 \leq \nu} \{q_{1,t}(\omega, \nu) + q_{2,t}(\omega, \nu)\}, \quad (6)$$

$$q_{1,t}(\omega, \nu) = \binom{K_a}{t} \binom{M - K_a}{t} \mathbb{E}_{\mathbf{C}} \left[ \min_{\substack{u \geq 0, r \geq 0, \\ \lambda_{\min}(\mathbf{B}) > 0}} \exp\{Lm\nu\} \exp\left\{L\left((u - r)\ln|\mathbf{F}| - u\ln|\mathbf{F}_2| + r\omega\ln|\mathbf{F}_1| - \ln|\mathbf{B}|\right)\right\} \right], \quad (7)$$

$$q_{2,t}(\omega, \nu) = \min_{\delta \geq 0} \binom{K_a}{t} \mathbb{E}_{\mathbf{C}} \left[ \frac{\gamma(Lm, c_\delta)}{\Gamma(Lm)} + 1 - \frac{\gamma(nL, nL(1 + \delta))}{\Gamma(nL)} \right], \quad (8)$$

$$c_\delta = \frac{L(n(1 + \delta)(1 - \omega) - \omega\ln|\mathbf{F}_1| + \ln|\mathbf{F}| - n\nu)}{\omega \prod_{i=1}^m \lambda_i^{\frac{1}{m}}}, \quad (9)$$

$$\mathbf{B} = (1 - u + r)\mathbf{I}_n + u\mathbf{F}_2^{-1}\mathbf{F} - r\omega\mathbf{F}_1^{-1}\mathbf{F}, \quad (10)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{I}_n + \mathbf{C}\mathbf{F}_{S_{K_a}}\mathbf{C}^H, \quad (11)$$

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{I}_n + \mathbf{C}\mathbf{F}_{S_{K_a} \setminus S_1}\mathbf{C}^H, \quad (12)$$

$$\mathbf{F}_2 = \mathbf{I}_n + \mathbf{C}\mathbf{F}_{S_{K_a} \setminus S_1 \cup S_2}\mathbf{C}^H, \quad (13)$$

其中， $S_{K_a}$ 表示发送信息的集合，包含 $K_a$ 个元素； $S_1$ 表示集合 $S_{K_a}$ 的任意一个包含 $t$ 个元素的子集； $S_2$ 表示集合 $[M] \setminus S_{K_a}$ 的任意一个包含 $t$ 个元素的子集；矩阵 $\mathbf{C} \in \mathbb{C}^{n \times M}$ 表示假设无功率约束时的码本矩阵，其元素服从i.i.d.  $\mathcal{CN}(0, P')$ 分布；对于任意集合 $S \subset [M]$ ，对角矩阵 $\mathbf{F}_S = \text{diag}\{\boldsymbol{\gamma}_S\} \in \{0, 1\}^{M \times M}$ 满足当 $i \in S$ 时， $[\boldsymbol{\gamma}_S]_i = 1$ ，否则 $[\boldsymbol{\gamma}_S]_i = 0$ ； $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ 表示矩阵 $\mathbf{F}_1^{-1}\mathbf{C}\mathbf{F}_{S_1}\mathbf{C}^H$ 的特征值，秩为 $m = \min\{n, t\}$ ； $\gamma(\dots)$ 表示不完全Gamma函数； $\Gamma(\cdot)$ 表示Gamma函数。

证明：上述定理主要采用高斯随机编码<sup>[7]</sup>和最大似然(ML)解码方案得到。首先，考虑一个新的测度，假设码本中的每一个元素服从独立同分布的 $\mathcal{CN}(0, P')$ 分布，并假设既不存在码字冲突也没有功率约束。 $p_0$ 表示真实测度与新测度之间全变差距离的上界。接下来，基于新的测度，推导出恰好有 $t$ 个码字错误检测的概率的上界，将该上界记为 $p_t$ 。该上界主要通过Fano提出的基于“良好区域”的技巧<sup>[8]</sup>、Chernoff界以及二次型的矩生成函数等数学工具得到。 $p_t$ 主要包含两部分，第一项 $q_{1,t}(\omega, \nu)$ 表示有恰好 $t$ 个码字漏检且接收信号位于发送信号线性组合周围某一区域的概率的上界，第二项 $q_{2,t}(\omega, \nu)$ 表示接收信号落在该区域外的概率的上界。

