

# 6G无蜂窝大规模MIMO 关键技术研究进展



## Research Progress on Key Technologies of 6G Cell-Free Massive MIMO

尤肖虎/You Xiaohu<sup>1,2</sup>, 王东明/Wang Dongming<sup>1,2</sup>,  
曹阳/Cao Yang<sup>2</sup>

(1. 东南大学移动通信全国重点实验室, 中国 南京 210096;  
2. 紫金山实验室, 中国 南京 211111)

(1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202601006

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.tn.20260226.1443.002>

网络出版日期: 2026-02-26

收稿日期: 2025-12-22

**摘要:** 在6G标准化商用初期 (Day-1), 无蜂窝技术受到了广泛关注。系统梳理了面向6G的无蜂窝通信所涉及的关键支撑技术, 包括分布式收发机架构、信道信息获取与测量机制、频谱资源融合与灵活双工设计, 以及分布式资源管理策略等。在此基础上, 提出了一种基于数字孪生增强的无蜂窝传输优化方法, 进一步提升了系统性能。同时, 展示了面向高频段的无蜂窝大规模多输入多输出 (MIMO) 试验验证结果, 验证了相干联合传输在实际系统中的可行性。最后, 探讨了无蜂窝大规模MIMO与通感一体化融合的潜在研究方向, 为未来系统设计提供了新思路。

**关键词:** 6G; 无蜂窝大规模MIMO; 大规模协作收发点

**Abstract:** Cell-free technology has attracted considerable attention in the Day-1 phase of 6G standardization. Key enabling technologies for cell-free systems in 6G standardization are systematically reviewed, including distributed transceiver design, channel state information acquisition and measurement, spectrum fusion and flexible duplex design, as well as distributed resource allocation strategies. Building on this foundation, a digital twin-enhanced optimization method for cell-free transmission is proposed to further improve system performance. Experimental results for high-frequency cell-free massive multiple-input multiple-output (MIMO) are presented, which validate the feasibility of coherent joint transmission in practical systems. Finally, potential research directions for the integration of cell-free massive MIMO with integrated sensing and communication are discussed, offering new insights for future system design.

**Keywords:** 6G; cell-free massive MIMO; large-scale cooperative transmission and reception points

**引用格式:** 尤肖虎, 王东明, 曹阳. 6G无蜂窝大规模MIMO关键技术研究进展 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(1): 29-37. DOI: 10.12142/ZTETJ.202601006

**Citation:** You X H, Wang D M, Cao Y. Research progress on key technologies of 6G cell-free massive MIMO [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(1): 29-37. DOI: 10.12142/ZTETJ.202601006

随着第3代合作伙伴计划 (3GPP) 6G标准化工作的推进, 6G空口 (6GR) 在商用初期 (Day-1) 计划支持的核心技术成为业界的关注焦点。目前, 全球多家企业与科研机构相继提出6GR总体技术的观点。其中, 多输入多输出 (MIMO) 技术作为提升移动通信系统容量的关键手段, 在6G研究中备受关注。

学术界和工业界对MIMO技术的研究已持续近30年, 形成了较为完整的技术演进脉络。从3G演进版本到5G

Release 15 (R15), 集中式MIMO逐步形成了以波束赋形和预编码为核心的技术体系, 成为系统的基础配置。理论上, 分布式多天线 (D-MIMO) 被视为MIMO的更一般化形式<sup>[1]</sup>。在学术层面, 相关研究经历了从分布式天线系统、分布式MIMO到无蜂窝大规模MIMO的演进; 在工业界, 4G阶段引入了协作多点传输 (CoMP) 概念, 5G演进中则逐步形成了以多收发点 (mTRPs) 为核心的技术框架。经过20余年的持续研究, D-MIMO逐渐呈现出向大规模协作传输和去蜂窝化方向发展的趋势。

在5G新空口 (NR) 标准的演进过程中, 从R15到R19, MIMO及D-MIMO的性能与场景适应能力持续增强。

基金项目: 国家科技重大专项 (2025ZD1305100)

R15奠定了大规模MIMO的基本架构；R16至R18阶段，重点增强了对高速移动场景的测量上报能力，完善了码本设计，并逐步引入上行mTRP接收与下行非相干联合发送(NCJT)方案。为支持更高效的相干联合传输(CJT)，R19进一步制定了针对TRP间非理想时频同步与非互易收发通道的测量与反馈机制<sup>[2]</sup>。总体而言，mTRP技术涉及上行功率控制、定时提前(TA)调整、相干/非相干传输方法、信道状态信息(CSI)反馈、波束管理以及TRP间的时频同步等多个物理层关键技术环节。3GPP在继承4G准共址(QCL)概念的基础上，持续完善测量与反馈机制，逐步构建起以传输配置指示(TCI)为核心的技术体系<sup>[3]</sup>，在一定程度上实现了以用户为中心的多TRP协作传输。

在当前R19协议框架下，单个5G基站(gNB)可支持多个TRP，进而实现了小区域范围内的去蜂窝化。随着基站基带信号处理能力的不断提升，gNB能够联合处理的TRP数量显著增加，系统容量随之持续增长。在近期3GPP会议上，多家企业普遍认为6G需考虑从mTRP向无蜂窝技术演进<sup>[4-7]</sup>。

无蜂窝大规模MIMO的核心目标是通过大规模节点在同一时频资源上服务大量用户，将多小区干扰转化为有用信号，从而实现频谱效率和系统性能的持续提升。无蜂窝理论技术的研究主要关注平坦信道下的传输方法<sup>[8]</sup>。面向大规模组网的实际需求，基带信号处理和资源分配机制需具备支撑用户规模持续扩展的能力。为此，学术界提出了可扩展的分布式协作基带处理架构，以及可扩展的调度与资源分配策略<sup>[9-10]</sup>。该思路旨在支持大规模协作传输，并推动移动通信网络性能的持续优化。可扩展性的基本要求是：在用户规模不断扩大的条件下，网络侧收发节点以及空时频资源的调度复杂度仅呈线性增长。在此约束下，每个TRP在同一时频资源上可服务的用户数，以及单个调度器或资源分配实体所管理的用户数量，均应受到合理限制。从实际部署角度看，受限于成本、信道传播时延及异步问题，无论是单个TRP同时服务的用户数，还是为一个用户服务的TRP数量，均存在一定上限。因此，尽管理论上单个无蜂窝基站的信号处理能力可不断提升，实际系统设计仍需在上述约束下寻求平衡。

