



中国通信学会

CHINA INSTITUTE
OF COMMUNICATIONS

通信理论与信号处理领域 前沿报告

(2021年)

中国通信学会

2022年6月

版权声明

本前沿报告版权属于中国通信学会，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国通信学会”。违反上述声明者，本学会将追究其相关法律责任。

专家组和撰写组名单

顾问(以姓氏笔划为序)：

专家组：

组长：

周亮， 教授， 通信理论与信号处理专委会主任委员

副组长：(如无可不写)

郑宝玉， 教授， 通信理论与信号处理专委会副主任委员

阮秋琦， 教授， 通信理论与信号处理专委会副主任委员

张钦宇， 教授， 通信理论与信号处理专委会副主任委员

张朝阳， 教授， 通信理论与信号处理专委会副主任委员

安建平， 教授， 通信理论与信号处理专委会副主任委员

陶晓明， 教授， 通信理论与信号处理专委会副主任委员

成员(以姓氏笔划为序)：

姓名	单位	职务
吴泳澎	上海交通大学， 研究员	通信理论与信号处理专委会委员
肖亮	厦门大学， 教授	通信理论与信号处理专委会委员
陈鸣镝	南京邮电大学	讲师
崔景伍	南京邮电大学	通信理论与信号处理专委会学术秘书

撰写组(按单位排名)

单位	姓名
上海交通大学	吴泳澎
厦门大学	肖亮
南京邮电大学	陈鸣锴

前 言

通信理论与信号处理内容作为 5G 乃至 6G 时代最具发展前景的通信技术，已然成为我国高新领域发展的重要方向。日前，全球主要国家和地区政府高度关注通信网络核心技术的发展，将相关产业列为国际竞争布局的重要方向。各国 6G 领域的技术竞备已悄无声息的展开，越来越多的科技巨头也开始布局 6G 网络技术，未来 6G 或将出现标准分裂状态，6G 技术可能存在“国籍”之别。

目前我国已将通信技术相关产业上升到国家战略高度，领域内研究内新兴和热点技术层出不穷。但还需要主动谋划、前瞻部署、厚植根基，深入开展 6G 应用场景研究，稳中有序推动 6G 发展。6G 将从服务于人、人与物，进一步拓展到支撑智能体的高效互联，将实现由万物互联到万物智联的跃迁，成为以沉浸化、智慧化、全域化为导向的业务应用，联接真实物理世界与虚拟数字世界的纽带促进社会生产方式的转型升级，最终将助力实现“万物智联、数字孪生”的愿景。着力推动太赫兹通信、通信感知一体化、通信与人工智能融合等潜在技术创新突破，进一步推动新兴应用拓展和网络建设的互动结合，革新产业组织模式，提升通信芯片和制造水平，培育新通信服务形态，为后续 6G 竞争及商业化奠定基础。

根据中国通信学会组织各专业委员会开展前沿报告的工作安排，通信理论与信号处理专业委员会组织通信理论与信号处理产学研用各领域专家，撰写了《通信理论与信号处理领域前沿报告》。

本报告分析了全球发展态势和我国发展现状，对通信技术与产业发展态势和技术预见进行了预测，探讨了通信信号处理技术中的重大难题提出了技术和产业政策建议。报告内容涉及面广，可作为高校、研究机构以及通信相关学科的技术产业发展参考，也可作为政府部门制定政策的参考。

中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会

主任委员： 

2021 年 9 月 28 日

目 录

一、巨址无线通信和水下信息传输技术	1
(一) 研究概述	1
(二) 全球发展态势	3
1. 传统多址接入技术	3
2. 巨连接用户接入	4
3. 水下信息传输	6
二、我国发展现状	8
(一) 巨址无线通信发展现状	8
(二) 水声通信技术发展现状	9
1. 智能水声通信技术	9
2. 水声网络技术发展	12
3. 特定场景的水声通信技术	14
三、技术预见	14
四、工程难题	16
(一) 协作巨址接入场景	16
(二) 非协作巨址接入场景	18
五、政策建议	20
(一) 技术政策建议	20
(二) 产业政策建议	20
参考文献	22

一、巨址无线通信和水下信息传输技术

（一）研究概述

移动通信产业为网络和信息服务提供国家信息平台，能全面支撑经济社会发展，具有战略性、基础性和先导性意义，近二十年一直保持着迅猛发展的势态。根据 2019 年世界移动通信大会提供的《移动经济》报告显示，2018 年全球移动技术和服务共创造了 4.6% 的 GDP，这一贡献值相当于 3.9 万亿美元的经济附加值。预计到 2023 年，这一贡献值将增加到 4.8 万亿美元（占 GDP 的 4.8%）。移动生态系统还在 2018 年（直接和间接地）创造了近 3,200 万个就业岗位，并为公共部门的资金提供做出了重大贡献，通过一般税收形式筹得 5,000 多亿美元的资金。移动通信技术已经成为新时期全球战略制高点之一。2021 年 3 月发布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中明确指出要加快推动数字产业化，构建基于 5G 的应用场景和产业生态，在智能交通、智慧物流、智慧能源、智慧医疗等重点领域开展试点示范。

2019 年 6 月，3GPP RAN#84 会议确立了第五代移动通信系统(5G, 5th Generation Mobile Communication System) 空口标准的最新时间表^[1]。其中，作为 5G 第一阶段标准版本的 Release 15，包含早期交付的非独立组网和主交付的独立组网，都已经完成并冻结。我国也于 2019 年 6 月正式发布 5G 商用牌照，5G 正式走向商用。随着 5G 的商用化，未来移动通信系统的传输数据率和用户连接数，将继续呈现指数级增长的趋势。为进一步满足宽带无线通信领域不断增长的业务需求，世

