



专题: 5G

5G 先进技术研究进展

林泓池, 孙文彬, 郭继冲, 麻津铭, 周永康, 于启月, 孟维晓
(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 5G 移动通信技术的标准制定正在如火如荼地进行中, 相比前几代移动通信技术, 5G 面临着更复杂的业务需求、更极致的用户体验和更密集的网络架构。而且 5G 需要在大数据和人工智能的时代到来之前, 做好万物互联的通信基础。对目前 5G 的一些热点技术进行了简单的介绍, 首先给出了 5G 的技术愿景和需求目标, 然后对大规模天线技术、超密集组网技术和非正交多址技术 3 个热点技术的研究进展情况进行了简单的阐述。

关键词: 5G; 大规模天线阵列; 超密集组网; 非正交多址接入

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018238

Research progress of 5G advanced technologies

LIN Hongchi, SUN Wenbin, GUO Jichong, MA Jinming,
ZHOU Yongkang, YU Qiyue, MENG Weixiao
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract: The standards of the 5th generation communication technology were picking up. Compared with previous generations' communication technologies, 5G will face more complex business requirements, more extreme user experience and more dense network architecture. Moreover, 5G needs to lay a good communication foundation for IoT before the arrival of the era of big data and artificial intelligence. Some hot technologies of 5G were briefly introduced. Firstly, the technical vision and demand target of 5G was given, and then the research progress of three hot technologies of massive MIMO, ultra dense network and non-orthogonal multi-access technology was expounded.

Key words: 5G, massive MIMO, UDN, NOMA

1 引言

随着大数据和万物互联时代的即将到来, 新

任务和新需求对移动通信网络发展提出了极大的挑战, 并积极地推进着 4G 时代向 5G 时代的转化。同时正值新兴技术的工业革命时期, 5G 作为新一

收稿日期: 2018-07-20; 修回日期: 2018-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61728104); 黑龙江省自然科学基金重点项目 (No.ZD2017013)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61728104), The Natural Science Foundation Major Project of Heilongjiang Province(No.ZD017013)

代的移动通信技术, 将为万物互联和人工智能的发展提供良好的通信保障。

一直以来新兴业务对通信质量的新需求和对通信环境的新愿景, 促进着整个通信行业的不断发展和通信技术的不断更迭。与前几代移动通信技术相比, 5G 的业务类型将更加丰富、复杂, 导致在面对不同业务、不同需求、不同场景的业务无法统一时, 5G 很难跟前几代的移动通信技术一样以某一种先进的关键技术作为基点形成解决方案来解决自己技术场景带来的困难和挑战。我国 IMT-2020 (5G) 推进组最开始根据 5G 需求和愿景, 分析讨论了 5G 所需面临的挑战和 5G 未来的愿景以及愿景中所需要的适用关键技术, 整理发布了 5G 概念白皮书^[1]。而在 2015 年 6 月, 国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 正式以 IMT-2020 命名 5G, 并根据业务需求特点及应用场景的不同, 定义了 5G 的三大应用场景: 增强移动宽带 (eMBB)、大规模机器类通信 (mMTC) 和超可靠低时延类通信 (uRLLC)^[2]。2018 年 6 月 14 日, 国际标准组织 3GPP 在美国举行全体会议, 5G 移动通

信技术标准方案获得批准并发布, 这标志着首个真正完整的国际 5G 标准正式出炉, 5G 已完成第一阶段全功能标准化工作, 进入了产业发展新阶段。

5G 挑战与关键技术对应框图如图 1 所示。

与现有 4G 相比, 用户数和用户需求的增加, 导致网络密集化和业务多样化, 同时 5G 还需要面对极致的性能要求, 这些无疑对 5G 提出了极大的挑战。参考文献[3]给出的挑战具体包括用户体验速率扩大 10~100 倍、更高的频谱利用率、毫秒级的端到端时延、大规模连接数扩大 10~100 倍、更低的开销以及良好的用户体验。除此之外, 为了实现与前几代移动通信网络的融合、过渡和可持续发展的要求, 5G 还需满足网络灵活部署和高效运营维护的要求。图 1 简单地描述了这些挑战以及 5G 独特的技术解决方案和相应的设计原则^[4]。

5G 愿景的提出引发了一系列通信技术的变革和应用, 在新频谱方面, 有扩展频谱资源的毫米波通信技术; 在通信模式方面, 有大规模天线阵列技术、非正交多址接入技术和全双工通信技术; 在组网模式方面, 有超密集组网技术和 D2D

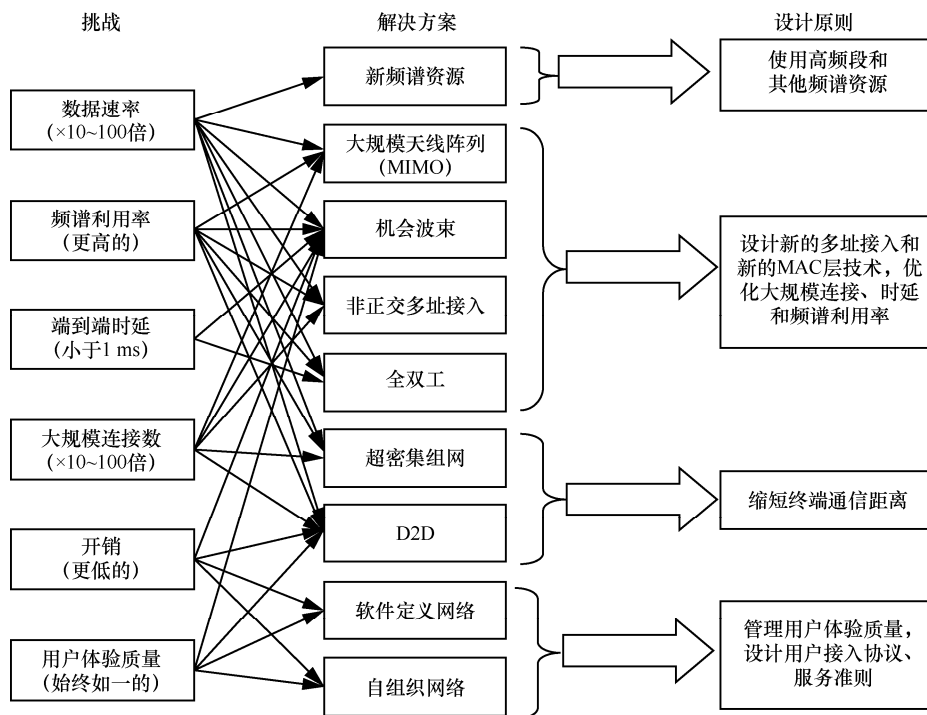


图 1 5G 挑战与关键技术对应框图^[3]