在5G演进过程中，无蜂窝大规模MIMO的理念逐步融入标准体系。首先，小区的概念持续弱化，协议未对单个gNB支持的小区数量和TRP数量做出硬性限制。随着终端测量能力的增强，通过TCI机制，为同一终端服务的TRP可分布于不同小区，且数量已达4个。其次，上行协作接收与下行相干协作传输方案亦逐步成熟。从无线传输层面来看，若将物理小区标识(PCI)仅视为一种接入资源的划分方式，

并结合无蜂窝大规模MIMO的设计理念，当前体制已基本具备在大范围内实现去蜂窝化部署的能力。再次，在5G演进标准中，基于层1与层2(L1/L2)触发的移动性(LTM)机制有效降低了基站间切换时延，提升了切换区域的业务传输性能。这种以扩大协作区域和增强移动性为核心的架构演进，已逐步突破传统蜂窝网络的边界，成为6G标准化工作的重要起点。

本文围绕6G标准化中的无蜂窝大规模MIMO技术展开讨论，重点分析支持大规模TRP协作的收发机设计与CSI获取技术，探讨无蜂窝大规模MIMO与频谱聚合、双工技术及无线资源分配机制的融合路径。同时，进一步梳理了无蜂窝组网当前面临的主要技术挑战，并探讨数字孪生、高频段无蜂窝组网以及无蜂窝通感一体化(ISAC)等新兴技术方向在提升无蜂窝网络性能、拓展其应用场景方面的潜在作用。

## 1 从mTRP到无蜂窝大规模MIMO演进的关键技术

无蜂窝技术兼具无线传输与组网的双重属性。因此，将无蜂窝理念融入6G标准，不仅涉及分布式MIMO传输方法的研究，更需要多用户无线资源分配等组网技术层面取得突破。

### 1.1 收发机设计

在mTRP技术的演进过程中，3GPP对上行mTRP接收与下行mTRP发射方案开展了系统研究。其中，上行mTRP技术主要包括单频网(SFN)和空分复用(SDM)两种传输模式<sup>[11]</sup>。通过利用多个TRP的接收分集，可有效提升上行链路的覆盖性能。为进一步增强上行传输能力，3GPP还定义了仅具备上行接收功能的TRP。借助上行定时提前(TA)测量，可在多个TRP之间实现分集接收。当多个TRP各自采用分布式接收机处理信号，并分别将接收信息发送至用户所附着的基带单元进行合并时，该架构便接近于无蜂窝系统中单用户上行分布式接收的实现。将此方案推广至多用户场景，并进一步引入干扰消除技术，可实现无蜂窝大规模MIMO的上行分布式多用户MIMO接收。

在mTRP下行传输技术的演进过程中，3GPP现阶段主要围绕非相干联合发送(NCJT)与相干联合发送(CJT)展开研究。针对NCJT，协议已明确支持两个TRP采用时分复用、频分复用、空分复用或单频网(SFN)等发送模式，使终端能够获得mTRP发射分集增益，从而提升下行传输的可靠性。从理论层面而言，NCJT可视为CJT的一种特殊形式。然而，CJT旨在获取相干波束赋形增益，对参与协作的TRP之间的时频同步精度提出了严格要求。R19版本通过引入码

本反馈机制，并结合时延、频偏及相位反馈，初步构建了较为完备的CJT传输方案。受限于终端能力及反馈开销，R19目前仅支持最多4个TRP的协作传输。同时，由于仅支持两个TCI状态，该方案在复杂场景下的适应性仍存在一定局限。此外，基于码本的传输方式虽具备较好的鲁棒性，但与基于非码本的空分复用联合传输相比，其系统性能存在较为明显的损失。

针对非码本的mTRP多用户协作传输，受限于实现复杂度及终端解调参考信号（DMRS）的信道估计能力，当前网络侧通常配置为每2或4个资源块采用相同的预编码矩阵。从理论层面分析，由于协作多用户MIMO通常工作于分布式近场场景，多个子带共用同一预编码矩阵将带来较为显著的性能损失。因此，有必要结合DMRS的设计，进一步研究适用于多用户场景的高性能协作预编码方案。此外，随着单个基站所配置的TRP数量不断增加，以用户为中心的mTRP动态协作簇传输模式对基带信号处理算力提出了更高要求。在此背景下，学术界提出的可扩展分布式基带信号处理架构，有望为基站产品性能的持续提升提供理论与技术支撑。

总体而言，5G标准从单TRP向mTRP的演进路径呈现一定的碎片化特征。为实现高性能的协作传输，未来方案设计需立足于mTRP架构，综合考虑高频与低频段、不同TRP形态以及终端能力的多样性，构建更为简洁、高效的传输机制。

## 1.2 上下行信道信息获取

针对时分双工（TDD）系统，R19版本引入了终端辅助的互易性校准机制，使网络侧能够获取各TRP之间的校准系数。该版本主要提出了两种在网络侧获得校准参数的方法。

第一种方法基于上行探测参考信号（SRS）进行信道估计，网络侧依据所得的CSI新增发送一种经过预编码的信道状态信息参考信号（CSI-RS），作为下行校准的参考信号。终端在接收该信号后，测量获得mTRP之间的校准系数（包括时间差及收发通道的相位差），并将其反馈至网络侧。第二种方法则由终端直接反馈下行信道的统计特性，网络侧基于该反馈信息计算得到各TRP间的校准系数。

针对低频段TDD系统，当各TRP之间存在空口链路且网络侧具备自校准能力时，可实现高性能的多用户协作传输，系统容量与传输可靠性均可获得显著提升<sup>[12]</sup>。由于自校准过程对终端透明，因此无须在终端侧进行标准化定义。基于此，若网络设备厂商支持TRP间的自校准功能，不仅可简化现有QCL与TCI所涉及的复杂流程，降低终端的测量与反馈开销，还能够有效提升系统整体性能。当网络中参与协作

的TRP数量较多时，各TRP之间的时间同步精度要求随之提高。目前，采用IEEE 1588精准时间协议（PTP）可在一定程度上实现较高精度的时间同步。然而，随着分发时间信息的交换机级联层数增加，时间同步精度会出现下降。因此，需要进一步提升IEEE 1588协议在级联场景下的时间同步精度。