界各国在推动 5G 技术系统产业化的同时，已经开始着眼于后 5G 时代移动通信系统网络架构和关键技术的研究，寻求新一代的革新性理念和创造性的移动通信技术。

未来通信网络正快速朝向万物移动互联的方向发展。万物移动互联网要求实现人、物、数据和信息处理的智能连接。根据思科的一份研究报告显示^[2]，目前，全球还有 99.4% 可以融入万物移动互联网的物理设备没有被智能的连接起来。图 1 描绘了全球移动通信系统中的设备连接数量，从过去的人联网，到现在的物联网，再到未来的万物移动互联网的演进趋势^[3]。从图 1 中我们可以预计，未来无线网络中的设备连接数，将会呈现爆发式的增长。在此背景之下，针对未来巨连接设备的巨址无线传输技术，开始受到多个国际著名高校和行业领军企业的关注。

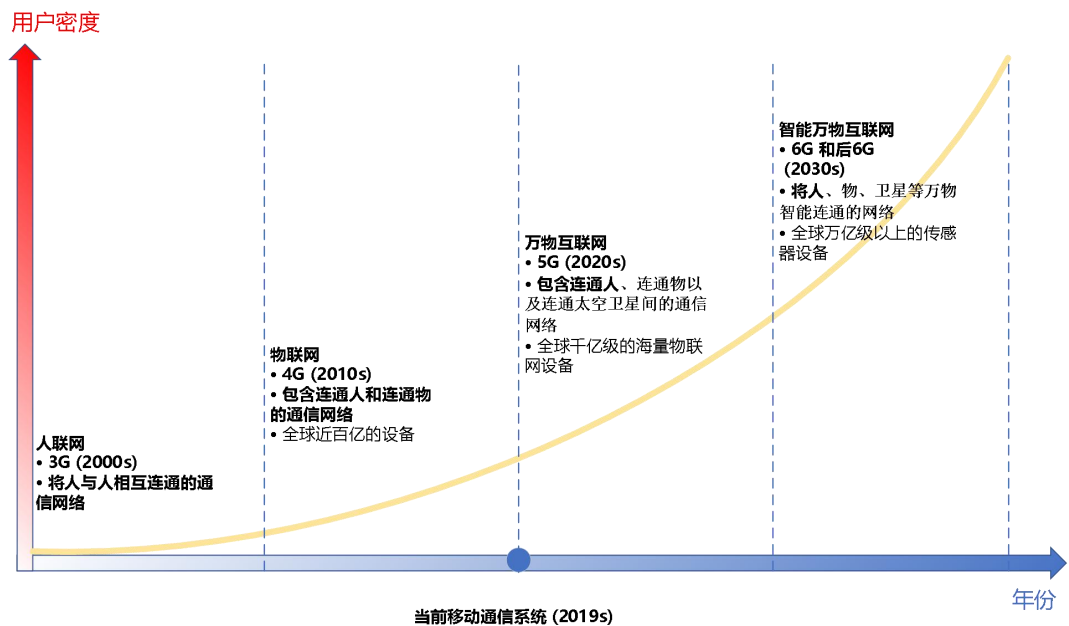


图 1 全球移动通信系统中的设备连接数量演进趋势

(二) 全球发展态势

1. 传统多址接入技术

在无线通信系统中，多址接入技术指的给每个用户的传输数据赋以不同的特征，以区分不同的用户，使得多个用户能同时在一个公共的传输媒质上进行通信的技术。多址接入技术的核心目标是在物理上实现传输媒质的复用，使得网络运营商可以避免维护多条线路，从而有效地节约运营成本。典型的多址接入技术包括以下几种：

- 频分多址技术 (FDMA: frequency division multiple access): FDMA 技术将传输带宽分为多个相互不重叠的频率子信道，在每个子信道上分配一个通信用户。

- 时分多址技术 (TDMA: time division multiple access): TDMA 技术利用互不重叠时隙来支持不同用户。

- 码分多址技术 (CDMA, code division multiple access): CDMA 技术在相同的时间和频率资源上利用不同的码字来支持不同用户。与 FDMA 系统中每个用户在一个频率子信道上通信不同，CDMA 系统中，每个用户可以占用整个系统带宽进行传输。

- 空分多址技术 (SDMA, space division multiple access): SDMA 利用空间波束成型技术在同一时频资源上同时和多个用户进行通信。波束的方向性可以有效地避免不同用户之间的数据干扰。

- 非正交多址技术 (NOMA, non-orthogonal multiple access): NOMA

技术允许更多的用户在非正交的资源同时进行通信。NOMA 技术背后的基础理论来自于经典多用户信息论。

以上提到的几种多址接入技术都已经相对比较成熟，并且被应用于多个宽带无线通信的标准之中。例如，最基本的 FDMA 技术被应用于第一代蜂窝移动通信系统中，第二代蜂窝移动通信系统采用的是 TDMA 和 FDMA 联合多址接入技术，CDMA 是第三代蜂窝移动通信系统的主要多址接入技术。作为 FDMA 技术的一个改进版本，正交频分多址（OFDMA, orthogonal frequency division multiple access）技术在 4G 和 5G 移动通信系统中被广泛使用。

