

论文推荐 | Proc. IEEE: 下一代多址接入：从基本原理到现代架构

September 2024 | Volume 112 | Number 9

Proceedings OF THE IEEE

SPECIAL ISSUE

Next-Generation Multiple Access



下一代多址接入：从基本原理到现代架构

Next-Generation Multiple Access: From Basic Principles to Modern Architectures

对网络性能、设备数量、网络流量和用例的更高需求，促使新网络架构和多址接入技术不断发展。开放无线接入网络（RAN）的进展为网络架构和多址接入带来了新变化。

该文全面介绍当前无线接入网络架构和下一代多址接入技术，涵盖从经典模型到现代技术的演进，讨论了相关性能和限制，并提出了未解决的研究问题。

关键词

广播信道（BC）；干扰信道（IC）；媒体访问控制；多址接入信道（MAC）；多用户干扰；网络信息论；无线通信



Next-Generation Multiple Access: From Basic Principles to Modern Architectures

This article provides a comprehensive tutorial of the current set of network architectures for wireless access together with next-generation multiple-access technologies.

By EDUARD AXEL JORSWIECK¹, Fellow IEEE

主要内容（AI 提取）：

一、引言

无线通信应用广泛，由于其资源有限，多址接入面临挑战。6G 及以后的无线通信技术旨在提升速度、吞吐量、可靠性等性能。为满足这些需求，新的多址接入技术不断涌现，现代多址接入技术需与网络架构协同设计。本文围绕多址接入技术的基本原理、协调多址接入变体和现代多址接入技术展开介绍。

二、信息论基本原理

（一）点对点信道

点对点信道分为无干扰和有干扰两种情况。接收端有完美信道状态信息（CSI）时，无干扰点对点信道容量有特定公式。有干扰时，接收端若将干扰视为额外噪声（TIN），可实现一定速率；若采用干扰消除（SIC），成功解码干扰的情况下能达到更高速率，但解码干扰需满足一定条件。

（二）采用速率分割的点对点信道

把数据流分割后叠加编码，接收端用 SIC，这种方式在单用户点对点信道中可实现信道容量。虽然在单用户场景增加了复杂度且可能传播错误，但在多用户场景有助于提升速率。

（三）多址接入信道

以两用户 MAC 为例，接收端用 SIC 时，不同解码顺序会得到不同的可实现速率对。其容量区域由特定不等式描述，可通过点对点码、两种解码顺序的 SIC 和时分复用（TS）实现，和容量与解码顺序无关。扩展到多个用户的情况，容量区域也有相应描述。

（四）广播信道

两用户 BC 系统采用叠加编码（SC），发送端有总功率约束。对于退化的 AWGN BC，可通过功率控制、SC 编码、强接收端的 SIC 和弱接收端的 TIN 实现容量区域。还有基于 Gelfand-Pinsker 编码的脏纸编码（DPC），但在标量 AWGN BC 中，SC - SIC 区域通常更大。

（五）干扰信道

IC 是 MAC 和 BC 的结合，根据干扰强度不同有不同的编码和解码策略。强干扰时，用点对点码和 SIC 可实现容量区域；弱干扰时，点对点码和 TIN 可实现和容量；中等干扰时，TS 和速率分割（RS）组合可实现最大速率区域，但中等 IC 的容量区域仍未完全解决。

三、基本模型的统一与扩展

（一）多载波系统

多载波调制产生并行信道。并行点对点链路中，分离编码可实现容量，有相应的功率分配方法。并行 MAC 和 BC 编码可分离，功率控制问题类似点对点情况；并行 IC 通常不可分离，联合编码能获得更大速率区域。

（二）多天线系统

多天线系统增加了空间自由度，带来新的容量区域和复杂的优化问题。例如，AWGN 点对点 MIMO 容量、MIMO MAC 容量区域和 MIMO BC 容量区域的计算和实现方式都与单天线情况不同，MIMO BC 需要 DPC 和 TS 才能达到容量区域。