CJT不仅能够获得相干波束赋形增益，还可实现空分复用增益。当仅需获取波束赋形增益时，可采用分布式CJT预编码方案，即每个TRP仅依据自身的CSI独立进行下行预编码。该方案对信道信息的过时具有一定鲁棒性<sup>[12]</sup>。相比之下，多用户CJT传输对信道相位变化较为敏感，网络侧需要获取高精度的CSI才能保证性能。总体而言，为实现高性能的mTRP传输，需结合校准相位的获取时刻、基于历史上行SRS与DMRS估计得到的CSI，以及QCL关系，通过预测方式获得下行CSI。

值得注意的是，当前采用预编码CSI-RS获取TRP间互易性校准参数的机制，为终端侧多天线的校准提供了可行路径。具体而言，以一个TRP为参考点，基于上行多端口SRS估计得到的CSI，通过发送预编码的CSI-RS校准信号，可实现单个终端的多天线校准，亦可支持多个终端的天线校准。该机制为上行CJT的实现奠定了基础，成为提升上行覆盖性能的有效方法。

## 1.3 无蜂窝与载波聚合及子带全双工的融合

近年来，运营商对多频段载波聚合的需求日益增强，特别是在服务超密集用户场景时，载波聚合已成为提升系统容量的关键技术途径。然而，在5G载波聚合框架下，采用多小区管理方式会引入较高的信令开销与传输延迟，导致频谱利用率偏低，且对碎片化频谱的利用效果不佳。因此，在6G Day-1技术讨论中，频谱融合技术受到广泛关注，其中典型方案包括单小区/超小区多载波（SCMC）技术<sup>[7, 13]</sup>。通过灵活配置TDD系统的上下行时隙配比，该方案可同时支撑大上行与大下行类型的终端需求<sup>[9]</sup>。可以看出，SCMC技术与无蜂窝技术分别从频域和空域两个维度拓展了传统小区的概念。为更好地支撑相关技术的落地，需要统一考虑初始接入、同步信号设计、传输方法以及信令机制等方面的协同设计。

此外，5G-A引入了子带全双工（SBFD）技术，能够有效降低TDD系统的传输时延并提升上行覆盖性能。在中频段（FR3），通过充分利用多天线系统在空域波束间的隔离特性，可实现SBFD的全部署<sup>[14]</sup>。该思路与文献[15]提出的网络辅助全双工（NAFD）技术在理念上相通。NAFD一方

面借助mTRP的大规模天线阵列挖掘空域资源，实现全双工传输；另一方面利用mTRP的协作能力有效抑制交叉链路干扰（CLI），从而在降低时延的同时提升系统频谱效率。

总体而言，6GR在频谱利用与多天线/多通道配置方面将展现出更高的灵活性。从理论层面看，在网络侧实现更为灵活的双工模式，可归结为空口资源的动态配置问题，如文献[16]提出的多节点/多通道双工模式选择方案。在6GR标准制定过程中，频谱融合及SBFD技术与mTRP设计在核心理念上具有相通之处，共同构成了以用户为中心的时空频资源配置框架。然而，在服务用户规模保持不变的条件下，无论是频谱融合还是mTRP技术，均需在提升单用户体验的同时，保障系统总容量的持续增长。因此，随着单个基站所管理的时空频资源池不断扩大，无线资源分配的复杂性也随之增加。

### 1.4 无蜂窝系统的调度与资源分配

为了与传统蜂窝系统进行公平的性能对比，无蜂窝系统在相同区域和相同TRP规模条件下，服务的终端总数需与传统蜂窝系统保持一致。在传统蜂窝架构中，多个基带单元（BBU）之间的调度采用分布式实现，因而系统复杂度相对较低。当前业界所采用的超小区及小区合并方案，虽能在一定程度上提升单用户业务体验，但由于未能实现多小区间的联合调度与资源分配，系统总容量的提升效果尚未达到预期。相比之下，采用集中式调度与资源分配的无蜂窝基站，虽可实现用户规模与系统总容量的同步增长，但其实现复杂度过高，缺乏可扩展性。

综上所述，当前5G协议已在物理层支持多TRP协作，并初步打破了传统小区的边界。然而，为充分发挥无蜂窝系统的容量潜力，仍需进一步突破以小区为中心的传统资源分配体系，以支撑用户规模与系统总容量的持续提升。

图1给出了无蜂窝系统的实现架构<sup>[10]</sup>。该架构在物理层支持TRP集合的分布式基带信号处理。具体而言，在虚拟化中心处理单元（vCPU）的低层实现编解码、调制解调等高阶物理层功能，在其上层则执行可扩展的分布式资源分配。为此，需要设计相应的分布式媒体接入控制（D-MAC）调度及资源管理方法。如图1所示，用户在初始接入阶段会形成服务于自身的TRP集合，并与一个D-MAC实例相关联。基于用户与TRP的关联关系及CSI，系统进一步执行用户配对与分布式资源分配。由于交集TRP的存在，每个D-MAC调度实例需要获知其他实例中与之关联的用户信息。为了降低资源冲突导致的干扰，D-MAC调度器需实时交互调度用户的时频资源及DMRS分配信息，通过资源协调机制抑制干

扰，并最终确定每个用户的编码调制格式。

在图1所示的架构下，通过结合终端测量上报与网络侧对上行信号的测量，采用L1/L2触发的LTM机制，可借助MAC控制单元（MAC-CE）指令实现TRP集合的动态选择。该方式能够避免传统的层3切换流程，从而有效降低移动性管理时延。随着人工智能（AI）技术逐步引入终端的移动性管理，系统对移动性场景的支撑能力将进一步增强。

在理想的前传/回传条件及D-MAC信息交互前提下，图1所示的D-MAC架构能够实现可扩展的资源分配，并与物理层的分布式基带处理相配合，支撑无蜂窝组网的实现。然而，在非理想回传条件下，如何设计相应的D-MAC机制仍需进一步研究。