定理1给出了MIMO准静态瑞利衰落信道中共享码本随机接入时平均每用户误差概率的可达界。在信道状态信息未知的情况下，信道衰落和噪声的影响会耦合在一起，在分析中很难将这两种影响分开。幸运的是，当考虑瑞利衰落信道时，在给定发送信号的情况下，接收到的信号 $\mathbf{Y}$ 服从高斯分布，这使得分析更加容易。当信道服从更加复杂的信道模型时<sup>[9]</sup>，系统的性能极限有待进一步探索。此外，从定理1可以看出，当接收端天线数增加时，恰好有 $t$ 个码字错误检测的概率的上界 $p_t$ 逐渐减小，因此，MIMO技术对提升系统的可靠性具有显著增益。

### 3 非渐近逆定理

定理2给出了在信道状态信息未知情况下，MIMO准静态瑞利块衰落信道中大规模随机接入时PUPE的逆定理。

定理2：假设活跃用户数为 $K_a$ ，用户均配置单天线，基站的天线数为 $L$ 。所有用户共享同一个码本，包含 $M = 2^J$ 个长度 $n$ 的码字。在信道状态信息未知的MIMO准静态瑞利衰落信道中，当 $K_a$ 确定且已知时，平均每用户误差概率 $P_e$ 需满足以下条件：

1) 当码本中的元素服从i.i.d.  $\mathcal{CN}(0, P)$ 分布时，则应满足：

$$nL \log_2(1 + K_a P) - L \left[ 1 - \frac{\binom{K_a}{2}}{M} \right] \mathbb{E} \left[ \log_2 |\mathbf{I}_n + \mathbf{X}_{K_a} \mathbf{X}_{K_a}^H| \right] \leq (1 - P_e) K_a (J - \log_2 K_a) - K_a H_2(P_e), \quad (14)$$

$$P_e \leq \frac{M}{M + K_a}, \quad (15)$$

其中, 矩阵  $\mathbf{X}_{K_a} \in \mathbb{C}^{n \times K_a}$  中的元素服从 i.i.d.  $\mathcal{CN}(0, P)$  分布。

2) 单用户有限码长理论界表明:

$$J - \log_2 K_a \leq -\log_2 P[\chi^2(2L) \geq (1 + (n + 1)P)r], \quad (16)$$

其中,  $r$  是满足以下条件的解:

$$P[\chi^2(2L) \leq r] = P_e. \quad (17)$$

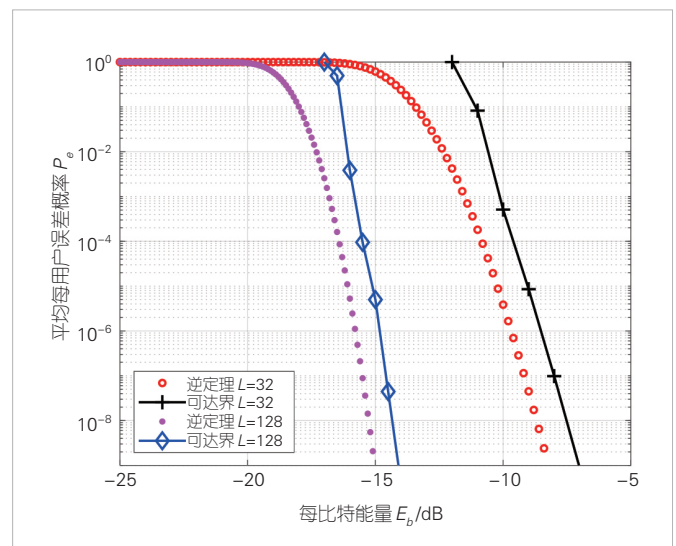
证明: 上述定理中的条件一考虑多用户共享码本随机接入场景, 主要利用 Fano 不等式得到, 其中的互信息依照文献[10]中的方法进行处理。条件二的推导思路如下: 假设有  $K_a$  个活跃用户, 当  $K_a - 1$  个活跃用户的信道衰落系数和发送的信息已知时, 检测  $K_a$  个用户发送信息的问题可以退化成检测单用户发送信息的问题。在共享码本随机接入场景中可能存在信息冲突, 因此,  $K_a - 1$  个活跃用户发送的信息中不同信息的数量  $B$  满足  $1 \leq B \leq K_a - 1$ , 解码器的目标是输出另外  $K_a - B$  个信息以恢复最后一个活跃用户发送的信息。为了得到逆定理, 将译码列表大小从  $K_a - B$  扩大到  $K_a$ , 将 PUPE 缩放为  $\mathbb{P}[W_1 \notin \hat{\mathcal{W}}]$  即可得到条件二。