在电信行业开始 5G 标准化讨论的初期阶段，工业界和学术界针对 NOMA 技术开展了广泛研究，并将其中一些 NOMA 的传输方案提交给 3GPP 作为 5G 多址接入的候选提案。总体上，目前传统的多址接入技术，在每个自由度（d.o.f., degree of freedom）上能够支持的用户数仍然比较有限。例如，3GPP 中讨论的 NOMA 技术，通常的用户过载率在 1.5-3 之间，超出这个范围系统将会出现严重的性能损失。

2. 巨连接用户接入

未来万物移动互联网，将会使得每自由度上用户连接数显著增加。在此背景之下，以上提到的传统多址接入技术，将很难再高效地支持未来巨连接系统的业务承载。因此，近几年，学术界开始关注新的海量用户接入技术，提出了巨址无线通信的概念^[4]。巨址无线通信中每个传输媒质上用户数将比现有系统高出好几个数量级。例如，5G 标准的第二阶段大规模机器通信场景要求每平方公里内必须支持 100

万个用户^[5]，后 5G 智能万物互联时代的系统用户连接数将会进一步增加。

巨址无线通信可以分为协作巨址接入和非协作巨址接入两种典型场景。其中，协作巨址接入场景中每个用户会被分配一个特定的导频/标识序列。基站可以根据该标识来辨别对应的用户。非协作巨址接入场景中，每个用户没有特定的标识，所有用户共享完全相同的传输机制。因此从基站的角度来说，每个用户都是无源的。

对于协作巨址接入场景，美国东北大学郭东宁教授研究组针对加性高斯白噪声信道，从信息理论的角度分析了码长、用户数和每比特能量都趋于无穷时的渐近码长容量^[6]。对于时延不敏感的协作巨址接入场景，丹麦奥尔堡大学 E. de Carvalho 教授研究组提出了一种基于导频序列模式跳转的大规模天线巨址传输方案^[7]。通过导频在码本间随机跳转带来的长时间平均效果，可以有效的消除海量用户接入时的导频碰撞影响。对于时延敏感的协作巨址接入场景，加拿大多伦多大学郁炜研究组设计了一种基于压缩感知的活跃用户检测和信道估计方案^[8]。所提出的方案利用了压缩感知中经典的近似消息传输（AMP, approximated message passing）算法。理论证明当天线数趋于无穷时，活跃用户检测的虚警率和误检率都可以趋近于零。

对于非协作巨址接入场景，2017 年美国麻省理工大学 Yury Polyanskiy 副教授从信息理论角度提出了一种新的海量用户接入模型^[4]：大规模无源随机接入（massive unsourced random access）。与传统的多用户信息理论模型相比，大规模无源随机接入模型存在三个关键

不同假设：

- ① 所有用户都共享一个相同的码本（传输机制），因此用户在接收端是“无源(unsourced)”的。接收端只解码用户传输的信息，而不恢复具体每个用户的标识。如果需要，用户可以把自己的标识信息放到传输信息中。这一假设避免了在海量用户通信中复杂的用户标识分配和认证过程。
- ② 将错误概率定义为所有活跃用户误解码消息的平均错误概率。相比经典多用户信息论要求将所有用户消息都正确解码出来，在海量用户接入场景考虑平均错误概率更为合理。
- ③ 每个用户需要传输的信息比特是有限的，小包信息传输也更加符合 mMTC 通信场景的实际情况。基于有限码长分析得到的结果将会与传统信息论中渐近分析结果有较大不同。

针对 Polyanskiy 所提出的大规模无源随机接入的信息理论模型，美国德州农机大学 J. -F. Chamberland 教授研究组提出了一个基于压缩感知的级联编码实现方案：利用压缩感知编码作为内码，树编码作为外码^[9]。进一步，可以将该级联编码框架中的内码换成稀疏回归码（SRARC, Sparse Regression Code）^[10]、LDPC 码^[11]和 Polar 码^[12]来提高传输功率效率。最近，德国柏林工业大学 G. Caire 教授研究组将大规模无源随机接入推广至大规模天线场景^[13]。G. Caire 教授提了一种基于协方差矩阵的最大似然检测方案作为不需要估计信道的内码活跃用户检测方案。

3. 水下信息传输

当前，水下设备间经无线链路的高速、可靠通信技术，正成为制约我国海洋安全、海洋开发以及海洋保护等国家战略发展的重要因素。水下声通信技术在国内外已有数十年的研究，由于其具有相对较远的通信距离、比较可靠的通信性能等优点，已经成为水下信息获取的主要手段。近年来，对水下蓝绿激光通信技术和磁感应技术等研究也有报道。但蓝绿激光目前报道的通信距离在几百米的范围内，而其它技术仍处于可行性论证的阶段。

受限于水声信道的时变性/复杂性，相关的研究投入有限，产业链的不完善，大型设备和海洋实验验证昂贵等不利因素，国内水声通信技术的发展在通信速率、通信距离等方面与用户的需求仍有较大的差距。例如对水下无缆航行器的遥控中，无法做到视频信号清晰、稳定、低延时的传输；在对潜指令信息的通信中，通信距离和可靠性亟待提高等。



图 1 水声技术未来主要发展方向

综上，为服务国家海洋战略，必须在如图 1 所示的几个方面实现

突破：1、建立完善声电换能器、功率/弱信号放大器、数据采集/处理设备、高精度陀螺仪/时钟、水密接插件等相关产业链，制定国家标准；2、进一步提高水声通信距离，降低时延，提高鲁棒性，开展智能水声通信技术研究；3、建立水下声通信/传感网络，扩大覆盖范围，提高任务效率；4、开展水下声通信/对抗技术研究；5、进一步对水声信号的传输机理、建模进行研究。