## 2 未来研究方向

从MIMO到分布式MIMO、协作多点传输，再到mTRP，并最终向无蜂窝组网演进，无蜂窝技术发展历程已持续近30年。尽管如此，容量、覆盖及干扰问题仍然是移动通信大范围组网所面临的核心挑战。在提升移动通信网络系统性能的过程中，去蜂窝化方向上仍有诸多问题亟待进一步持续深入地研究。

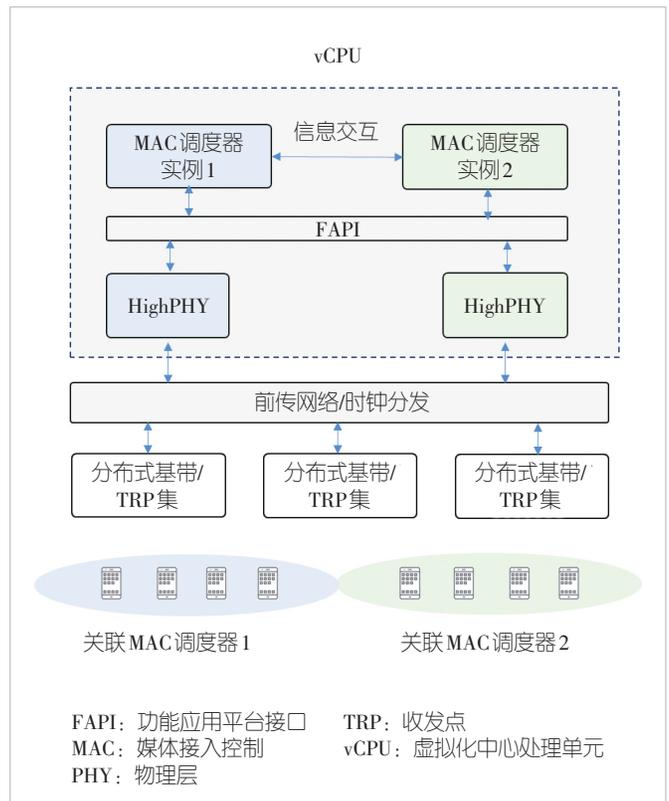


图1 分布式MAC：无蜂窝系统的调度与资源分配

## 2.1 广域无蜂窝组网的干扰问题

由于移动通信系统上下行发射功率存在不对称特性，系统通常面临上行功率受限与下行干扰受限的双重挑战。从理论层面分析，降低单点发射功率，提升分布式节点的部署密度以形成超密集组网，并结合无蜂窝大规模MIMO技术，可通过协作接收与联合发送的方式提升系统上下行容量。然而，受限于运营商在实际部署中难以无限增加节点密度，在现实的小区间距条件下，无蜂窝技术的作用存在一定局限。

当前移动通信系统普遍采用同步组网，物理层仍沿用正交频分复用（OFDM）技术。受循环前缀（CP）持续时间的制约，当两条无线链路的传播时延差超过CP时长时，将引发异步干扰。如图2所示：在上行通信中，若终端到两个TRP的传播时延差超出CP范围，且远端TRP未相应调整接收窗，则会产生异步问题；在下行通信中，若两个TRP同步发射的信号到达终端的时延差超出CP，且终端未能分别进行同步并实施干扰抵消，则会导致下行远端异步干扰。异步干扰将进一步引发载波间干扰（ICI），增加干扰消除难度，恶化组网性能。当前5G系统采用的典型子载波间隔为15/30/60/120 kHz，其对应的常规CP等效距离分别为1 406 m、703 m、352 m和176 m。理论上，单站的覆盖能力越强（即小区半径越大），在多站点协作场景下，同步区域在整个覆盖区中所占的比例将越小。

在现有基站系统中，网络侧通常不针对终端进行主动同步，终端也仅与单个TRP实现时间同步及TA调整。因此，在上行方向，为提升接收性能，需要基站侧的TRP针对特定终端进行同步，并部署干扰消除接收机。在下行方向，理论上可通过调整波束的发送定时来改善协作传输，但该方案会破坏网络侧的同步机制，实施难度较大。而在终端侧，通过针对特定TRP进行同步并实现干扰抵消接收，可有效提升下行协作传输的性能。然而，由于异步问题破坏了相干传输的基本条件，此类下行异步协作传输仅适用于非相干联合传输场景。

在mTRP服务单用户的上行传输中，通过调整各TRP的接收窗可获得分集接收增益；在下行传输中，采用非相干协作发送并结合终端侧的接收窗调整与干扰抵消，同样可实现下行分集接收增益。单用户场景下的mTRP异步协作复杂度相对较低，具备一定的可行性。

从理论层面分析，在多用户空分复用场景下，无蜂窝技术有望实现全网的干扰消除。然而，在实际大规模组网中，无论是在基站侧还是终端侧，实现多用户干扰抵消（特别是异步干扰抵消）的代价通常难以承受。相关的工程实现涉及同步机制、CSI参数获取以及干扰抵消接收机设计等一系列

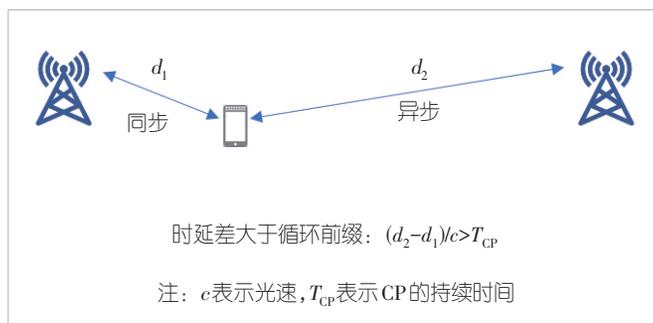


图2 无蜂窝系统的异步问题

复杂技术问题。此外，全网协作所能带来的实际性能增益仍有待进一步评估与研究。

针对密集城区覆盖场景，当前5G系统主要采用大规模MIMO技术进行组网部署。以30 kHz子载波间隔为例，小区半径通常设定在300 m左右。在大规模MIMO采用窄波束传输时，由于波束赋形带来的增益较大，受传播环境影响，反射径可能引发远端干扰。此类远端异步干扰已成为制约网络性能进一步提升的瓶颈。如前文所述，采用干扰抵消方式对抗异步干扰将带来较高的实现代价。因此，在多站点协作背景下，大规模MIMO组网的性能优化问题仍有待进一步深入研究。