通信技术；在网络架构方面，有软件定义网络架构和自组织网络架构；在编码方面，有适用于长码的 LDPC 码和适用于短码的 Polar 码。随着这些技术的研究发展和实践，5G 的系统将不断得到完善，并且 5G 的性能也将不断得到提升^[3-6]。

本文将选取一些具有 5G 特色的先进技术进行介绍，并对其技术的研究现状与未来发展进行简单评述，内容包含 3 个方面：4G 的 MIMO 的改进技术——大规模天线阵列、5G 组网通信模式的愿景——超密集组网、5G 多址接入技术——非正交多址接入技术。

2 大规模天线阵列

如前所述，3GPP 规定了 5G 的三大应用场景，即 eMBB、mMTC 和 uRLLC。3 个场景的侧重点不同，对无线通信技术的要求也各不相同。而针对 eMBB 场景来说，要求量级在 10 Gbit/s 以上超高的信息传输速率。为了实现这么高速率的传输，可做的工作有：密集化节点、增加带宽、提升频谱效率^[7]。而在 4G 中的 MIMO 技术，一般是 8 根天线的 MIMO，所以为了进一步提升频谱效率，5G 的目光放在了大规模 MIMO 技术。

大规模 MIMO 概念最早于 2010 年被 Marzetta 在参考文献[8]中详细阐述。在提出之初，就以超高的频谱效率和极其简单的收发机结构引起了广泛的关注。随着研究热度和深度的增加，基于大

规模 MIMO 技术的相关理论研究越来越多，然而在实际工程中却出现了阻力。在大规模 MIMO 提出之初，采用全数字预编码方案对多用户干扰进行控制，如全数字迫零（zero-force, ZF）和全数字匹配滤波（matched filter, MF）^[8]。当信道衰落服从独立同分布时，全数字 MF 预编码方案可以最低的计算复杂度获得最佳的性能。但是该方案要求射频链路数等于发射天线数，也就意味着基站需要配有成百上千的射频链路。这样的要求在实际工程中会导致成本太高，能耗太高是不能被满足的。起初面对此困境，研究者想到了全模拟预编码方案，其仅仅需要等于独立数据流数的射频链路数，容易在实际场景中实现。但是全模拟预编码方案却存在旁瓣干扰，致使性能较差。

针对 5G 的高速率低功耗的绿色通信的理念，提出了在全数字与全模拟预编码方案之间取了一个折中的混合预编码，是目前的大规模 MIMO 研究热点^[9]。混合预编码方案由数字预编码和模拟预编码两部分组成，如图 2 所示，所需的射频链路数大于或等于独立数据流数但小于或等于 2 倍的独立数据流数^[9]，能逼近全数字预编码方案的性能。

如图 3、图 4 所示在平均和速率方面上，混合预编码的性能可以取得接近于全数字预编码的性能，且明显优于全模拟预编码的性能，如图 3 所示。而在平均能耗方面上，混合预编码的性能不