定理2中的条件二对于所有码本都成立, 主要通过假设  $K_a - 1$  个活跃用户的信道衰落系数和发送的信息已知时, 将多用户问题退化到单用户问题, 再利用单用户情况下列表译码的理论界分析得出。但是, 当  $K_a$  很大时, 多用户干扰会变得非常严重, 已知  $K_a - 1$  个活跃用户的信道衰落系数和发送信息的假设过于乐观, 因此该逆定理会变得非常松。为解决这个问题, 条件一直接处理多用户随机接入问题, 不依赖于上述假设, 但条件一仅针对高斯码本的情况成立。因此, 条件一在活跃用户较多时为主要约束条件, 条件二在活跃用户较少时为主要约束条件。

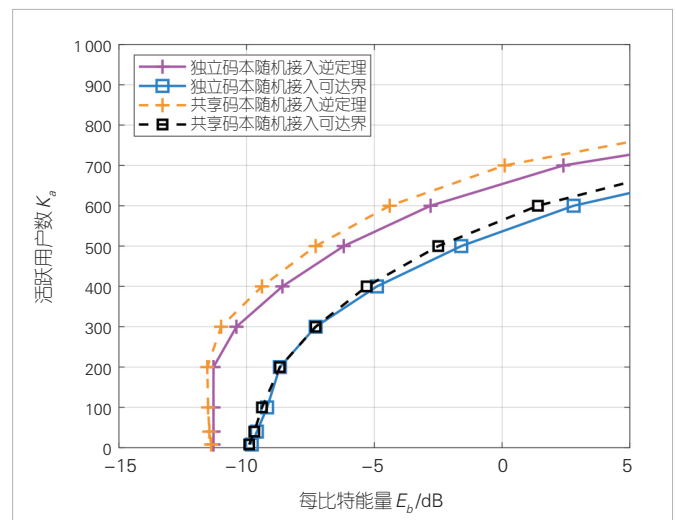
### 4 仿真结果分析

图1比较了在共享码本随机接入场景中, 采用不同每比特能量  $E_b$  时的平均每用户误差概率  $P_e$ 。仿真中设置码长  $n = 1000$ , 用户载荷  $J = 100$  bit, 基站天线数  $L \in \{32, 128\}$ 。图1中的可达界源于定理1, 逆定理源于定理2。从图中可以看出, 随着每比特能量的增加, 平均每用户误差概率逐渐减小。当基站天线数从  $L=32$  增加到  $L=128$  时, 达到某一误差概率要求所需的每比特能量显著减小, 因此基站配置多天线对支持大量用户可靠接入具有重要意义。此外, 当天线数较多且误差要求较高时, 可达界和逆定理之间的差距较小。具体而言, 当天线数  $L=128$  且要求平均每用户误差概率  $P_e \leq 0.0001$  时, 可达界和逆定理之间的差距能够减小到 1 dB。

图2比较了本文推导的共享码本随机接入场景中的理论界以及文献[11]给出的信道状态信息未知独立码本随机接入时的理论界。仿真中假设活跃用户数  $K_a$  已知, 并设置码长  $n = 1000$ , 用户载荷  $J = 100$  bit, 基站天线数  $L = 32$  以及平均每用户误差概率要求  $P_e \leq 0.001$ 。对于独立码本随机接入, 设置  $K_a/K = 0.4$ 。图2还比较了共享码本随机接入和独立码本随机接入两种场景中可支持活跃用户数和每比特能量的理论关系。仿真结果表明, 当活跃用户数小于 400 时, 两种场景中的可达界和逆定理之间的差距均小于 4 dB。两种场景中均存在多用户干扰消除现象, 即当活跃用户数小于某个门限时, 几乎不需要额外增加每比特能量即可满足误差要求。当活跃用户数大于 200 且进一步增加时, 所需的每比特能量也



▲图1 共享码本随机接入采用不同每比特能量的平均每用户误差概率



▲图2 独立码本以及共享码本随机接入采用不同每比特能量时可支持活跃用户数对比

随之增加。此外,在给定用户载荷、码长、基站天线数和最大允许误差的情况下,与独立码本随机接入相比, $K_a$ 个活跃用户共享码本随机接入时所需的每比特能量较少。这是因为当用户共享同一个码本时,在译码过程中只需搜索一个码本空间即可,因而支持 $K_a$ 个活跃用户可靠接入所需的每比特能量减少,且用户数越多,共享码本随机接入节省的每比特能量越多。