在无蜂窝技术的架构下，需要重新审视每个TRP所配置的通道数量。传统大规模MIMO理论表明，天线数量越多，系统所获得的空分复用增益与干扰抑制能力越强。然而，在实际大规模MIMO组网中，受限于导频资源开销及天线单元规模，多站点之间的干扰难以实现完美抑制。事实上，在密集大规模MIMO部署场景下，由于阵列增益较为显著，无论是在空旷区域的小区边界用户覆盖，还是室外站点对室内用户的覆盖中，由直射径或反射径引发的远端干扰均不可忽视。

采用无蜂窝协作接收与发射技术，通过灵活部署多个小规模天线的模块化TRP，并结合空口校准机制，同样可以获得相干传输增益。因此，适当降低单个大规模MIMO TRP的通道数量，通过协作方式实现收发波束赋形增益，是降低网络干扰、提升系统能效的有效技术路径。

## 2.2 基于RAN数字孪生的无蜂窝组网技术

为了提升广域覆盖场景下无蜂窝网络的性能，亟需研究网络级的远端干扰协调与抑制技术。然而，由于远端异步干扰在时域、频域和空域上的分布较为复杂，干扰测量的精度与测量开销均面临严峻挑战。

无线接入网（RAN）数字孪生作为一种新兴技术，为解

决上述问题提供了可行路径。该技术借助物理环境重构，结合射线追踪与统计信道建模，并融合实际测量数据，可有效获取网络系统中的CSI<sup>[5,17]</sup>。针对广域无蜂窝组网中的异步干扰问题，我们基于RAN数字孪生技术，提出了一种以用户为中心的同步协作传输与异步干扰抑制联合优化方法，旨在提升网络的整体性能。

如图3所示的无蜂窝网络系统架构<sup>[10]</sup>，主要由边缘分布式单元、vCPU以及云化集中式单元（Cloud-CU）构成。基于用户与TRP的空间几何位置关系及信道的数字孪生建模，通过分步优化方式，可实现用户与TRP的关联、用户配对、调度决策及时频资源分配等功能。对于与终端实现同步的TRP（即UE与TRP之间的最大多径时延小于CP），可采用上下行协作传输方式消除用户间干扰。借助信道的数字孪生，可进一步获取无蜂窝网络中由异步问题引发的干扰分布信息。在此基础上，通过协作收发机设计与异步干扰重构的迭代优化，可形成优化的传输方案及网络级无线资源分配策略<sup>[18]</sup>。

然而，由于协作预编码与远端干扰之间存在相互耦合关系，且与多用户配对、用户-TRP关联、用户调度等多个因素密切相关，无蜂窝网络整体性能优化的维度和复杂度均较高。此外，数字孪生建模的精确性依赖于实体基站的测量数

据进行修正，而远端干扰信道的测量所需的参考信号开销较大，且往往需要终端侧参与反馈。因此，有必要借助AI技术，系统性地研究基于信道数字孪生的建模方法，以及基于孪生模型的多用户无蜂窝网络优化实现方案。

### 2.3 高频段无蜂窝大规模MIMO

研究者普遍认为，将分布式协作的无蜂窝技术进一步扩展至高频段，是实现高鲁棒性与高性能毫米波/太赫兹组网的关键路径<sup>[19]</sup>。然而，在高频段实现下行CJT对参与协作的TRP之间的时频同步提出了更为严格的要求。对于采用模拟预编码的毫米波系统，由于模拟通道的校准存在一定误差，导致波束旁瓣的互易性较差。此外，受TRP物理位置部署因素的影响，多个TRP指向同一用户的波束之间可能不存在直达链路。上述因素共同制约了高频段下自校准机制的性能表现。

针对终端辅助的校准机制，当用户位于TRP的主瓣方向时，可获得较好的相干传输增益。为验证这一特性，图4展示了我们构建的毫米波相干协作传输试验系统，包含了4个毫米波TRP与2个距离约300 m的毫米波终端。系统工作在26 GHz频段，带宽为200 MHz。终端及基站侧有源天线单元（AAU）的每个数字通道均配置16单元相控阵，各模拟通道

输出功率约为10 dBm。系统中所有基站侧AAU通过IEEE 1588v2精密时间协议（PTPv2）与SyncE实现同步。图5给出了两个终端分别对4个AAU分布式波束的校准系数测量结果（由于对其中一个波束进行了归一化处理，图中仅呈现其余3个波束的校准系数）。测试结果表明，通过超分辨率估计，通道时延差的估计精度可达皮秒量级。由于两个终端相距较近且均位于4个AAU波束的主瓣方向，两者估计出的校准系数差异较小。实测数据表明<sup>[20]</sup>，基于终端辅助的校准机制可实现约10 dB的CJT波束赋形增益（理论增益为12 dB）。然而需要注意的是，在室内环境下的近场场景中，当用户位于波束旁瓣时，若仅对数字通道进行校准，由校准引入的误差将导致相干联合传输

