

U6G 超大规模 MIMO 技术



U6G Extra-Large Scale MIMO Technology

韩瑜/HAN Yu¹, 章嘉懿/ZHANG Jiayi², 金石/JIN Shi¹

(1. 东南大学, 中国 南京 210096;

2. 北京交通大学, 中国 北京 100044)

(1. Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202403011

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240619.1109.008.html>

网络出版日期: 2024-06-20

收稿日期: 2024-04-25

摘要: 为了满足不断攀升的数据传输速率需求, 扩大频带宽度、增加天线数量是直接有效手段。在 6G 应用场景与关键能力的驱动下, 6 425 ~ 7 125 MHz 频段 (U6G) 超大规模多输入多输出 (MIMO) 技术成为满足 6G 需求的潜在使能技术之一。基于 U6G 超大规模 MIMO 系统的天线形态及信道特征, 针对该技术面临的成本、开销、复杂度三重挑战, 提出高效能 U6G 超大规模 MIMO 无线传输的总体设计目标, 并展望其未来研究趋势。

关键词: 6G; U6G 频段; 超大规模 MIMO

Abstract: To meet the ever-increasing demand for data transmission rates, expanding the bandwidth and increasing the number of antennas are direct and effective means. Driven by 6G application scenarios and key capabilities, the 6 425 ~ 7 125 MHz frequency-band (U6G) extra-large scale multiple-input multiple-output (MIMO) technology becomes a candidate enabler to meet the requirements of 6G. Based on the RF and channel characteristics, the overall design goal of efficient U6G extra-large scale MIMO is proposed, to address the challenges in cost, overhead, and complexity. Finally, future research trends are discussed.

Keywords: 6G; U6G frequency-band; extra-large scale MIMO

引用格式: 韩瑜, 章嘉懿, 金石. U6G 超大规模 MIMO 技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(3): 67-71. DOI: 10.12142/ZTETJ.202403011

Citation: HAN Y, ZHANG J Y, JIN S. U6G extra-large scale MIMO technology [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(3): 67-71. DOI: 10.12142/ZTETJ.202403011

加快建设宽带移动通信网络是国家重大战略需求。随着宽带移动通信事业的蓬勃发展, 移动用户数和业务流量呈现爆炸式增长, 如何高效利用空频资源以满足快速增长的通信业务需求, 成为移动通信发展面临的巨大挑战。

1 U6G 超大规模 MIMO 技术简介

2020 年, 业界在全球范围内已开启 6G 的研究, 6G 将在 5G 万物互联的愿景基础上, 进一步发挥移动通信在更多种类、更广维度的应用场景中的作用。2023 年 6 月, 国际电信联盟发布《IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书》^[1], 实现 6G 第 1 阶段的愿景定义。

1.1 6G 关键能力

《IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书》

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFA0701602、2023YFC2205501); 国家自然科学基金项目 (62261160576、62301148); 江苏省重点研发计划项目 (BE2023022、BE20230221、BE20230222); 江苏省自然科学基金项目 (BK20230824)

描述了 IMT-2030 发展框架^[1], 并基于预设的应用场景规划了相关的 15 项 6G 关键能力。在这 15 项 6G 关键能力中, 9 项是从 IMT-2020 中发展而来, 包括峰值速率、用户体验速率、频谱效率、时延、可靠性等, 同时定义了新的 6 项关键能力, 包括感知、覆盖、定位等。

上述大部分 6G 关键能力均可通过增强宽带多天线技术来实现。以速率为例, 信息论研究结果表明, 信道容量与带宽、天线数呈正比。面对 6G 峰值速率的挑战性目标, 扩大带宽、增加天线数是满足需求的直接且有效的手段, 二者分别从频谱和空间维度对资源进行挖掘, 可实现数据传输速率的成倍提升。

1.2 U6G 新频谱

频谱是移动通信系统的重要资源之一, 每一代移动通信的诞生均伴随着新频段的开发, 这为新技术的发展提供更为适宜的频段环境。6G 的早期研究聚焦在 100 GHz 以上、尚未被移动通信开发的太赫兹频段, 以提供更大带宽的连续频谱。然而, 超高频段面临覆盖距离有限等关键难题, 并且对