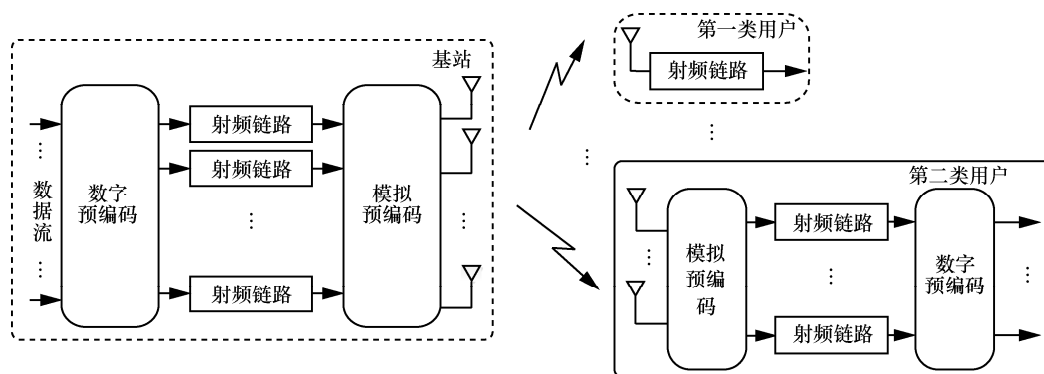


图 2 大规模 MIMO 混合预编码系统结构

如全模拟预编码的性能, 但比全数字预编码的性能好, 如图4所示。

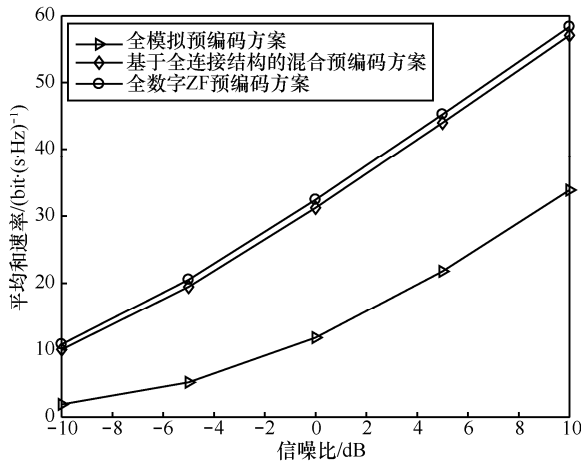


图3 线性预编码的平均和速率

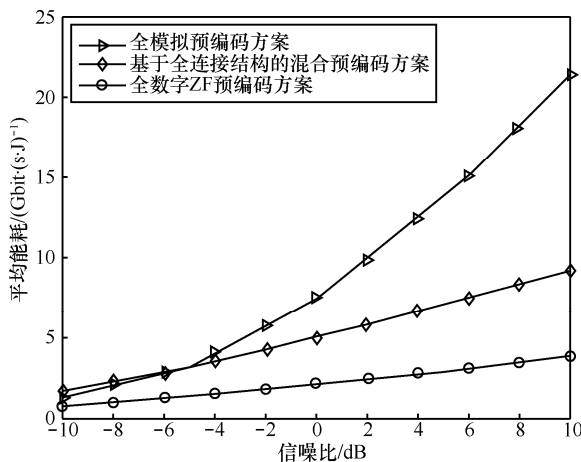


图4 线性预编码的平均能效

为了更好地理解大规模 MIMO 在 5G 愿景中

的应用, 本文将围绕两个研究热点展开具体技术细节的介绍, 即毫米波大规模 MIMO 波束成形技术和大规模 MIMO 机会波束成形技术。

2.1 毫米波大规模 MIMO

重视毫米波的研究和使用是 5G 的特点之一, 这主要是由于毫米波具有丰富的频率资源。然而单纯的毫米波技术本身带有路径损耗大的特点, 不适合远距离传输。所以将其与大规模 MIMO 结合, 在弥补毫米波技术本身缺陷的同时, 可以进一步提升系统的传输速率。毫米波大规模 MIMO 系统工作的频段在 30~300 GHz, 对应的波长在 0.1~1 cm, 十分有利于大规模天线阵列的部署, 从而为系统提供较高的阵列增益。此外, 由于高频电磁波的传播特性, 毫米波大规模 MIMO 系统的信道模型具有很强的视距路径分量。这两个特点为毫米波大规模 MIMO 波束成形技术提供了基础, 保证了其具有较低复杂度和较好性能的优点^[10-11]。

根据阵列所用天线的不同, 毫米波大规模 MIMO 波束成形技术可以分成两种: 基于透镜天线阵列和基于射频天线阵列的波束成形技术, 如图 5(a) 所示。特殊地, 经过精心设计的离散透镜天线阵列可以起到空域离散傅立叶变化的作用^[12]。在毫米波传播环境中, 由于毫米波本身易被散射体吸收, 不易被散射体反射, 导致散射簇的数量十分有限, 波束空间信道呈现一种稀疏性, 即有效波束的个数

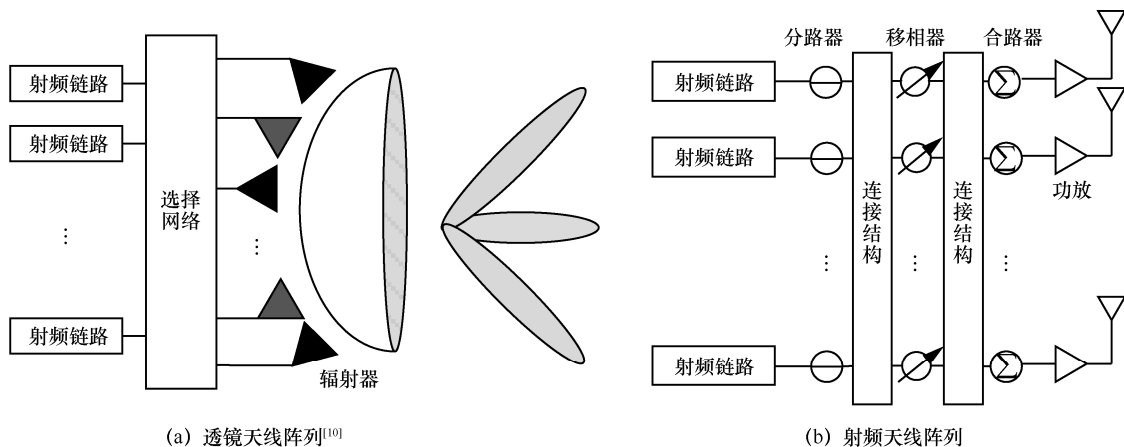


图5 基于不同天线阵列的毫米波大规模 MIMO 波束成形技术



比较少。合适的波束选择算法可以在保证一定系统性能的情况下，使得需要工作的辐射器数量骤减，从而大大减少所需的射频链路数。因此，当前基于透镜天线阵列的波束成形技术的主要研究方向就是设计合适的波束选择算法，目前已经有大量的算法被提出^[10-13]。

虽然透镜天线有着独特的特点，但是透镜天线生产效率低，不易构造，限制了透镜天线的使用。而普通的射频天线则没有这种缺点，且由其组成的大规模天线阵列可以拥有较小的旁瓣和后瓣，因此，基于射频天线阵列的波束成形技术引起了研究者的广泛关注^[11,14]。改变图 5 (b) 中的连接结构，可以得到不同的射频天线阵列结构。目前，射频天线阵列的结构主要有 4 种，分别是全连接结构（fully-connected architecture）、子阵列结构（array-of-subarray architecture）、过载子阵列结构（overlapped subarray architecture, OSA）以及自适应子阵列结构（adaptive array-of-subarray architecture）。基于上述天线阵列结构，通信研究者已经提出了很多优秀的波束成形方案，其目标函数涉及系统有效性、可靠性、能效等^[15,17]。

2.2 机会波束形成

传统的 MIMO 系统采用波束成形（预编码）技术来避免多个用户和数据流之间的干扰，从而提高系统性能。然而，波束成形技术最重要的前提条件是瞬时信道状况完全已知。因此，信道估

计技术对于 MIMO 系统的性能尤为重要。随着用户数目和天线数目的增加，信道估计技术的复杂性呈指数倍增加。并且在现实的物理环境中，信道估计技术的复杂性是极其高的，跟踪信道的瞬时状态从而获得完美的信道信息是一件不可能完成的任务。所以对于 5G 如果想要用大规模的天线来提高系统性能来说，在无法获得完美信道信息的状况下，传统波束成形的系统性能会有大幅度的下降。而机会波束成形可以在无法获得完美信道信息的状况下，依然保持一定的系统性能。并在用户密集的情形下，会有用户分集和系统简单能耗低的优点。所以机会波束成形可以作为 5G 物联网的备选技术之一。