二、我国发展现状

（一）巨址无线通信发展现状

近年来，我国也开始高度重视巨址无线通信的研究。2019年，国家“宽带通信和新型网络”重点研究计划“大规模无线通信物理层基础理论与技术”项目指南中明确指出针对未来移动通信的巨流量、巨连接持续发展需求，以及由此衍生出的大维空时无线通信和巨址无线通信两个方面的科学问题，需要开展大规模无线通信物理层基础理论与技术研究。2021年国家自然科学基金委2021信息学部重点项目针对巨址无线通信立项“大规模随机多址接入理论与技术”。在国家科项目的支持下，我国在巨址无线通信领域也取得了不少成果。

对于协作巨址接入场景，上海交通大学吴泳澎副教授团队将码长容量的信息理论结果推广至多输入多输出（MIMO, multiple-input multiple-output）信道^[14]。成都电子科技大学的袁晓军教授研究组考虑同时进行活跃用户检测、信道估计和数据解码^[15]。为了进一步提高性能，文献^[15]提出了一个 Turbo 近似消息传递架构将整个检测问题分解为两个子部分：1) 双线性约束的信道模型，2) 用户信号的稀疏性

结构。这两个子部分在检测算法中交替迭代交换信息直到收敛。文献^[15]还考虑了在随机接入用户信号异步到达情况下的传输设计。北京理工大学高镇副教授利用角度域的稀疏性提出了一系列基于压缩感知的自适应活跃用户检测和信道估计方案^[16]。所提出的方案在更为实际的大规模天线信道模型中能获得较好的活跃用户检测和信道估计性能。

对于非协作巨址接入场景，上海交通大学吴泳澎副教授团队提出了一种 MIMO 信道下的 SPARC-LDPC 级联编码设计方案^[17]。所提出的设计方案比文献^[13]中基于协方差矩阵的最大似然检测方案获得了显著的频谱效率提升。

(二) 水声通信技术发展现状

1. 智能水声通信技术

目前，点对点（单工、半双工）水声通信技术依然是实现水下设备通信的主要技术手段，采用的主要调制解调方式有频移键控(MFSK)、直接序列扩频(DSSS)、相移键控(MPSK)、正交频分复用(OFDM)等。

按通信距离，点对点水声通信技术可以分为极近程(小于 1km)、近程(小于 5km)、中程(小于 15km)以及远程水声通信。不同距离下声信号载频和通信带宽有明显的区别，所面临的信道环境也有显著差异。此外，不同的通信任务对通信可靠性、数据率、时延要求等方面也不尽相同。例如，蛟龙号的水声语音通信采用单边带调制；水声远距离通信通常采用频移键控或者直接序列扩频技术。单一的水声调制解调

技术，无法满足多样化水声通信任务对能耗、时延以及可靠性的最优需求。

(1) 智能点对点水声通信技术

智能点对点水声通信技术，包括信道自适应水声通信技术、通信质量自适应水声通信技术以及水声通信智能抗干扰技术等。

信道自适应水声通信技术根据反馈的信道环境参数，自适应的选择调制解调技术，以最优的适应信道。其中，**自适应 OFDM 水声通信技术**是基于反馈的信道估计结果，最优化的计算出不同子载波的调制阶数。优化的目标一般是设定最高可接受的误比特率，尽可能的提高通信速率；**自适应水声通信技术**是设定一个优化目标，同样基于反馈信息，自适应的在一个调制编码方法集合中最优选择。优化目标有最大化通信速率、最小化误比特率等。

该技术的新成果是**基于人工智能的自适应水声通信技术**。采用强化学习等在线学习算法，综合考虑能耗、时延、任务完成度等性能参数，在动态变化的水声信道环境下，提高通信性能。

通信质量自适应智能水声通信技术主要用于水下图像、语音和视频等任务。该技术将图像、视频、语音编码与自适应调制和信号编码技术结合，以实际感知质量作为反馈信息。质量感知有无参和半参考质量评价技术。

在原始图像中加入数字水印，利用数字水印估计图像的传输结果，采用强化学习最优选择调制编码技术。离线实验结果表明，该技术在提高水下图像、视频、语音通信质量的同时，降低了传输时延、能耗

等；伪模拟 OFDM 技术用于水下图像、视频传输也有一些最新的报道。

(2) 水声通信智能抗干扰技术

在有限的频带范围内，水声通信极易受到其它水声通信设备、水声定位设备、噪声和敌意干扰的影响。传统的干扰对抗技术，如跳频技术，在水声环境中性能明显下降。智能化的水声通信抗干扰技术包括干扰信号的智能识别、基于路径规划、中继、欺骗等的智能水声通信抗干扰技术。

深度学习已经广泛用于干扰信号的调制方式识别、干扰模式的识别中。但在水声时空变、多普勒环境下识别率还很低。联合载波频率估计、带宽、干扰模式的智能识别网络也有相关成果发表，但仍处于理论研究、仿真阶段。

基于智能干扰信号识别和海洋环境参数，水下航行器等可以采用智能的路径规划，利用相互距离关系等对抗干扰，提高通信性能；基于强化学习的声通信中继节点优化选择、中继节点位置选择等，重点在于提高学习的速度以及降低计算复杂度，提高对抗智能干扰源的能力；针对智能干扰源，智能欺骗是一项有效的对抗技术。基于强化学习等的智能欺骗可以快速消耗干扰源的能量、使其使用错误的干扰策略等。