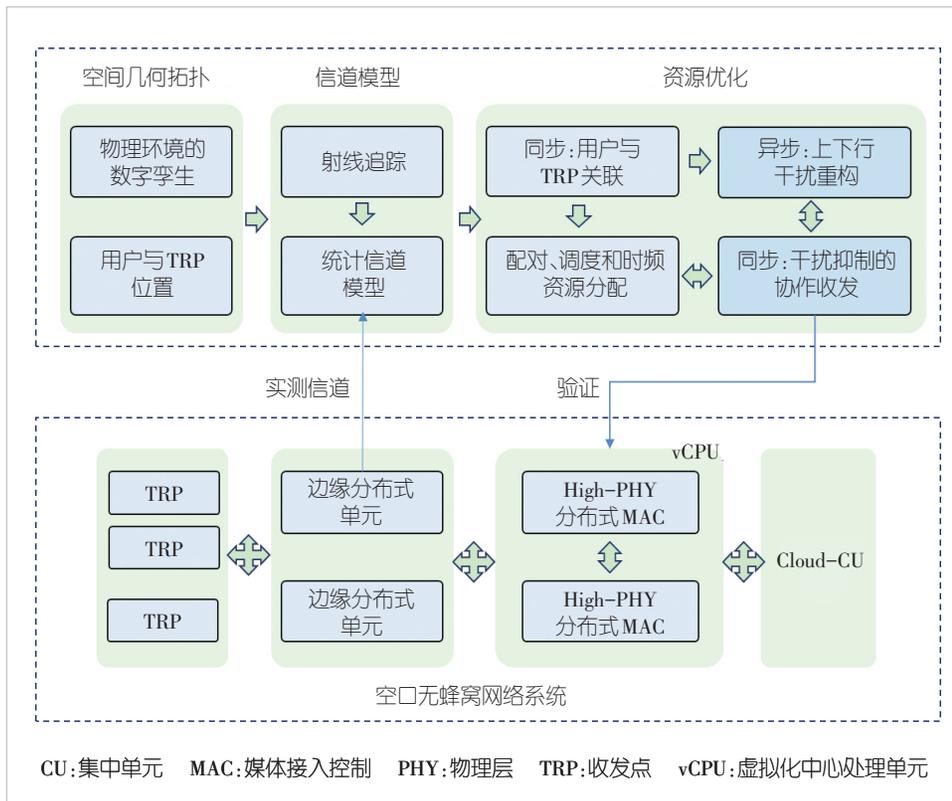


图3 信道数字孪生增强的无蜂窝网络系统

的空分复用增益受到显著影响。

随着毫米波频段频谱资源的日益紧张，为获取更大传输带宽，研究者将太赫兹通信视为6G频谱拓展的重要方向。当前业界广泛关注的太赫兹频段仍集中在300 GHz以下，如140 GHz、220 GHz和300 GHz等，因此毫米波无蜂窝系统中的若干关键技术仍可延续应用于太赫兹系统。与毫米波类似，在太赫兹组网覆盖场景下，若采用集中式大规模阵列，仍面临覆盖区域边缘用户速率较低、易受遮挡以及业务速率分布不均等问题。若沿用传统蜂窝组网方式，为克服路径损耗需部署密集小蜂窝，这将导致小区间干扰制约系统容量的持续提升。同时，密集部署场景下频繁的波束与小区间切换可能引发链路稳定性问题。从5G毫米波的发展经验来看，支持基站与终端之间动态波束通信的相控阵技术仍是太赫兹

技术应用于6G的主要技术途径。受限于当前太赫兹相控阵芯片的发展水平，目前尚未出现成熟的太赫兹多用户RAN试验系统。随着器件技术的逐步成熟，将分布式协作传输进一步推广至太赫兹频段<sup>[21-22]</sup>，有望显著提升太赫兹系统的鲁棒性。然而，相较于毫米波频段，太赫兹载波频率更高，实现相干协作传输的难度将进一步加大。

### 2.4 无蜂窝通感一体化技术

在无蜂窝无线接入网系统中，充分利用多个TRP之间的协作能力，可构建多站协作感知机制。相较于单站感知，多站协作感知不仅能够实现目标完整视图的重构，还能进一步提升感知精度<sup>[23]</sup>。然而，无蜂窝系统中的多站感知仍面临若干技术挑战，主要包括：协作感知中的信息融合问题、mTRP协作感知中非理想时频偏的补偿问题、TRP双工模式与通感一体化模式的选取、感知与通信之间的干扰管理与消除，以及如何将感知能力与RAN数字孪生相结合以提升通信性能等问题。

在无蜂窝组网架构下，感知信息的协作融合主要分为信号级融合与数据级融合两个层次<sup>[24]</sup>。信号级融合方法直接对接收信号或信道状态信息进行加权融合，通过对多通道信号实施相干或非相干累积，并构建目标位置的联合似然函数，结合网格搜索实现高精度目标定位。然而，该方法需依赖原始I/Q回波数据进行处理，导致前传链路容量成为系统的主要瓶颈。数据级融合方法则通过在多个接收TRP侧提取目标的感知参数信息（如多普勒-距离图中的感兴趣区域或特征