## 5 结束语

面向未来 umMTC 场景中的巨连接、零星活跃、小包传输和低功耗的需求,本文围绕共享码本随机接入信息理论极限分析的关键科学问题,建立了非渐近域下大规模随机接入系统传输性能紧致的理论极限界,系统地分析天线数、码长、用户载荷、发送功率、平均每用户误差概率等参数之间的非渐近理论关系。仿真结果证实了推导的非渐近理论界的紧致性,并且表明当活跃用户数量低于某一门限时,存在近似多用户干扰消除的效果。此外,通过在基站配置大量天线,可以有效降低平均每用户误差概率,从而保证大量用户能够可靠地接入通信系统。与独立码本随机接入相比,用户共享同一码本时数据译码所需搜索的空间较小,因此共享码本随机接入能够实现更高的能量效率。本文建立的共享码本随机接入非渐近理论界对探索 umMTC 场景的性能极限具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 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
- [2] 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. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.3000635
- [3] KOWSHIK S S, ANDREEV K, FROLOV A, et al. Energy efficient random access for the quasi-static fading MAC [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2019: 2768–2772. DOI: 10.1109/ISIT.2019.8849288
- [4] NGO K H, LANCHO A, DURISI G, et al. Massive uncoordinated access with random user activity [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2021: 3014–3019. DOI: 10.1109/ISIT45174.2021.9518253
- [5] RAVI J, KOCH T. Scaling laws for many-access channels and unourced random access [C]//Proceedings of 55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. IEEE, 2021: 1482–1487. DOI: 10.1109/IEEECONF53345.2021.9723116
- [6] FENGLER A, HAGHIGHATSHOAR S, JUNG P, et al. Non-bayesian activity detection, large-scale fading coefficient

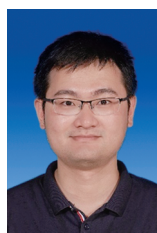
estimation, and unourced random access with a massive MIMO receiver [J]. IEEE transactions on information theory, 2021, 67(5): 2925–2951. DOI: 10.1109/TIT.2021.3065291

- [7] POLYANSKIY Y, POOR H V, VERDU S. Channel coding rate in the finite blocklength regime [J]. IEEE transactions on information theory, 2010, 56(5): 2307–2359. DOI: 10.1109/TIT.2010.2043769
- [8] FANO R M. Transmission of information [M]. New York: John Wiley and Sons, 1961
- [9] PANG L H, ZHANG J, ZHANG Y, et al. Investigation and comparison of 5G channel models: from QuaDRiGa, NYUSIM, and MG5G perspectives [J]. Chinese journal of electronics, 2022, 31(1): 1–17. DOI: 10.1049/cje.2021.00.103
- [10] REEVES G, GASTPAR M C. Approximate sparsity pattern recovery: information-theoretic lower bounds [J]. IEEE transactions on information theory, 2013, 59(6): 3451–3465. DOI: 10.1109/TIT.2013.2253852
- [11] GAO J Y, WU Y P, SHAO S, et al. Energy efficiency of massive random access in MIMO quasi-static Rayleigh fading channels with finite blocklength [J]. IEEE transactions on information theory, 2023, 69(3): 1618–1657. DOI: 10.1109/TIT.2022.3220261

## 作者简介



**高俊园**, 上海交通大学电子信息与电气工程学院在读博士研究生; 主要研究方向为大规模随机接入、有限块长信息理论分析等。



**吴泳澎**, 上海交通大学教授, IEEE Senior Member, IEEE ICC、Globecom、VTC 等国际著名会议技术委员会主席及委员; 研究方向为空时无线通信理论与关键技术; 主持国家自然科学基金、国家重点研发计划子课题, 负责中兴通讯、国家电网等的多个科研项目; 获国家自然科学基金委优秀青年基金、IEEE 通信学会亚太区杰出青年研究学者奖、季寒冰青年教师奖、中国科协“青年托举人才计划”和 2014 德国洪堡学者等荣誉, 博士论文《多用户 MIMO 传输理论方法》获首届中国通信学会“全国信息通信领域优秀博士学位论文”奖, 并获多个学术会议最佳论文奖; 发表论文 90 余篇。



**张文军**, 上海交通大学教授、数字电视国家工程研究中心首席科学家、未来媒体网络协同创新中心主任; 主要研究方向为视频编码与无线传输、多媒体语义分析与广播/宽带网络融合; 是 2006 年发布的中国 DTTB 标准 (DTMB) 的主要贡献者; 发表论文 130 余篇, 拥有专利 238 项。