射频芯片及器件的工作速率、功耗等要求较高。近两年业界逐渐将目光转移到 6~24 GHz 的厘米波频段。该频段同样可提供连续大带宽资源,且载波波长远大于太赫兹频段波长,路径损耗相对较小,电磁波绕射、穿透能力强,具有良好的无线覆盖性能。

2022 年 6 月,3GPP RAN#96 会议正式将 6 425~7 125 MHz 频段定义为 U6G 授权频谱,并决议通过了针对全 6 GHz 频谱(5 925~7 125 MHz)的 Release 18 立项工作。2023 年 6 月,中国工业和信息化部发布了新版《中华人民共和国无线电频率划分规定》^[2],并在全球范围内率先将 U6G 频段应用于 IMT(含 5G/6G)系统。U6G 频段横跨连续 700 MHz 带宽,频段本身接近 Sub-6 GHz,可继承并发扬 5G 中频段的全球化优势。

1.3 超大规模 MIMO

在空间维度,多天线技术被长期作为挖掘空间资源的基本手段。5G 提出大规模多天线技术,在基站(BS)侧配置大规模天线阵列,深度挖掘空间自由度,提高空间分辨率,增加空分复用维度。目前商用 5G 大规模 MIMO 天线数仅为数十至上百,为进一步提升多天线增益,超大规模 MIMO 技术应运而生^[3-5]。超大规模 MIMO 是大规模 MIMO 技术的主要演进方向,其思路是通过数量级式提升天线数量,使移动用户时刻处于天线环绕之中,为移动用户提供无缝衔接的高速率高质量通信服务。除增强型移动宽带等传统通信业务外,超大规模多天线同时获得感知物理环境的能力,进而赋能 6G 感知定位等新兴应用。

在 U6G 频段,相较于 5G 中广泛使用的 3.5 GHz 频段,由于波长缩小一半,相同面积内均匀平面阵列可容纳天线单元数增大 4 倍,因此该频段为集中式超大规模 MIMO 的部署提供了有利条件。U6G 频段集中式超大规模 MIMO 作为频谱和

空间资源挖掘的重要结合点,是 6G BS 的潜在部署形式之一。

2 U6G 超大规模 MIMO 天线形态

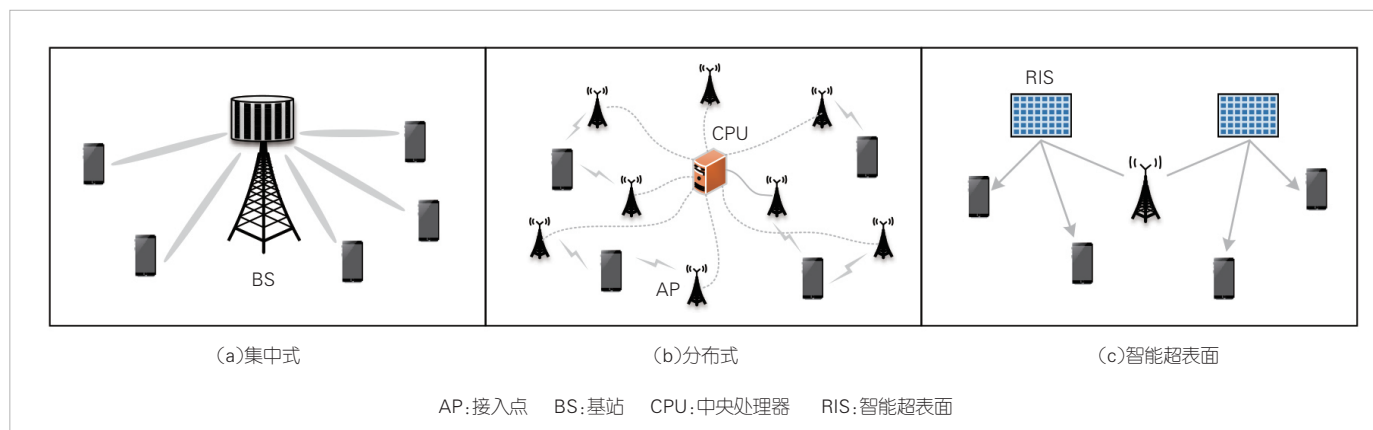
6 GHz 上半段,即 6 425~7 125 MHz 频段(U6G)超大规模多输入多输出(MIMO)天线数量可增加至 103 以上。超大数量天线的部署形式可多样化,除去上文提到的集中式,还存在分布式形态。不仅如此,我们还可将天线构成的传统射频模块替换为智能超表面,为第 3 种形态。