机会波束成形系统模型如图 6 所示，即通过将多天线技术和多用户机会分配技术相结合，机会波束成形技术可以在低反馈链路的情况下获得多用户分集增益。在机会波束成形系统中，每一个传输天线 k 上都乘上一个随机的矩阵 W_k 。随机矩阵 W_k 和真实物理信道矩阵 H_k 的内积被定义为等效信道 h^{eq} ，其接收信号表达式如式 (1) 所示：

$$y_k = H_k W_k x_k + z_k = \sum_{n=1}^{N_T} h_n w_n x_k + z_k = h^{eq} x_k + z_k \quad (1)$$

其中， y_k 表示接收信号， H_k 为信道矩阵， W_k 为随机波束成形矩阵， x_k 为用户数据， z_k 为加性高斯白噪声， h_n 表示第 n 个天线的信道系数， w_n 表示第 n 个天线的随机成形系数。

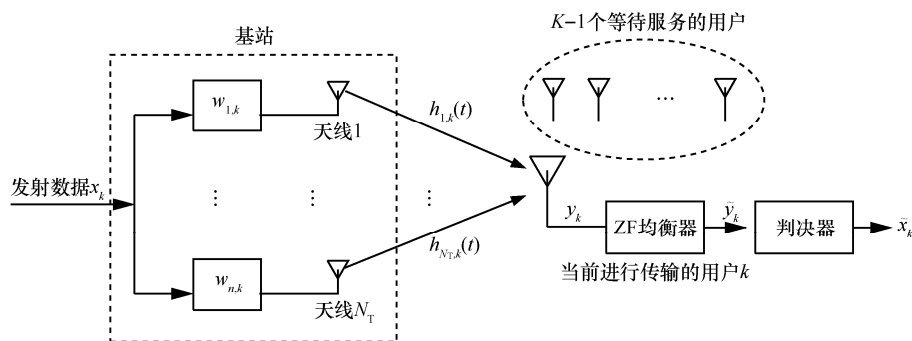


图 6 机会波束成形系统模型

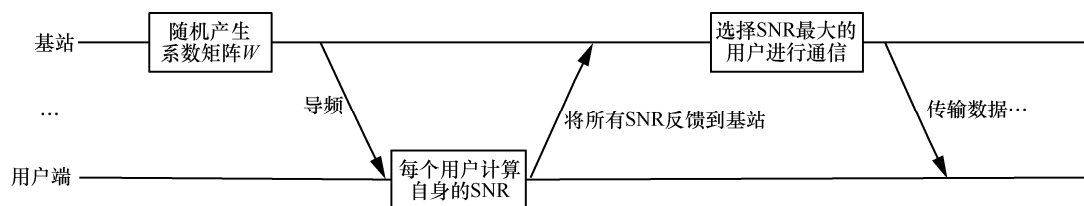


图7 机会波束成形传输结构

不同于传统的波束成形系统，等效信道决定了接收的信噪比和系统性能。在接收端，每个用户测量自身的信噪比来衡量等效信道的质量，并且将所测量的信噪比反馈给基站。其反馈的信噪比为：

$$\text{SNR}_k = \frac{|h_k^{\text{equ}}|^2}{2\sigma_{z_k}^2} \quad (2)$$

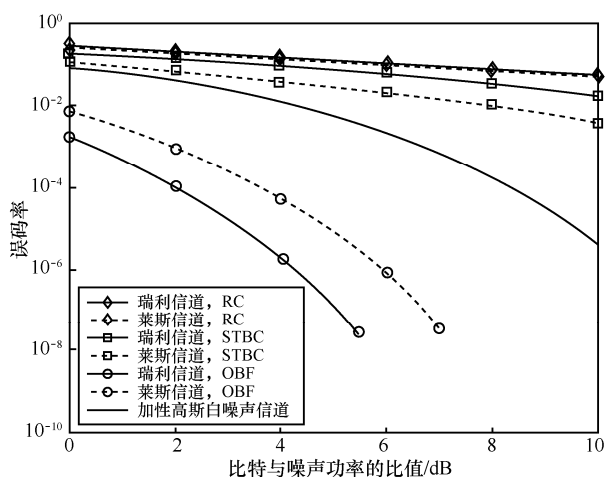
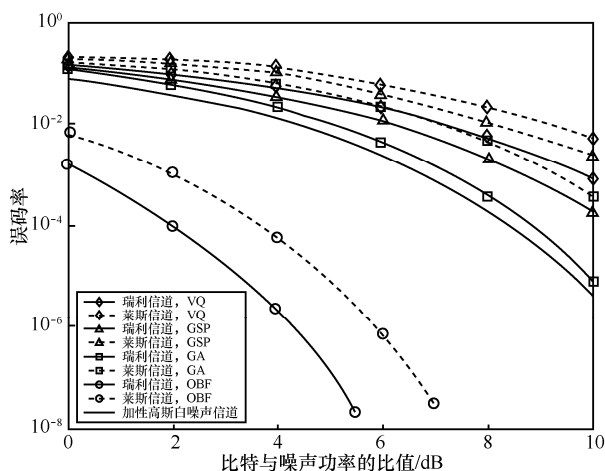
其中， $\sigma_{z_k}^2$ 为加性高斯白噪声的方差。这里对发射信号的功率进行了归一化。

基站根据反馈的信噪比选择最大信噪比的用户来传输数据，从而实现最大的系统容量和最小的误码率。其传输结构如图7所示。

与其他波束成形技术相比较，机会波束成形的波束成形矩阵设计比较简单，并且当真实的物理信道变化比较缓慢的时候，机会波束成形技术可以通过提高随机矩阵的变化速率来改善系统性能。同时由于机会波束成形技术并不需要较多的信道和用户信息，因此机会波束成形技术可以很容易地与其他多用户复用技术相结合，从而同时获得多用户分集和复用增益，例如时分多址—机会波束成形系统、频分多址—机会波束成形系统以及非正交多址—机会波束成形系统。