利用可移动的水下航行器作为中继对抗干扰，基于强化学习制定抗干扰策略。水池实验结果表明，该技术可以有效对抗干扰，提高通信性能。

(3) 信道估计、均衡以及多普勒补偿等技术

在信道估计方面，半盲的信道估计技术具有鲁棒性较强、复杂度较低的优点。分层高斯模型、隐马尔可夫模型、贝叶斯理论、压缩感知等技术的应用，提高了信道估计的精度。

在均衡技术方面，将迭代均衡技术用于 OFDM 水声通信中，逼近最大后验概率(MAP)解，与最小均方误差(MMSE)解相比，提升了性能。MPSK 水声通信中，双向判决反馈均衡器的应用有利于提高时变信道下的鲁棒性。

水下多普勒的补偿通常分为基于重采样的粗补偿和精细补偿两步。分数间隔傅里叶变换、压缩感知、优化导频设计、凸优化等技术被用来提高多普勒精细补偿的精度。

空间分集能够在不降低频带利用率的情况下，显著降低通信错误率。缺点是需要多个发射和接收单元，占用空间、也提高了能耗。单输入多输入(SIMO)水声通信技术的性能不但被理论和实验结果所证实，也是多种设备采用的解决方案。而结合空时编码的多输入多输出(MIMO)技术在水下的应用仍停留在实验验证的阶段。

为提高近距离水声通信的速率，国内多家单位开展了毫米波水声通信的理论和实验研究。实验结果表明，毫米波水声信号的有效通信距离可以达到一百米以上。结合 MIMO 的毫米波水声通信技术，理论上可以达到上百 kbps 的通信速率，具备实时视频信号传输的能力。

2. 水声网络技术发展

大时延、低通信速率、信道变化快是水声组网面临的难点。如何

有效的避免碰撞，降低网络损耗是近年来水声网络研究的重点。水声网络根据其执行任务的不同，其技术方案有很大的区别。

（1）水下数据收集

在海洋中，有大量的有用数据产生于深海。例如水下航行器螺旋桨噪声、水下环境数据的采集、地震波数据的采集等。对这类数据通常采用的方式是分层向上传输，经几次中继后由海面的锚节点收集，再经电磁波链路上传。

该网络有如下的特点：数据量大、节点能量受限、大量数据是由海底传向海面。因此，对该网络的研究集中在采用强化学习、深度学习等技术优化路由协议，提高节点发生故障情况下的通信可靠性，以及降低能耗、时延等。

路由协议的优化一般基于各节点间的相对位置和信道环境。水下节点的位置采用分层的方法确定。首先海面锚节点的位置由卫星定位系统确定；接下来，海面下的节点与各锚节点通信，利用时延确定自身的位置；再逐层确定各节点的位置。各节点间的信道环境由相互间的通信，结合强化学习等智能预测算法获得。

（2）UUV 编队协同探测、作战网络

水下滑翔机是海域环境长期感知、监测的有效载体。自动或遥控的水下无人航行器、机器人在石油钻井平台、水下数据收集、水下目标识别等方面均有重要的作用。但单一设备所能覆盖的范围是非常有限的。集群作战是提高监测范围、提高目标识别能力的有效手段。

该技术的核心是在水下存在洋流等的影响下，解决集群中各设备

的准实时动态定位、能耗控制、多普勒环境下的通信问题。在不同的工作环境下，如海域已经建立有水下通信传感网络。此时需要研究集群中各设备接入网络，通信技术兼容，基于网络的定位等问题；在没有网络覆盖的海域，目前的主要研究的内容是集群中的部分设备浮出海面获得自身的位置。网络中的其它设备采用人工智能等方法，通过已知位置的节点更新自身位置的技术。

3. 特定场景的水声通信技术

北极冰下和超远程水声通信技术其应用场景比较特殊。随着全球气候变暖，北极冰下在未来可具备一定的通航条件。目前我国已经通过跨国合作，开展了北极冰下声通信技术研究。声信号在冰下传播具有特殊性，有研究表明其波导是沿冰面下进行传输；超远程水声通信的研究结合了大功率低频声电换能器技术、超低频阵列信号处理技术、海洋物理技术等。有实验表明，爆炸信号可沿深海声道轴传输几百甚至上千 km。

三、技术预见

对于巨址无线通信，一个基本的概念是“支持 1M 用户以 10bps 速率通信比支持 10 个用户以 1Mbps 的速率通信要困难的多^[18]”。其主要原因是巨址无线通信技术与传统多址通信具有以下几方面截然不同的特点：

- 在每个 d.o.f. 上的活跃用户数会比传统模型要高出几个数量级（巨连接）。理论上，当用户数趋近于无穷，经典的多用户多址接入信道模型中每个用户的速率都将趋近于零，主要是因为巨址无线通信的

模型假设下，经典的串行干扰抵消算法无法在理论上确保一个任意小的解码错误概率。

- 在潜在的海量用户集合中，每一个时刻实际活跃的用户，可能只是其中一小部分，而活跃用户的具体信息在接收端是未知的。因此，接收端需要在潜在的海量用户集合中，检测出实际活跃的用户及其发送的信号。