2.1 集中式形态

集中式形态是目前最为常见的天线阵列形态,如图 1(a)所示,天线集中配置在单个 BS 的同一射频模块上,此时 BS 集中控制和调度小区内的所有用户。我们在 U6G 集中式超大规模 MIMO 系统 BS 侧部署超大孔径天线阵列,阵列中所有天线均匀排布成线形、面型、或圆形阵列,更为通用的形式是面型阵列,相邻天线间距通常为载波波长的一半。以 64×32 面型阵列为例,若载波频率为 U6G 中心频点,即 6 775 MHz,水平和垂直相邻的天线间距均为半波长,则该阵列的尺寸为 $1.42 \text{ m} \times 0.71 \text{ m}$ 。集中式形态下可产生巨大的天线阵列增益,形成高空间分辨率的极窄波束,有利于能量聚焦及多用户空分复用。

2.2 分布式形态

当天线数量较大时,天线就出现了分布式部署形式,即分布式形态,对应分布式超大规模 MIMO 或无蜂窝小区(CF)大规模 MIMO^[6]。在该形态下,大量天线在物理上分散开来,在环境内遍布天线,这使用户时刻处于天线环绕之中,如图 1(b)所示。系统中的接入点(AP)数量较大,所有 AP 受控于同一个中央处理器(CPU),单个 AP 可以配



▲图1 U6G 超大规模多输入多输出(MIMO)的3种天线形态

置少量天线组成的一个小型阵列，甚至仅配置单天线。此时，移动通信将“以小区为中心”的工作模式转换至“以用户为中心”，与目标用户临近的多个 AP 之间可协同为用户提供服务。用户跳脱了小区的约束，省去了在小区间频繁切换的过程。另外，用户与 AP 之间的距离较近，降低了大尺度衰落。

2.3 智能超表面

近年来，智能超表面技术迅猛发展^[7-8]。智能超表面是一种低成本、低功耗的可编程超表面，由大量响应可灵活独立配置的单元均匀排布构成。无线通信系统中常用的智能超表面为反射型超表面，通过调整反射单元的反射系数，使入射电磁波反射至目标方向，进而替代集中式天线阵列完成波束赋形和空间能量分布的重新配置，如图 1 (c) 所示。然而，为保持智能超表面的低成本低功耗优势，通常不是所有单元都配置射频链来实现信号的调制解调等功能，这是与传统天线的区别。

3 U6G 超大规模 MIMO 无线信道

准确了解 U6G 超大规模 MIMO 无线信道特征是获取该技术所带来增益的重要前提。由于 U6G 超大规模 MIMO 技术提出的时长有限，截至目前业界相关的研究积累主要集中于 U6G 频段无线信道测量和超大规模 MIMO 空间非平稳效应这两部分内容。

3.1 U6G 频段无线信道测量

U6G 频段介于 Sub-6 GHz 及毫米波频段之间，我们可基于这两个频段的信道特性对 U6G 信道特性进行预测性判断。U6G 更贴近 Sub-6 GHz 频段，信道特性应更偏向 Sub-6 GHz。这一推断在北京邮电大学的实测结果中得到证实。研究人员在对比了 3.3 GHz、6.5 GHz、15 及 28 GHz 频段下的路径损耗及均方根时延扩展后发现，路径损耗随着频率的增加而增加，6.5 GHz 信道与 3.3 GHz 信道均表现出较大的时延扩展，并且两者差异较小^[9]。然而，实测结果同样表明，U6G 信道无法用现有的第 3 代合作伙伴计划 (3GPP) 模型进行准确建模。U6G 信道建模是现阶段亟待解决的问题。

3.2 空间非平稳效应

当采用集中式超大规模 MIMO 或智能超表面时，阵列孔径往往较大。此时，用户落入阵列近场区域，广义空间平稳特性不复存在，空间非平稳效应出现^[4]。在到达阵列不同区域的过程中，信号将经历不同的传播环境，并沿不同的传播

路径到达阵列。即使环境中的传播路径相同，但同一路径在不同天线上的能量并不相同。对天线阵列响应矢量而言，空间非平稳效应表现为球面波相位和能量幅度波动。在阵列不同区域，我们将看到不同用户，每个用户所发送的信号在到达阵列时，能量仅集中在阵列小片区域，即可视区域。