图8给出了机会波束成形技术与重复编码（repetition coding, RC）、空时编码（space-time block coding, STBC）在瑞利信道以及莱斯信道的误码性能的比较，与其他分集技术比较，可以看出机会波束成形技术有良好的误码性能。图9给出了机会波束成形技术与矢量量化（vector quantization, VQ）、格拉斯曼子空间包（Grassmannian subspace packing, GSP）技术^[18]以及基因算法

（genetic algorithm, GA）^[19]在低反馈情况下的误码率比较，可以看出机会波束成形技术的误码性能最好。因此可知机会波束成形技术可以实现最优的系统性能^[20]。

图8 机会波束成形与其他分集技术的误码率比较^[20]图9 机会波束成形与其他波束成形技术的误码率比较^[20]

然而对于机会波束成形技术而言，由于每个用户需要在被服务前加入等待队列，同时基站总是选择反馈信噪比最大的用户进行服务，用户之



间的公平性和用户服务的实时性很难得到保障，因此未来可以研究机会波束成形系统中的用户公平性问题，并提出一个基于用户实时性服务的改进机会波束成形系统。而且对于用户数目较少的情况，机会波束成形技术与传统的波束成形技术相比，并没有较大的性能优势。因此针对低用户数目情况下，如何提高机会波束成形系统性能也是未来研究机会波束成形技术的一个研究热点。

随着研究的不断深入，大规模 MIMO 作为 5G 应用中的核心技术之一被寄予了厚望，与现有技术结合的大规模 MIMO 也将会在 5G 应用上大展宏图。

3 超密集组网技术

与 4G 移动通信技术相比，5G 网络的容量需求将有 1 000 倍的增长，届时，通信终端无处不在，并且在大型的热点区域，如商场、露天展台等地方上将存在着大量的设备需要连接。与此同时，不同的移动终端会带来不同的业务需求，这也就导致了业务需求的多样化。这使得移动蜂窝小区里的用户越来越密集，简单的和单一的通信网络架构不足以支撑非常密集和业务多样化的蜂窝小区的用户需求。因此提出了一个异构网络架构的超密集组网（ultra dense network, UDN），将用于满足区域面积内超高的容量需求（即热点问题），为移动终端提供无缝的网络切换，让用户在任何时间、任何地点都能拥有超高速的上网和通话体验。超密集组网通过在宏基站（macro base station, MBS）的热点区域放置微基站（small base station, SBS）形成微小区提供了更高的频谱自由度，有效地提高了系统的单位面积谱效率，从而提升了系统的性能^[21]。

对宏小区中宏基站的部署一般多采用固定的格形部署，而微小区的微基站部署受周边环境和当地人流的影响。不仅如此，微小区的网络也呈现自组织性，不同层的网络架构之间也可能需要

协作和补偿，种种原因导致了对微小区网络的建模不能单单采用传统的基于格点的基站部署方式^[22]。同时由于用户在小区中呈现的分布不同，比如在某些热点区域（如展会中心区、景观区），用户分布较集中，呈现从中间向四周蔓延的趋势，而在其他区域，用户不会有明显的集聚效应，所以微小区的网络部署是超密集组网研究的难点和热点。

超密集组网在带来好处的同时，也带来了新的挑战，密集的网络使得基站之间的距离更近，随之带来的小基站之间干扰（inter cell interference）问题越发明显。不仅如此，网络的密集化也导致了小区中的干扰管理算法变得越发复杂。密集的组网也导致了很高的能耗^[23]，SBS 能提供的功率也不会像宏基站提供的功率那么强，有一定的约束，如何将有限的功率很好地利用，使服务的用户更多，提供的容量更大，基站的耗能更小，也是现在亟需解决的热点问题。因此需要有新的干扰管理技术，充分协调现有的或者将要部署的 SBS 之间的关系，从而消除或减小基站之间的干扰，提升用户服务质量（quality of service, QoS），提升网络的单位面积频谱利用率，达到蜂窝小区总吞吐量提升的目的。与此同时，在超密集组网场景下，基站之间距离较近，基站之间的协作更便利，因此也可以使用多点联合传输（coordinated multipoint, CoMP）技术进一步提升网络的性能。

图 10 显示了当路径损耗系数 $\alpha = 2$ 和 $\alpha = 4$ 的情况下，网络 100×100 中各个位置的遍历容量。可以看出 α 越大，随着用户距离基站的距离变大，用户的接收功率下降越快。导致用户接收到的有用信号的功率是降低的，但与此同时，由于 α 增大也使得用户接收到干扰基站的信号变小，因此，用户如何根据自己的路径损耗系数选取基站为自己服务，从而获得最大的遍历容量仍需要详尽的研究。

在超密集组网场景下，由于系统中的用户较

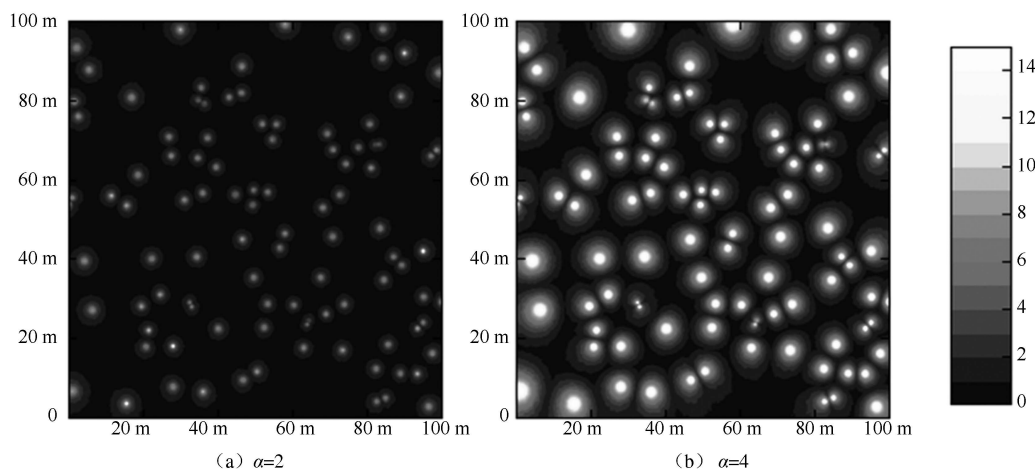


图10 网络中每个位置的遍历容量示意图

多、容量需求大和业务种类多样化,因此需要网络能够提供更高的单位面积的频谱利用率,更灵活的自适应资源调度策略^[24]。同时,随着通信逐步成为世界上最耗能的应用的发展趋势^[25],需要想办法在满足用户要求的同时,尽可能降低能耗,从而得到较高的能耗比。超密集组网(UDN)作为5G的关键技术之一,对其概念的描述、基站布置与基站协作的探索、网络的性能分析和具体干扰管理算法的研究,都将是未来超密集组网研究的重点和热点方向。