- 在巨址无线通信场景中，要求接收端知道所有用户的准确信道信息，即使是统计信道信息，都是限定性较强的假设。这主要是基于以下两点原因：首先，对于海量用户连接设备，保证给每个用户分配一个特定的导频信号来进行信道估计是比较困难的。更重要的是，要求接收端已知所有用户的信道信息就要求接收端实时更新和存储每个用户的信道参数。由于每个用户信道都是在不断变化的，这种实时更新必须不断的重复。对于百万量级的传感器设备，维持这样一个实时更新过程是非常困难的。即使是获取准确的统计信道信息在实际中也有一定难度，因为统计信道信息是通过计算每一个用户，在一段样本数据中接收信号的平均值而获得的。对于百万量级的用户来说，这种计算的复杂度是非常高的。

- 在海量传感器接入的物联网场景中，从传输能量效率角度考虑，每个传感器

- 发送的数据包可能都较小（几百比特）。因此，与传统基于渐近分析的经典多用户信息论不同，在巨址无线通信中大量场景，需要采用小包信息理论进行分析。小包信息论下，巨址无线通信的理论极限目

前仍然未知，目前学术界仅推导出一些理论上界和下界。这些推导出的理论界，已经显示出小包信息论下的巨址无通信理论极限与传统基于香农公式得到的渐近分析结果有较大的差距。同时，逼近这些理论极限的实际传输方案与传统多址接入下的传输方案也会有较大不同。

四、工程难题

(一) 协作巨址接入场景

如果依据传统多用户信息论码长与用户传输的信息量都趋于无穷的渐近分析，多用户 AWGN 信道下每比特传输功率可以表示为：

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{nKP}{n \log(1+KP)} \xrightarrow{K \rightarrow \infty} \infty$$

也就是说，基于传统多用户信息论渐近模型，所得到的每比特传输功率，将会随着用户数的增加而不断增长，这给未来实际无线通信系统工程中低功耗、高功率效率的要求带来巨大挑战。为解决这个问题，麻省理工大学的 Yury Polyanskiy 教授，更改了自 1970 年以来传统多用户信息理论文献中所使用的联合错误概率准则，并针对巨址无线通信定义了单位用户错误概率（PUPE, per-user probability of error）^[4]。具体地，PUPE 定义如下：

$$P_{e,u} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K P[W_i \neq \hat{W}_i] \leq \varepsilon$$

即活跃用户的平均传输信息错误概率。

在 PUPE 定义下，文献^[19]推导了 AWGN 巨址无线通信系统，在满足给定 PUPE 要求下每比特传输功率的极限理论界。具体地，文献^[19]假定每个用户的传输信息比特固定，并且用户数随码长呈线性增长

(因此每个 $d.o.f$ 上的用户密度和频谱效率都是固定的)。在文献^[19]发现了以下两个重要的现象:

- 理论上存在一种编码方案, 在低频谱效率的情况下, 能完全消除多用户之间干扰。例如, 当每个用户传输 100 信息比特且频谱效率低于 1bps/Hz 时, 可以实现海量用户同时进行通信, 此时, 系统的每比特传输功率与每个用户在不存在多用户干扰时, 单独通信的每比特传输功率基本相同。文献^[18]称此为完美多用户干扰消除特性。
- 传统的正交多址接入方案如 TDMA, FDMA, CDMA 等不存在完美多用户干扰消除特性。因此, 当用户连接数增大时, 传统的正交多址接入方案, 在系统功率效率上与理论界会有明显的差距。

Yury Polyanskiy 研究组进一步考虑了准静态瑞利衰落 AWGN 信道下, 巨址无线通信系统功率效率的理论界^[20]。在衰落信道下同样也观察到了完美多用户干扰消除特性。同时, 与信道增益固定的 AWGN 信道相比, 在准静态瑞利衰落信道下, 需要更高的每比特传输功率来克服信道衰落的影响, 特别是在接收端不知道信道状态信息的情况下。另一方面, 衰落带来的随机性却也有助于解码器更好地区分不同用户。

图 2 绘制的是准静态瑞利衰落 AWGN 信道下每比特传输功率 vs 系统用户密度曲线图, 包括文献^[19]推导的理论极限上界与下界, TDMA 方案以及稀疏码多址接入 (SCMA: Sparse Code Multiple Access) 方案。图 2 中我们设 $\epsilon=0.1$, SCMA 方案采用 1/2 与 1/3 码率 Turbo 编码, QPSK 调制, 过载率 150%和 200%。从图 2 中我们可以看到, 当系统用户密度 μ 比较小, 即系统中接入用户数量不大的场景

中，TDMA 和 SCMA 方案的功率效率已经比较接近理论极限。然而对于巨址无线通信场景时当 μ 逐渐增大，TDMA 方案的性能与理论极限之间会出现一个明显的差距。同时，当 μ 逐渐增大，SCMA 方案所对应的过载率将变得很大，超过目前通常使用的 SCMA 码本所对应的过载率。因此，如何设计高功率效率的实际传输方案，支持高过载率海量用户通信，是目前协作巨址无线接入场景的关键工程挑战和难题。