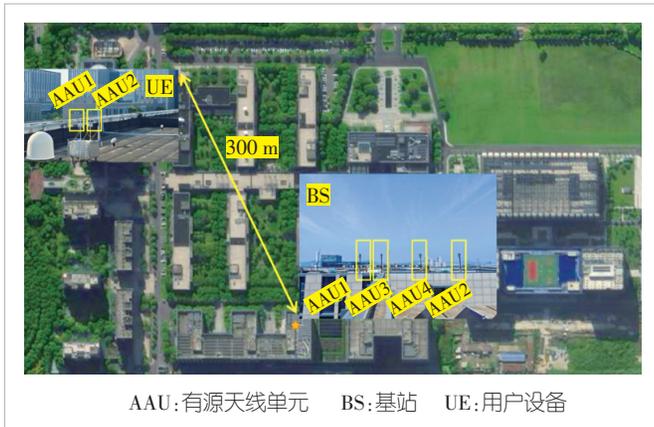


图4 毫米波无蜂窝系统相干联合传输(CJT)试验场景

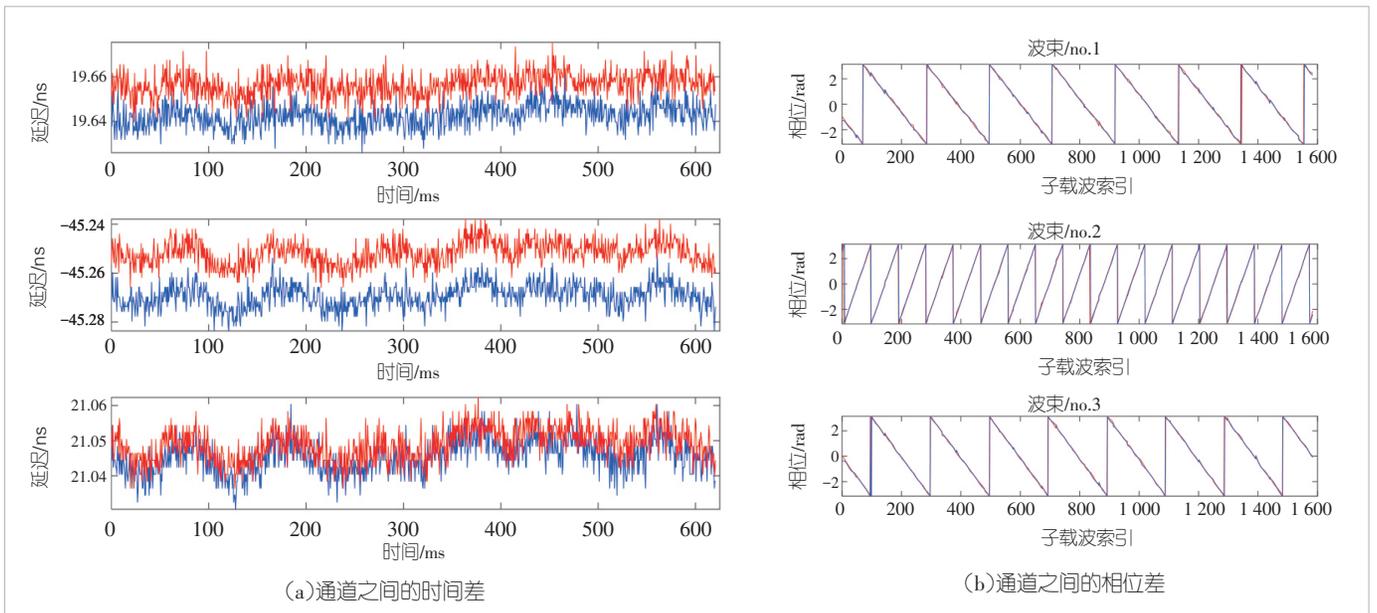


图5 通道之间的时间差及相位差

向量), 再进行协作融合以获得感知结果。由于TRP端仅传输提取后的特征信息而非原始数据, 因此可显著降低前传负载。该方法具有信号处理复杂度较低、系统结构相对简单的优势, 但受信号处理环节间误差传递的影响, 其定位精度存在一定局限。类似于无蜂窝系统中的分布式信号处理架构, 无蜂窝通感一体化系统需要研究面向感知功能的处理功能切分方案。具体而言, 需根据网络负载状况、目标密度及信道条件, 动态调整感知处理任务在TRP与vCPU之间的分配, 以实现信息融合效率与前传负载开销之间的平衡。

与mTRP相干CJT类似, mTRP感知同样面临TRP之间的时频偏问题。该问题会严重增加感知任务中的时延, 降低多普勒估计精度, 导致感知性能显著下降。现有研究表明, 利用CJT的互易性校准机制可有效提升感知性能<sup>[25]</sup>。为此, 需要研究利用TRP之间的通信信号或终端反馈信号, 实现无蜂窝网络的全网快速校准, 以消除时偏与频偏的影响, 支撑长时间相干感知与分布式协作感知。同时, 还需设计高效的相位跟踪机制, 以降低校准开销, 并抑制相位抖动对微弱信号相干累积的不利影响。

在无蜂窝无线接入网中, 用户关联与TRP双工模式配置是实现高效协同的基础<sup>[26]</sup>。由于每个TRP的收发模式及通感状态均可动态调整, 传统的“以用户为中心”的关联策略在引入感知任务后面临新的挑战。通信链路通常以信道增益最大化为目标, 而感知任务则要求所选的TRP集合能够提供最优的几何观测角度。考虑到用户间干扰及散射体分布特性的影响, 两者在TRP选择需求上往往存在冲突。因此, 有必要引入图论、博弈论或多目标优化方法, 在离散的节点关联空间内对通信容量与感知精度进行平衡, 从而在相互竞争的目标之间寻求帕累托最优的拓扑结构方案。

在无蜂窝系统中, 由于TRP在物理空间上呈密集部署且共享频谱资源, 干扰模式已从传统的基站间干扰演变为复杂的多维交叉链路干扰。具体而言, TRP与TRP之间、UE与TRP之间均存在多重干扰路径, 主要包括通信信号对感知的干扰、感知信号对通信的干扰, 以及通信与感知信号的上下行相互干扰<sup>[27]</sup>。因此, 有必要针对无蜂窝通感一体化场景, 系统研究干扰的表征方法、测量机制与协同抑制方案。在技术实现层面, 需设计空间域波束零陷与多域资源协调策略, 以消除通信下行信号与感知回波之间的相互制约, 保障通信性能的稳定。同时, 应充分利用无蜂窝系统的分布式接收特性, 开发高效的干扰抑制与杂波抑制算法, 确保系统在复杂干扰环境下仍具备可靠的感知能力。

感知能力与RAN数字孪生技术的深度融合, 可为环境信道的高精度重构提供有力支撑<sup>[5]</sup>。相较于对小尺度目标的

感知, 环境重构更侧重于大尺寸准静态环境对象的建模。通过利用多个终端的上行信号及多站协作感知, 可实现环境信息重构, 进而辅助通信过程优化。例如, 在终端移动过程中, 可提前建立备份的TRP无线链路, 辅助终端进行上行定时调整, 从而避免重新发起随机接入所带来的开销与延迟。此外, 在传统高频段系统中, 多用户下行波束赋形的实现通常依赖频繁的导频训练。借助协作感知技术, 系统能够直接获取终端的物理位置与移动轨迹, 并结合RAN数字孪生技术, 可在不依赖导频的情况下实现波束赋形, 从而显著降低导频开销。

### 3 结束语

随着6G标准化工作的推进, Day-1技术成为业界广泛关注的焦点。本文从无蜂窝大规模MIMO的视角, 系统探讨了mTRP技术的演进路径。从架构层面看, 当前5G R19版本已初步构建了较为完整的去蜂窝化协作传输技术框架。然而, 6GR如何进一步有效融合无蜂窝大规模MIMO技术, 仍需在多载波与SBFD技术的基础上, 化繁为简, 形成更加简洁高效的接入与传输方案。同时, 需要从基站上层协议栈的实现角度出发, 进一步突破以小区为中心的传统资源分配体系, 以充分释放mTRP的容量潜力。当前的实验结果表明, 高频段下的相干协作传输具备可行性。随着太赫兹器件技术的逐步成熟, mTRP有望在高频段组网中得到实际应用, 从而大幅提升高频段的可用性。此外, 无蜂窝技术对6GR中的其他关键技术亦具有重要支撑作用, 包括SBFD与ISAC等。随着信道数字孪生技术的持续发展, 经过优化设计的无蜂窝系统将能够更有效地抑制远端干扰, 推动移动通信大范围组网性能的显著提升。