4 非正交多址接入技术

多址接入技术通常被看作现代移动通信系统的特征代表,从TDMA、FDMA、CDMA开始,到后来的OFDM和MIMO。随着正交多址接入技术的研究发展,多址接入技术已经逐步成熟,但仅利用正交多址接入(orthogonal multiple access, OMA)技术远远不能满足5G大连接、超密集的愿景。所以5G还需要开发出新型的多址技术。所以本着特殊到一般的研究思想,很容易就想到正交多址接入技术需要过渡到非正交多址接入(non-orthogonal multiple access, NOMA)技术^[26]。正交多址技术是通过在多个相互正交的资源块上去区分和服务不同用户的,而非正交多址技术则

是在同一资源块对不同的用户提供服务,即把多用户的信息进行叠加传输,这样不仅可以有效提高系统频谱效率,还可以提高基站服务的用户数,比较适合5G的万物互联和高频谱的愿景。所以5G除了支持传统的OFDMA技术外,还支持NOMA、SCMA等多种新型多址技术^[27-28]。

4.1 NOMA

单讲NOMA,一般指的是基于功率域复用的新型多址接入技术,以在接收端进行串行干扰消除算法实现对接收到的叠加信号进行译码。通过仿真系统的验证,NOMA与传统OMA相比,提高了吞吐量和频谱效率,然而串行干扰消除(successive interference cancellation, SIC)通过功率排序依次对用户进行译码,势必会造成对误码的累积效应^[29]。

虽然NOMA的吞吐量相比OMA提升了,但其是以牺牲误码性能换取的,即NOMA相比OMA增加了功率复用组内用户间干扰。所以在组内功率分配时,怎样分配使得吞吐量和误码性能达到一个权衡;同时对于复用用户之间怎样分组聚类,也是一个难点问题,虽然可以证明信道差异越大的两用户复用比随机两用户复用,系统性能的吞吐量有更大的提升,但其误码性能却较差(信道状态好的用户对信道状态差的用户干扰太



大，导致不能正常译码）；而且不同功率复用组间的功率怎么分配，使得整体系统吞吐量达到最优，也是一个热点问题；而且是否存在一种会比串行干扰消除译码方式更好的、适合 NOMA 的译码方式也有待研究；还有 NOMA 是否可以实现分集和复用同时存在？这样系统既有分集增益，又会有用户增益。

NOMA 组内两用户的误码率情况如图 11 所示，可以看出用串行干扰消除算法用户 2 可以直接检测得到自己的信息，而用户 1 需要先检测出用户 2 的信息，然后在接收的信号中减去用户 2 的信息，再检测才能得到自己的信息。可以看出对于用户 1 来说误码累积未必是件坏事。这是因为检测用户 2 的误码累积后，再经过判决可能会

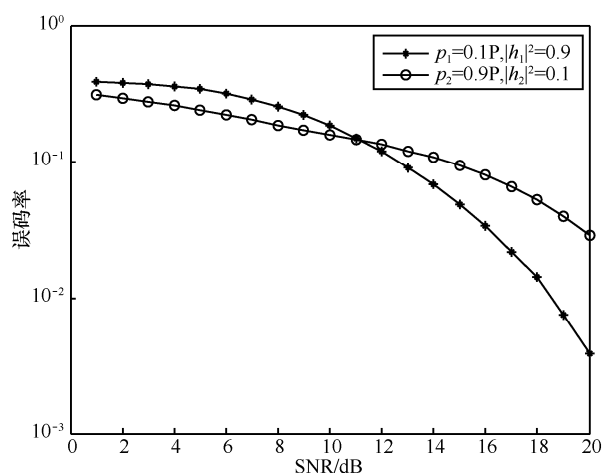


图 11 NOMA 组内两用户的误码率
($p_1/p_2=1/9, |h_1|^2=0.9, |h_2|^2=0.1$)

导致正确译码。所以串行干扰消除算法的误码分析还是需要详尽研究的。

除了以上 NOMA 本身的研究问题以外，NOMA 与其他技术的有机结合也是很有意思的课题，例如 OFDM 和 NOMA、MIMO 和 NOMA 等。

4.2 SCMA

2014 年，华为公司在参考文献[30]中提出了稀疏码多址接入 (sparse code multiple access, SCMA) 的概念，并认为 SCMA 可以看作低密度扩频 (low density spreading, LDS) CDMA 的扩展和推广。在 SCMA 系统中，正交振幅调制 (quadrature amplitude modulation, QAM) 映射和扩频的过程融合在一起，形成一个 SCMA 码本，为 SCMA 编码过程带来成形增益^[30]。像这样，每个传输层的二进制比特流都会根据码本直接映射成多维的复数码字，而用户通过不同的码字来实现共用信道，如图 12 所示，其中的每一列对应一组不同比特信息所映射的信号。

既然 SCMA 是码域的非正交多址接入技术，那么码本设计是 SCMA 中的一个核心问题，也是 SCMA 相关研究中比较具有挑战性的，SCMA 的码本可以形成一个多维的星座图，而多维星座图设计本身较为复杂^[31-32]。在 SCMA 码本设计问题中，不仅仅要设计一个性能较好的多维星座图，同时要保证各个用户能够相对独立地进行发送和接收，才能满足实际系统的应用需求。其次 SCMA 要面临接收机设计。由于不同的层可能会占用相