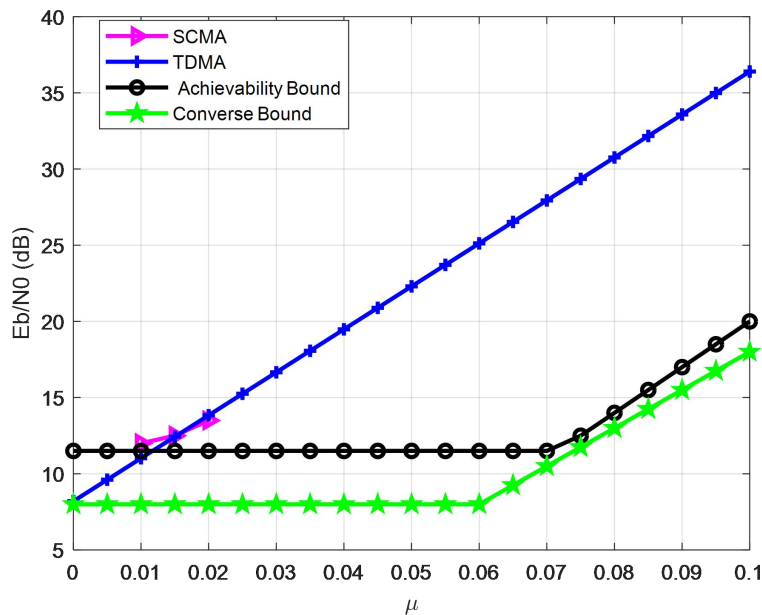


图 2 每比特传输功率 vs 网络用户密度曲线图

(二) 非协作巨址接入场景

目前，MIMO 大规模无源随机接入传输方案的频谱效率在 0.2-0.3 bit/s/Hz/天线左右，与工业界所要求的 0.75bit/s/Hz/天线仍然有差距较大。因此，如何设计满足实际系统需求的高频谱效率和功率效率传输方案是目前非协作巨址无线接入场景的关键工程挑战和难题。以下提

供一种设计思路。

(1) 编解码方案设计：大规模无源随机接入编解码器架构如图 3 所示。基于图中的架构，本研究计划从以下三个思路来进行编解码方案的设计：1) 利用用户码字之间的稀疏性来降低碰撞和干扰；2) 将信息比特拆成多个小块分散在连续的时隙进行传输，在每一时隙利用基于压缩感知或最大似然估计设计的活跃度检测算法恢复每小块的信息；3) 利用概率成型和离散调制信号自适应传输来逼近理想高斯信号下获得的理论界。

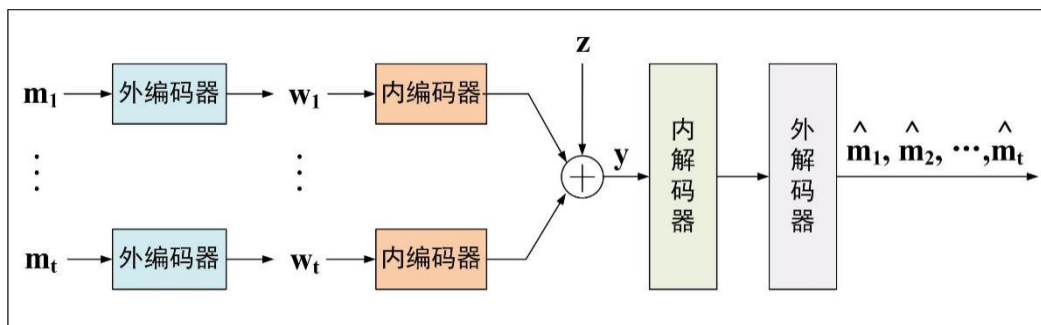


图 3 大规模无源随机接入编解码器架构

(2) 活跃用户检测和信道估计：由于无源随机接入无法给用户分配特定导频信号，传统海量用户通信中基于每个用户特定导频信号的活跃用户检测和信道估计算法无法适用于大规模无源接入场景。本研究计划深入探索基于压缩感知或最大似然估计的活跃用户检测迭代算法，利用实际无线信道空间和频域相关特性进行低复杂度的信道估计和信息译码。例如，利用大规模 MIMO 信道的角度域空间稀疏性降低内层（信道）编码的码长，并在压缩感知算法执行联合活跃度检测和信道估计的基础上，利用用户信道不同时隙间的强相关性，探索基于聚类的外层解码方法（如图 4），进而进一步提高编码速率和

频谱效率。

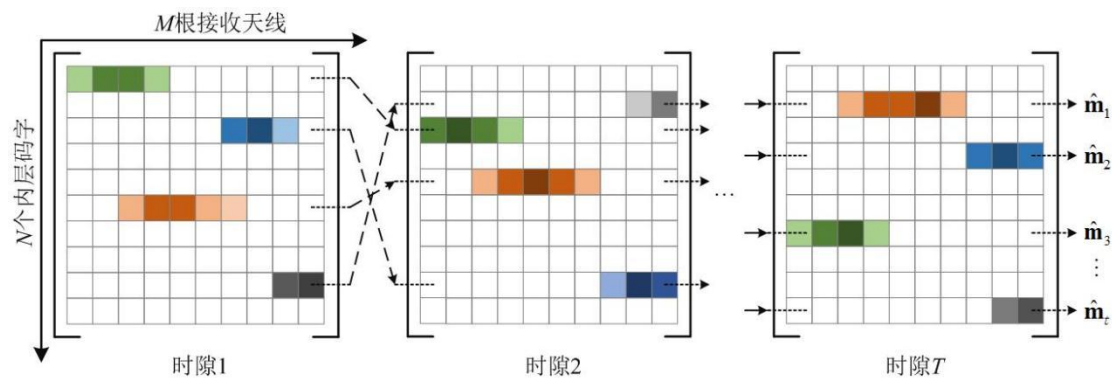


图 4 基于聚类的外层解码器工作示意图

五、政策建议

(一) 技术政策建议

目前巨址无线通信中有许多基础理论仍然未知。而这些基础问题的突破，很难一蹴而就，需要久久为功。因此，一方面需要鼓励、褒扬科研人员甘坐冷板凳，根据基础研究特点，营造相对自由宽松的科研环境，让科研人员可以集中精力潜心研究。另一方面，需要建立有利于基础理论原始创新的评价制度。一是推行代表作评价制度。对人和创新团队的评价，注重评价代表作的科学水平和学术贡献，让论文回归学术，避免唯论文、唯职称、唯学历、唯奖项倾向。同时，希望能加大对从事巨址无线通信基础理论研究财政支持力度，对相关研究团队和人员能保证长期稳定支持机制。