空间非平稳信道建模、估计和收发机设计的相关研究已陆续开展，但多数研究仅聚焦于近场球面波或可视区域。近场球面波相关研究多数重在探寻球面波信道稀疏变换形式，包括笛卡尔域、极域变换，以及相应的码本设计、波束赋形、多用户空分传输设计等；可视区域相关研究则主要聚焦于用户和路径层面的可视区域识别，以及利用可视区域的多用户无干扰接入和调度、分布式接收机等。

综合 U6G 频段现有测量结果和超大规模 MIMO 特点，我们可以预见 U6G 超大规模 MIMO 信道测量和建模仍是当前阶段研究重点。集中式超大规模 MIMO/智能超表面信道具有接近 Sub-6 GHz 的时延域扩展等路径成簇的特性，因此在建模和测量时还需考虑包括近场球面波和可视区域的空间非平稳效应。

4 U6G 超大规模 MIMO 成本挑战

U6G 超大规模 MIMO 是 5G 大规模 MIMO 的重要演进形式。随着天线数量的进一步增加，5G 大规模 MIMO 也面临着一些成本挑战，包括硬件造价过高、信道状态信息获取所需的训练及反馈开销过大、收发机的计算复杂度过高等问题。这些问题在 U6G 超大规模 MIMO 系统中依然存在，甚至更为显著。

4.1 硬件造价

Sub-6 GHz 频段天线尺寸较大，BS 天线数相对 U6G 频段而言也较少，因此可采用全数字架构。该架构可以为每个天线配备一条独立的射频通道进行信号收发。在 U6G 频段，集中式超大规模 MIMO 形态可利用阵列增益对抗成倍增加的路径损耗，然而此时若沿用全数字架构，则会造成硬件造价过高。因此，低成本实现方式仍是值得研究的重要课题。若沿用 5G 大规模 MIMO 混合波束成形架构以节约射频通道，则还需同时考虑超大阵列的部署环境、批量生产及运输等综合因素。此时，子阵列形式更具优势，在子阵列内部采用低成本混合波束成形架构，多个子阵列可灵活运输和拼接组装。

在分布式超大规模 MIMO 架构下，单个无线接入点的天线数量较少，而接入点数量庞大。为节约射频硬件成本，既可考虑在单个接入点部署上述单个低成本子阵列，也可沿用

5G 所引入的低分辨率模数转换器 (ADC)。例如, 当单个 AP 仅配置单个 U6G 天线时, 射频通道数无法进一步降低, 此时采用低分辨率 ADC 是降成本途径之一。由于 U6G 频带较宽, 单位时间内数据处理量较大, 对 ADC 处理速度要求较高, 因此在成本受限约束下, 需选择高速、低分辨率 ADC。

4.2 训练及反馈开销

当 U6G 超大规模 MIMO 采用频分双工 (FDD) 模式时, 由于上下行信道不再具有互易性, 即使在全数字架构下, 上行训练阶段所获信道估计结果也无法直接用于下行传输方案设计, 为完成下行信道估计, 需要大量的下行正交导频以区分不同 BS 天线, 并且用户侧完成下行信道估计后, 反馈估计结果所需开销依然较大。

集中式形态下, 由于天线数与子载波数远大于信道中的散射体数, 我们可挖掘 U6G 超大规模 MIMO 信道稀疏性, 进而利用压缩感知等稀疏信道估计方法, 将高维信道估计问题转化为低参量化参数估计问题。考虑到超大规模 MIMO 信道空间非平稳效应, 待估信道参数相比传统 5G 大规模 MIMO 仅需估计方向角、时延, 增加了用户/散射体相对阵列的距离参数估计。截至目前, 已有相关研究成果可支持近场用户和散射体定位, 然而此类方法仅面向时分双工 (TDD) 系统, FDD 下的低开销空间非平稳下行信道估计研究相对空白。