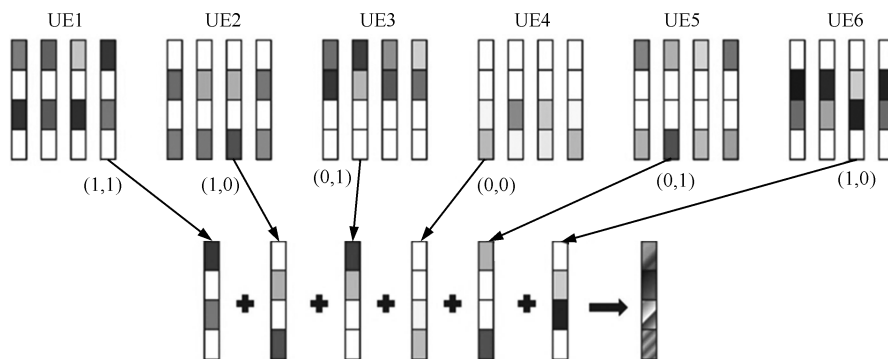


图 12 SCMA 原理示意图

同的时间（或频率）资源，SCMA 中区分用户就成为了技术难点。通常，在接收端使用一个非线性的多用户检测器（multi-user detector, MUD）来区分不同的、非正交的用户，最大似然（maximum likelihood, ML）准则是多用户检测的最优准则。然而，ML 准则的复杂度往往非常之高。考虑到 SCMA 的稀疏特性，可以利用消息传播算法来完成多用户检测。SCMA 的接收问题一直是该领域中热门的研究方向^[33]。

频选衰落信道 OFDM-SCMA 重复编码多天

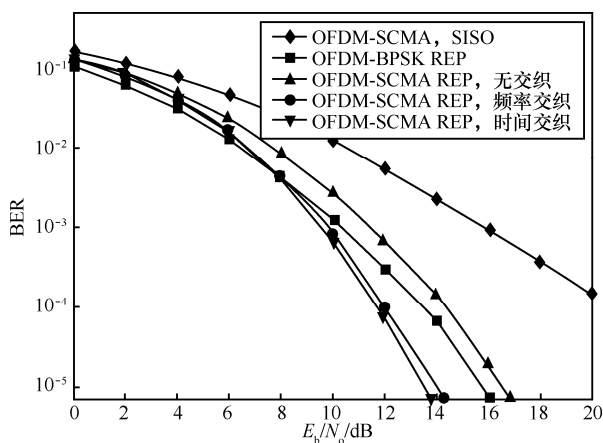


图 13 频选衰落信道 OFDM-SCMA 重复编码多天

线分集系统误码率如图 13 所示。

从图 13 中可以看出，使用重复编码多天线技术的 OFDM-SCM 系统的性能优于单输入单输出 OFDM-SCMA 系统在衰落信道下的性能，说明 MIMO 技术的引入为系统增加了可靠性。比较 SCMA 多天线系统与传统的正交多天线系统可以看出，在低信噪比时，SCMA 方案差于正交方案；同时还能看出，在不使用交织技术时，基于 OFDM-SCMA 的重复编码多天线传输系统的性能比使用 BPSK 调制的 OFDM 传输系统要差。这是因为 SCMA 码本的非正交特性为系统引入了干扰，使其性能本身比正交方案略差。使用频率交织技术后，同一 SCMA 信号的 K 个不同的投影可以映射到近似衰落独立的 OFDM 子载波上，从而

产生了频率分集作用。虽然使用频率交织技术的误码率略高于使用时间交织技术的误码率，但这是仿真假设条件所带来的差距。因为在仿真中，假设不同相干时间内的的信道系数是完全独立的，但 OFDM 子载波间的衰落系数是存在一定的相关性的。因此在实际的 OFDM-SCMA 系统中，频率交织和时间交织孰优孰劣要分具体情况讨论。

除了上述的 NOMA 和 SCMA，非正交多址接入技术还有中兴的多用户共享多址（multi-user shared access, MUSA）、大唐的图样分割多址（pattern division multiple access, PDMA）以及高通提出的资源扩频多址（resource spread multiple access, RSMA）等方案。在万物互联的 5G 愿景下，非正交多址接入技术绝对是一场多址技术的改革和创新，会使未来移动通信的无线接入技术达到一个新的高度。

5 结束语

本文首先从 5G 的发展开始介绍了 5G 需要面临的挑战和热点先进技术，然后分别从大规模天线阵列、超密集组网和非正交多址接入技术 3 个方面，对具有 5G 特色技术的研究热点和难点详细进行了阐述。5G 虽然面对了业务需求和用户体验两方面双重的挑战和考验，但各研究机构都积极地为 5G 的铺设进行着努力。距离预计 5G 商用的 2020 年已经不远了，然而 5G 标准的确定之路才刚刚开始，对于 5G 先进技术的研究仍还有大量工作需要完成。在不懈的努力后，未来的 5G 技术定会有一个更开放、更智能、更灵活、更丰富的移动通信技术。

参考文献：

- [1] IMT-2020(5G)推进组. 5G 概念白皮书[R]. 2015. IMT-2020 (5G) Propulsion Group. 5G concept white paper[R]. 2015.
- [2] ITU-R. IMT vision, framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond: ITU-R Document 5/199-E. M 2083-0[S]. 2015.