(二) 产业政策建议

巨址无线通信是未来移动通信产业中的关键技术。移动通信产业现在正进入到一个快速演进、快速迭代的时期，要抓住快速迭代的趋势，突破巨址无线通信核心技术。同时针对巨址无线通信打造学术界

与行业领军企业华为、中兴等公司的深度交流合作平台，促进巨址无线通信研究成果未来在行业中的标准化和实际系统应用。

参考文献

- [1] 3GPP RAN#84, https://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/TSG_RAN/TSGR_84/, 2019
- [2] J. Bradley, C. Reberger, A. Dixit, and V. Gupta, “Internet of everything: A \$ 4.6 trillion public-sector opportunity/more relevant, valuable connections will boost productivity, revenue, and citizen experience,” Cisco Systems, Inc., San Jose, 2013.
- [3] 5G Forum, “5G new wave/towards future societies in the 2020s,” 5G FORUM, Seoul, 2015.
- [4] Y. Polyanskiy, “A perspective on massive random-access,” in Proc. IEEE Int. Symp. Inform. Theory (ISIT), Aachen, Germany, Jun.2017, pp. 1–5.
- [5] Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s), <https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0040/en>, Feb. 2017
- [6] X. Chen, T.-Y. Chen, and D. Guo, “Capacity of Gaussian many-access channels,” IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 63, pp. 3516–3539, Jun. 2017.
- [7] E. de Carvalho, E. Björnson, J. H. Sørensen, E. G. Larsson, and P. Popovski, “Random pilot and data access in massive MIMO for machine-type communications,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 16, pp. 7703–7717, Dec. 2017.
- [8] L. Liu and W. Yu, “Massive connectivity with massive MIMO-part i: Device activity detection and channel estimation,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 66, pp. 2933–2946, Jun. 2018.
- [9] V. K. Amalladinne, J. -F. Chamberland, and K. R. Narayanan, “A coded compressed sensing scheme for unsourced multiple access,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 66, pp. 6509-6533, Oct. 2020.
- [10] A. Fengler, P. Jung, and G. Caire, “SPARCs for unsourced random access,” to appear in IEEE Trans. Inf. Theory, 2021. Online Available: <https://arxiv.org/abs/1901.06234>.
- [11] A. Pradhan, V. Amalladinne, A. Vem, K. R. Narayanan, and J. -F. Chamberland, “A joint graph based coding scheme for the unsourced random access Gaussian

- channel,” in Proc. IEEE Glob. Commun. Conf.(GLOBECOM), Waikoloa, HI, USA, Dec. 2019, pp. 1-6.
- [12] M. Zheng, Y. Wu, and W. Zhang, “Polar coding and sparse spreading for massive unsourced random access,” in Proc. IEEE Veh Technol Conf. (VTC2020-Fall), Victoria, BC, Canada, Nov. 2020, pp. 1-5.
- [13] A. Fengler, S. Haghghatshoar, P. Jung, and G. Caire, “Non-Bayesian activity detection, large-scale fading coefficient estimation, and unsourced random access with a massive MIMO receiver,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 67, pp. 2925-2951, May 2021.
- [14] F. Wei, Y. Wu, W. Chen, W. Yang, and G. Caire, “On the fundamental limits of MIMO massive multiple access channels,” in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC’2019), Shanghai, China, Jun. 2019, pp.1-6.
- [15] T. Ding, X. Yuan, and S. C. Liew, “Sparsity learning based multiuser detection in grant-free massive-device multiple-access,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 18, pp. 3569–3582, Jul. 2018.
- [16] M. Ke, Z. Gao, Y. Wu, X. Gao, and R. Schober, “Compressive sensing based adaptive active user detection and channel estimation: Massive access meets massive MIMO,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 68, pp. 764-779, Jan. 2020
- [17] T. Li, Y. Wu, M. Zheng, D. Wang, and W. Zhang, “SPARC-LDPC coding for MIMO massive unsourced random access,” in Proc. IEEE Glob. Commun. Conf.(GLOBECOM), Taipei, Taiwan, Dec. 2020, pp. 1-6.
- [18] Y. Polyanskiy, “Information-theoretic perspective on massive multiple-access,” North Americal School of Information Theory, Jun. 2018, Online Available: <http://people.lids.mit.edu/yp/homepage/data/NASIT18-MAC-tutorial.pdf>.
- [19] S. S. Kowshik and Y. Polyanskiy, “Fundamental limits of many-user MAC with finite payloads and fading,” Online Available: <https://arxiv.org/abs/1901.06732>.
- [20] Zadik, Y. Polyanskiy, and C. Thrampoulidis, “Improved bounds on Gaussian MAC and sparse regression via Gaussian inequalities,” Proc. IEEE Int. Symp.

Inform. Theory (ISIT'2019), Paris, France, Jul. 2019, pp. 1–5.

中国通信学会

地址：北京市海淀区万寿路 27 号院 8 号楼

邮政编码：100840

联系电话：010-68203021

传真：010-68203004

网址：<https://www.china-cic.cn/>