（三）多小区网络

传统蜂窝网络为用户分配基站，多小区模型存在小区间干扰（ICI）。根据基站间关系，RAN 架构分为分布式、协调式、合作式和单小区架构，不同架构的信号模型和可实现速率不同。

四、协调多址接入变体

（一）时分多址接入（TDMA）

TDMA 通过划分时隙让设备共享频率，从信息论角度看不是最优的。它在控制信令和同步方面要求不高，适用于实时机器通信协议，但存在用户数量受限、延迟等问题。

（二）正交频分多址接入（OFDMA）

OFDMA 利用频谱正交性复用多载波信号，有抗多径衰落等优点，但存在峰均功率比（PAPR）问题。它在 5G 等网络中广泛应用，可通过时频资源块（PRB）调度用户和服务。

（三）码分多址接入（CDMA）

CDMA 通过分配码或扩频序列实现多用户接入，码序列相关性影响干扰。接收端用多用户检测技术分离信号，5G 标准中有多种基于 CDMA 的变体。

（四）空分多址接入（SDMA）

SDMA 利用多天线在空间维度复用，大规模 MIMO 让其备受关注。进行波束成形时要权衡接收信号功率和干扰功率，但获取 CSI 存在挑战，可能导致导频污染。

（五）非正交多址接入（NOMA）

NOMA 在 5G 发展中被引入，与传统 OMA 不同，它允许同一频率同时服务多个用户，基于发射端的线性 SC 和接收端的 SIC 实现。从信息论角度看适用于 BC 和 MAC，但在非退化 BC 场景下需优化解码顺序和 TS。

（六）免授权多址接入（GFMA）

GFMA 允许设备随机与基站通信，避免建立连接时的控制信令交换，适用于低延迟和大量用户的场景。它分为基于竞争和无竞争两种方式，前者可能冲突，后者可提高可靠性但资源利用效率有问题。

（七）协调多址接入技术比较

综合比较上述协调多址接入技术在通信标准、应用场景、开销和要求以及局限性等方面的差异。

五、现代多址接入技术

（一）开放无线接入网络架构（Open RAN）

Open RAN 架构简化和民主化了移动网络的开发与运营，其开放标准接口和灵活特性促进了竞争与发展。它对多址接入技术产生了重要影响，如影响了多址接入网络的通信理论建模，通过割集界可计算网络容量。以 Open RAN 架构为例，分析了经典 OMA、多连接、多连接与速率分割、C-RAN 等情况下的性能表现。

（二）无小区多址接入（CFMA）

CFMA 以用户为中心，用户连接多个所需的 RU 获取服务。其主要挑战在于实际实现无小区操作的优势，同时要考虑计算复杂度和前传要求。通过对用户与 RU 间信道的分析，可制定多种功率控制问题，结合速率分割等技术可提高可实现数据速率。

（三）示例：两用户场景

通过一个两用户的示例，比较了不同前传架构、编码方案和资源分配方式下的性能，结果表明采用速率分割的 CFMA 方案性能最佳，这也说明了联合设计中传、前传和无线接入的重要性。

（四）无源大规模随机接入

在大规模随机接入场景中，传统 MAC 方法的可实现速率较低。无源多址接入（UMAC）模型提出了新的思路，多个活跃发射机使用相同码本发送消息，接收端无法区分用户。目前对 UMAC 的研究包括同步和异步情况，以及新的代码设计和与其他架构的结合。

六、结论与开放挑战

（一）结论

现代多址接入技术需具备灵活性、适应性、高效性和可扩展性，应与网络架构结合并从跨层角度设计，网络信息论是系统设计的基础。本文回顾了网络信息论的结果，介绍和比较了经典协调多址接入技术以及现代多址接入技术。

（二）开放挑战

现代多址接入领域存在许多研究问题，包括基本信息论研究、信号处理、优化、软件定义无线电和网络以及通信中的机器学习等方面。例如，一些基本容量区域尚未明确，SIC 的高阶分析仅部分解决，还需考虑多包时间动态对系统模型的影响，同时在安全传输、快速衰落信道、同步、联合优化和机器学习集成等方面也存在挑战。