- [3] 张平, 陶运铮, 张治. 5G 若干关键技术评述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 15-29.
ZHANG P, TAO Y Z, ZHANG Z. Survey of several key technologies for 5G[J]. Journal on Communications, 2016, 37(7): 15-29.
- [4] AGYAPONG P, IWAMURA M, STAEBLE D, et al. Design considerations for a 5G network architecture[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(11): 65-75
- [5] 王祖阳, 杨传祥, 张进, 等. 5G 无线网技术特征及部署应对策略分析[J]. 电信科学, 2018, 34(Z1): 9-16.
WANG Z Y, YANG C X, ZHANG J, et al. Analysis of 5G wireless network technology characteristics and deployment strategy[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(Z1): 9-16.
- [6] 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(5): 551-563.
YOU X H, PAN Z W, GAO X Q, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques[J]. Scientia Sinica Informationis, 2014, 44(5): 551-563.
- [7] ANDREWS J G. What will 5G be?[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [8] MARZETTA T. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 11(9): 3590-3600.
- [9] SOHRABI F, YU W. Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale antenna arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(3): 501-513.
- [10] GAO X, DAI L, CHEN Z, et al. Near-optimal beam selection for beamspace mmWave massive MIMO systems[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(5): 1054-1057.
- [11] SONG N, YANG T, SUN H. Overlapped subarray based hybrid beamforming for millimeter wave multiuser massive MIMO[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 24(5): 550-554.
- [12] BRADY J, BEHDAD N, SAYEED A M. Beamspace MIMO for millimeter-wave communications: system architecture, modeling, analysis, and measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(7): 3814-3827.
- [13] SAYEED A, BRADY J. Beamspace MIMO for high-dimensional multiuser communication at millimeter-wave frequencies[C]//2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Dec 9-13, 2013, Atlanta, GA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2013: 3679-3684.
- [14] ZHU X, WANG Z, DAI L, et al. Adaptive hybrid precoding for multiuser massive MIMO[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(4): 776-779.
- [15] SOHRABI F, YU W. Hybrid analog and digital beamforming for mmWave OFDM large-scale antenna arrays[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(7): 1432-1443.
- [16] BUZZI S, D'ANDREA C. Energy efficiency and asymptotic performance evaluation of beamforming structures in doubly massive MIMO mmWave systems[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2018, 2(2): 385-396.
- [17] NGUYEN D H N, LE L B, LE-NGOC T, et al. Hybrid MMSE precoding and combining designs for mmWave multiuser systems[J]. IEEE Access, 2017 (5): 19167-19181.
- [18] AYACH O E, RAJAGOPAL S, ABU-SURRA S, et al. Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(3): 1499-1513.
- [19] LIANG L, XU W, DONG X. Low-complexity hybrid precoding in massive multiuser MIMO systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 653-656.
- [20] SUN W, YUE Q, MENG W, et al. Transmission mechanism and performance analysis of multiuser opportunistic beamforming in Rayleigh and Rician fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, (has been accepted).
- [21] SADR S, ADVE R S. Partially-distributed resource allocation in small-cell networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(12): 6851-6862.
- [22] ANDREWS J G, BACCELLI F, GANTI R K. A tractable approach to coverage and rate in cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(11): 3122-3134.
- [23] SOKUN H U, BEDEER E, GOHARY R H, et al. Optimization of discrete power and resource block allocation for achieving maximum energy efficiency in OFDMA networks[J]. IEEE Access, 2017 (5): 8648-8658.
- [24] HU B, WANG Y, WANG C. A maximum data transmission rate oriented dynamic APs grouping scheme in user-centric UDN[C]//2017 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), Sept 25-26, 2017, Jeju Island, South Korea. Piscataway: IEEE Press, 2017: 56-61.
- [25] BOLJEVIC S. Cost of optimal placement of a CHP plant within existing UDN[C]//2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM), June 6-9, 2017, Dresden, Germany. [S.l.:s.n.], 2017: 1-6.
- [26] TAO Y, LIU L, LIU S, et al. A survey: several technologies of non-orthogonal transmission for 5G[J]. China Communications, 2015, 121(10): 1-15.
- [27] 胡显安. 5G 新型非正交多址技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
HU X A. Research on 5G new non orthogonal multiple access technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [28] HONG S, BRAND J, CHOI J I, et al. Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 114-121.
- [29] 张德坤. 非正交多址系统功率分配及干扰消除算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
ZHANG D K. Algorithm of power allocation and interference cancellation for non-orthogonal multiple access systems[D].

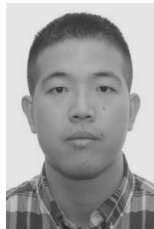
Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

- [30] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access[C]//2013 IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Sept 8-11, 2013, London, UK. Piscataway: IEEE Press, 2013: 332 - 336.
- [31] FORNEY G D, WEI L F. Multidimensional constellations. Part. I: introduction, figures of merit, and generalized cross constellations[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1989, 7(6): 877 - 892.
- [32] FORNEY G D. Multidimensional constellations. Part. II: voronio constellations[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1989, 7(6): 941- 958.
- [33] BAYESTEH A, NIKOPOUR H, TAHERZADEH M, et al. Low complexity techniques for SCMA detection[C] //2015 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), Dec 6-10, 2015, San Diego, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1 - 6.
- [34] TAHERZADEH M, NIKOPOUR H, BAYESTEH A, et al. SCMA for downlink multiple access of 5G wireless networks[C]//2014 IEEE Global Communications Conference (GlobeCom), Dec 8-12, 2014, Austin, TX, USA. Piscataway: IEEE Press, 2014: 3940 - 3945.
- [35] AU K, ZHANG L, NIKOPOUR H, et al. Uplink contention based SCMA for 5G radio access[C]//2014 GlobeCom Workshops (GC Wkshps), Dec 8-12, 2014, Austin, TX, USA. Piscataway: IEEE Press, 2014: 900 - 905.

[作者简介]



林泓池（1993-），男，哈尔滨工业大学硕士生，主要研究方向为超密集组网和非正交多址。



孙文彬（1990-），男，哈尔滨工业大学博士生，主要研究方向为无线通信、多天线技术以及预编码技术。



郭继冲（1992-），男，哈尔滨工业大学博士生，主要研究方向为无线信道建模、毫米波系统、预编码技术。



麻津铭（1994-），男，哈尔滨工业大学硕士生，主要研究方向为超密集组网。

周永康（1994-），男，哈尔滨工业大学硕士生，主要研究方向为稀疏码多址接入的码本设计和技术应用。

于启月（1982-），女，博士，哈尔滨工业大学电子与信息工程学院教授、博士生导师，主要研究方向为宽带无线通信、信息论与编码等。

孟维晓（1968-），男，博士，哈尔滨工业大学电子与信息工程学院教授、博士生导师，主要研究方向为无线移动通信、空天通信网络和卫星定位导航。