4.3 模型及计算复杂度

在集中式形态下, 近场球面波波前下的天线阵列响应矢量不再满足等相特性, 其相位差由用户或散射体与阵列参考点的相对位置决定, 涉及求取平方根的运算。这会使信道模型进一步复杂化, 近场球面波带来的模型复杂度过高问题同样是 U6G 超大规模 MIMO 面临的一大挑战。此外, U6G 超大规模 MIMO 射频和基带算法常需对高维信道矩阵直接处理。以常用的迫零预编码为例, 其算法复杂度为 $O(N^3)$, 其中 N 为阵列天线数, 数值在 10^3 量级, 此时迫零预编码复杂度过高, 对算力要求极为苛刻, 面临无法实现的难题。

解决 U6G 超大规模 MIMO 复杂度过高的途径之一是引入分布式的概念, 实现“分而治之”。针对模型复杂度过高问题, 可将集中式超大阵列拆分为多个子阵列。此时对单一子阵列而言, 用户仍处于传统远场范围内, 信道模型从复杂近场退化为简单远场。针对计算复杂度过高问题, 我们可在总控的 CPU 之外, 以部分邻近天线为一组, 为其增配分布式或本地处理器, 并将高维计算分散到本地, 这种分布式计算

在集中式和分布式天线形态下均可应用^[10]。

5 U6G 超大规模 MIMO 未来研究方向

面对来自成本、开销、复杂度的三重挑战, U6G 超大规模 MIMO 未来研究当以高效能无线传输作为总体设计目标, 利用新兴优质技术克服关键难题, 发挥大带宽、超多天线优势, 支撑业务与应用拓展, 同时前向兼容历代系统, 实现 U6G 超大规模 MIMO 技术在现网中的快速落地。

5.1 人工智能

作为新质生产力的“牛鼻子”, 人工智能在移动通信系统中已得到广泛应用。面向 U6G 超大规模 MIMO 系统, 人工智能是克服上述成本、开销、复杂度难题的关键技术。为在低成本硬件约束下实现信号的高质量传输, 利用深度学习神经网络的端到端学习可跳过对低成本射频模块的单独处理, 直接对发送信号进行解调和恢复。在信道估计过程中, 针对信道矩阵维度过大以及空间非平稳效应导致信道模型复杂度过高问题, 可借助深度学习神经网络等, 以接收导频信号或变换域稀疏导频信号为输入, 快速输出估计信道矩阵或稀疏路径参数, 从而指导后续收发机设计等重要环节。此外, 为解决算法计算复杂度过高问题, 可依托联邦学习机制, 通过分布式计算和模型参数共享, 实现去中心化信道估计和信号检测。

5.2 通感一体化

通信与感知一体化是未来移动通信发展方向之一。基于通信信号的感知, 其底层逻辑是对物理环境及环境中的物体所造就的无线信道进行学习, 进而反向感知物理环境, 推测目标物体位置及速度, 感知呼吸、心跳、识别手势等。其中, 感知定位算法通常需利用较大频宽完成测距任务, 并借助多天线系统完成空间方向角估计, 随后基于距离和角度实现位置信息的获取。U6G 超大规模 MIMO 可提供连续数百兆带宽以及超多天线带来的超高空间分辨率, 为环境感知、目标定位带来了巨大便利。目前通感一体化技术处于蓬勃发展期, 显现出多传感器融合的趋势。该技术可以综合利用无线信号、全球定位信号、光探测和测距信号等, 协同完成感知任务。U6G 超大规模 MIMO 提供了优质的无线信号, 可降低对其余传感器信号的依赖。

5.3 跨频段协同

U6G 作为移动通信新频段被首次应用, 其部署形式、无线传输方案仍值得深入研究。中国暂未商用化部署毫米波

BS, 目前使用的 2G~5G 移动通信系统 BS 工作在 900 MHz、1.8 GHz、2.6 GHz、3.5 GHz 等低频频段。4G LTE 在中国的市场占有率较高, 组网投入大; 5G 商用化时长有限, 已部署的 5G BS 经较长服役时间后方可实现盈利。因此, 当在现网中部署 U6G 频段 BS 时, 4G 与 5G 低频 BS 仍在使用中, U6G 频段 BS 可与 4G/5G BS 共址, 或为 U6G 频段 BS 重新选址。此时, 跨频段协同将成为研究关键点, 如何选择合适的 U6G 频段 BS 部署位置, 如何设计跨频段资源调度及无线传输方案设计, 是需要思考的问题。U6G 频段路径损耗大约是 3.5 GHz 等低频的两倍及以上, 5G 毫米波非独立组网形式是可参考架构之一。考虑到 U6G 可部署超大规模天线, 集中式形态可利用阵列增益对抗路径损耗, 分布式形态通过小型化小区或 CF 技术同样可避免路损问题。此时可利用 4G/5G BS 实现基本覆盖, U6G BS 完成容量提升、新应用赋能等任务。