### 参考文献

- [1] 尤肖虎, 王东明, 王江舟. 分布式MIMO与无蜂窝移动通信[M]. 北京: 科学出版社, 2019
- [2] 3GPP TS 38.214 V19.1.0 Physical layer procedures for data [S]. 2025
- [3] 3GPP TS 38.321 Medium Access Control (MAC) protocol specification [S]. 2025
- [4] 3GPP TSG-RAN WG1 Meeting #123 High-level views on 6GR [S]. 2025
- [5] 3GPP TSG-RAN WG1 Meeting #123, R1-2508733 Overview of 6GR air interface: [S]. 2025
- [6] 3GPP TSG-RAN WG1 Meeting #123, R1-2508453 Overview of 6GR air interface: [S]. 2025
- [7] 3GPP TSG-RAN WG1 Meeting #123, R1-2508430 Overview of 6GR air interface [S]. 2025
- [8] Ngo H Q, Ashikhmin A, Yang H, et al. Cell-free massive MIMO versus small cells [J]. IEEE transactions on wireless

- communications, 2017, 16(3): 1834–1850. DOI: 10.1109/twc.2017.2655515
- [9] Björnson E, Sanguinetti L. Scalable cell-free massive MIMO systems [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(7): 4247–4261. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.2987311
- [10] Wang D M, You X H, Huang Y M, et al. Full-spectrum cell-free RAN for 6G systems: system design and experimental results [J]. Science China information sciences, 2023, 66(3): 130305. DOI: 10.1007/s11432-022-3664-x
- [11] Fukui T, Yokomakura K. Investigation of performance of uplink multi-panel transmission for multi-TRP operation in 5G-advanced system [J]. IEICE transactions on communications, 2025, E108-B(12): 1391–1399. DOI: 10.23919/transcom.2024.EBT0011
- [12] Cao Y, Wang P, Zheng K, et al. Experimental performance evaluation of cell-free massive MIMO systems using COTS RRU with OTA reciprocity calibration and phase synchronization [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(6): 1620–1634. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3276057
- [13] 3GPP TSG-RAN WG1 Meeting #123, R1-2508614 Overview of 6GR air interface [S]. 2025
- [14] 3GPP TSG-RAN WG1 Meeting #123, R1-2509229. Overview of 6GR air interface [S]. 2025
- [15] Wang D M, Wang M H, Zhu P C, et al. Performance of network-assisted full-duplex for cell-free massive MIMO [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(3): 1464–1478. DOI: 10.1109/tcomm.2019.2962158
- [16] Zhu Y, Li J M, Zhu P C, et al. Optimization of duplex mode selection for network-assisted full-duplex cell-free massive MIMO systems [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(11): 3649–3653. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3105918
- [17] Cohen-Arazi K, Roe M, Hu Z, et al. NVIDIA AI aerial: AI-native wireless communications [PP/OL]. arXiv(2025-10-02)[2026-01-04]. <https://arxiv.org/abs/2510.01533>
- [18] Hong Z Y, Li T, Xu S, et al. Asynchronous centralized and distributed precoding for extensive cell-free OFDM with adaptive fronthaul overhead [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2026, 25: 2312–2326. DOI: 10.1109/TWC.2025.3596109
- [19] Zhu Z S, Wang L F, Wang X, et al. Spatial-spectral cell-free sub-terahertz networks: a large-scale case study [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2025, 24(4): 2956–2967. DOI: 10.1109/TWC.2025.3526932
- [20] Jiang Q J, Jin J, Wang Q X, et al. Experimental performance of bidirectional phase coherent transmission and sensing for mmWave cell-free massive MIMO systems with reciprocity calibration [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2026, 44: 3591–3607. DOI: 10.1109/JSAC.2026.3664828
- [21] Callebaut G, Liu L, Eriksson L, et al. 6G radio testbeds: requirements, trends, and approaches [J]. IEEE microwave magazine, 2024, 25(4): 14–31. DOI: 10.1109/MMM.2024.3351970
- [22] Ghasempour Y, Kludze1 A, Bodet D, et al. Distributed wavefront shaping in near-field sub-1 THz wireless networks [EB/OL]. [2026-01-05]. <https://www.researchsquare.com/article/rs-5898192/v1>
- [23] Liu G Y, Xi R Y, Wang X Q, et al. Cooperative sensing for ISAC: challenges, system design, beam management, and performance validation [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2026, 44: 608–625. DOI: 10.1109/JSAC.2025.3611941
- [24] Wei Z Q, Xu R Z, Feng Z Y, et al. Symbol-level integrated sensing and communication enabled multiple base stations cooperative sensing [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2024, 73(1): 724–738. DOI: 10.1109/TVT.2023.3304856
- [25] Han K, Meng K T, Masouros C. Over-the-air time-frequency synchronization in distributed ISAC systems [PP/OL]. arXiv[2026-01-05]. <https://arxiv.org/abs/2503.08920>
- [26] Zeng F, Liu R Y, Sun X Y, et al. Multi-static ISAC based on network-assisted full-duplex cell-free networks: performance analysis and duplex mode optimization [J]. Science China information sciences, 2025, 68(5): 150303. DOI: 10.1007/s11432-024-4381-8
- [27] Sun X Y, Li J M, Chen G H, et al. Interference management and joint precoding design for multi-static ISAC and full-duplex communication cell-free systems [J]. IEEE transactions on communications, 2025, 73(10): 9798–9814. DOI: 10.1109/TCOMM.2025.3564756

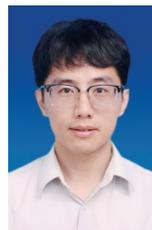
## 作者简介



**尤肖虎**，中国科学院院士，东南大学首席教授、紫金山实验室首席科学家；目前主要研究方向为无线与移动通信系统、现代数字信号处理等；作为项目负责人，曾承担30余项国家“863”、科技攻关、国家自然科学基金等项目。



**王东明**，东南大学首席教授；主要研究方向为移动通信系统和无线传输技术等；先后主持和参加省部级项目40余项；已发表论文200余篇。



**曹阳**，紫金山实验室高级工程师；主要研究方向为6G无线传输技术及系统研发；作为课题负责人和项目骨干参与国家重大专项2项；已发表论文12篇，拥有受理和授权国家发明专利13项。