6 结束语

U6G 超大规模 MIMO 技术是实现 6G 关键能力的重要使能技术, 在新频段提供连续数百兆带宽, 以集中式/分布式天线或智能超表面形态实现对空间资源的极致挖掘, 为通信性能的提升和新应用的赋能带来机遇。然而, U6G 频段相关研究尚处于初级阶段, 信道体现新特性, 同时超多天线带来成本、开销、复杂度等多重挑战。建议未来业界可以以高效能 U6G 超大规模 MIMO 无线传输为总体设计目标, 利用人工智能解决关键问题, 推动通感一体化发展进程, 以跨频段协同实现 U6G 超大规模 MIMO 技术的快速落地。

参考文献

- [1] ITU-R. Overview timeline for IMT towards the year 2030 and beyond [EB/OL]. [2024-04-20]. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0a/06/R0A060000C80001PDFE.pdf
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 中华人民共和国无线电频率划分规定 [EB/OL]. [2024-04-20]. https://wap.miit.gov.cn/cms_files/filemanager/1226211233/attach/20236/d1dc19424d5a4cfe90d631adeee8dd58.pdf
- [3] BJÖRNSON E, SANGUINETTI L, WYMEERSCH H, et al. Massive MIMO is a reality—what is next? [J]. Digital signal processing, 2019, 94: 3–20. DOI: 10.1016/j.dsp.2019.06.007
- [4] DE CARVALHO E, ALI A, AMIRI A, et al. Non-stationarities in extra-large-scale massive MIMO [J]. IEEE wireless communications, 2020, 27(4): 74–80. DOI: 10.1109/mwc.001.1900157
- [5] HAN Y, JIN S, MATTHAIIOU M, et al. Toward extra large-scale MIMO: new channel properties and low-cost designs [J]. IEEE Internet of Things journal, 2023, 10(16): 14569–14594. DOI: 10.1109/jiot.2023.3273328
- [6] ZHANG J Y, BJORNSEN E, MATTHAIIOU M, et al. Prospective multiple antenna technologies for beyond 5G [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(8): 1637–1660. DOI: 10.1109/jsac.2020.3000826
- [7] HAN Y, TANG W K, JIN S, et al. Large intelligent surface-assisted wireless communication exploiting statistical CSI [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2019, 68(8): 8238–8242. DOI: 10.1109/tvt.2019.2923997
- [8] TANG W K, CHEN M Z, CHEN X Y, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: path loss modeling and experimental measurement [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(1): 421–439. DOI: 10.1109/TWC.2020.3024887
- [9] MIAO H Y, ZHANG J H, TANG P, et al. Sub-6 GHz to mmWave for 5G-advanced and beyond: channel measurements, characteristics and impact on system performance [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(6): 1945–1960. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3274175
- [10] AMIRI A, REZAEI S, MANCHON C N, et al. Distributed receiver processing for extra-large MIMO arrays: a message passing approach [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(4): 2654–2667. DOI: 10.1109/twc.2021.3114380

作者简介



韩瑜, 东南大学移动通信国家重点实验室副研究员; 主要研究领域为超大规模 MIMO 无线传输; 主持和参加基金项目 5 项, 获得 2 项科研成果奖; 已发表论文 70 余篇, 授权国家发明专利 10 余项。



章嘉懿, 北京交通大学教授; 主要研究领域为大规规模 MIMO 基础理论和关键技术; 先后主持和参加基金项目 10 余项, 获得 3 项科研成果奖; 已发表论文 100 余篇, 授权国家发明专利 10 余项。



金石, 东南大学移动通信国家重点实验室教授、博士生导师, 教育部“长江学者奖励计划”特聘教授, 国家自然科学基金杰出青年科学基金获得者, 国家“万人计划”科技创新领军人才; 主要研究方向为移动通信理论与关键技术、物联网理论与关键技术, 以及人工智能在无线通信中的应用等, 研究成果获得省部级科学技术一等奖 5 项; 已发表论文 700 余篇, 获授权国际/国家发明专利 100 余项, 出版专著 2 部、教材 1 部。