

6G 关键技术能力

6G 关键能力指标三可以分为性能指标和效率指标。性能指标体现为从用户需求的角度出发，需要未来 6G 提供的关键性能水平。效率指标则主要从网络运营和可持续发展需求的角度出发，提出未来 6G 系统需达到的效能指标。

一是关键性能指标。6G 将渗透于以人为中心的数字生活，包含办公、消费、出行等各种区域，以物为中心的数字化城市和生产，包含交通、医疗、工业、远程监测等行业应用领域，及消除数字鸿沟的普遍覆盖。以室内热点、智慧城市、工厂产线、工业制造区、医院、街道、偏远区域为代表的 6G 典型场景，分别具有高流量、高密度、高移动、高精度、高智能、广覆盖等特征，将对 6G 网络设计和部署形成挑战。综合考虑 6G 典型业务特点、部署场景特征、用户和业务分布等特点，获得典型部署场景下的 6G 关键性能需求，主要包含体验速率、峰值速率、流量密度，时延、同步和抖动，连接数密度、移动性、可靠性、覆盖、感知/定位精度，AI 服务精度等。未来 6G 网络需要具备比 5G 更高的性能，支持 Gbps 至几十 Gbps 的用户体验速率，每平方公里千万至上亿的连接数密度，毫秒甚至亚毫秒级的空口时延，每平方米 0.1 至数十 Gbps 的流量密度，每小时 1000Km 以上的移动性，数百乃至 Tbps 的峰值速率。以上指标在原有 5G 的基础上将实现 10 至 100 倍的提升。此外，6G 还进一步扩展了新的能力范畴，将需要支持 us 级的抖动，覆盖范围也扩展至空天地海的全球覆盖，厘米级的感知和定位精度，人工智能的服务精度和效率也将达到 90%以上。

二是关键效率指标。6G 需要大幅提高网络部署和运营的效率，支撑可持续性发展。推动绿色低碳转型是全球共同目标，也是 ICT 产业可持续发展的必然趋势。6G 将以绿色低碳作为网络设计的基本准则，既降低 6G 自身能耗，同时赋能行业低碳发展。为此，6G 将在系统设计、技术创新、产品设计、网络运维等多个环节融入节能减排理念，助力绿色可持续发展。结合网络能耗支出和 ICT 技术赋能减排等因素，预计 2040 年 6G 网络的能量效率相比 2022 年移动通信网络提升约 20 倍。与此同时，信息技术的跨界融合和服务场景多样化对网络可信提出新的挑战，需要从设计初始就构建一张能够满足安全泛在、持久隐私保护、智能韧性的可信网络。可信涵盖了网络安全（Security）、隐私（Privacy）、韧性（Resilience）、功能安全（Safety）、可靠性（Reliability）等多个方面。可信内生即与生俱来的可信，其可信特征与网络、业务同步产生、发展和量身定制，实现 6G 网络的自我免疫、主动防御、安全自治、动态演进等能力，有效满足不同业务场景的差异化安全需求。6G 研发的过程中还需要考虑网络的运营成本和维护成本，把低成本也作为核心设计目标之一，构建低成本的柔性、至简、孪生自治网络。综合考虑网络性能和潜在频谱，相比 5G，预计 6G 频谱效率将提升 1.5 至 3 倍。

1、空口演进技术

1.1 超大规模 MIMO

经过十余年的发展，大规模 MIMO 技术在理论研究和系统设计方面都有了显著的成果，并已在 5G 新空口中标准化，开始大规模商用。

6G 系统在频谱效率、峰值速率等方面的要求更高，超大规模 MIMO 技术是大规模 MIMO 技术的进一步演进升级，通过部署超大规模的天线阵列（低频可以达到或接近 1024，高频可以达到或接近 8192），应用新材料，引入新工具，可以获得更高的频谱效率、更大更灵活的网络覆盖，更高的定位精度和能量效率。

超大规模 MIMO 主要有两种构造方式：集中式和分布式。集中式超大规模 MIMO 主要通过引入新材料新工艺，如平面反射或透射阵列等技术，构造具有上千单元规模的集中式天线阵列来满足超远距离覆盖、超高频谱效率的需求。分布式超大规模 MIMO 结合了大规模 MIMO 和分布式 MIMO 的技术优势，可显著提升系统频谱效率，改善边缘覆盖。超大规模 MIMO 在提高定位精度以及支持垂直立体覆盖等场景也将发挥着重要作用。分布式和集中式超大规模 MIMO 的关键技术主要包括球面和非平稳信道建模、高精度信道状态信息获取、波束管理、预处理和接收检测等。深度学习技术在超大规模 MIMO 技术中的波束管理、信道压缩和反馈和链路自适应等方面目前也展现出了应用潜力。

但超大规模天线阵列的应用也面临着诸多挑战。一方面，随着天线规模的增加，成本、功耗、体积和重量将不可避免的提升，不利于我国“双碳”目标的实现，如不能有效控制超大规模 MIMO 的能耗、成本，其应用和部署将受到限制。同时，集中式超大规模 MIMO 的高精度信道状态信息获取、波束管理、预处理和接收检测等关键过程的开销和复杂度都和天线规模成正比，超大的天线规模导致网络和终端在实际实现时都面临挑战。而实现分布式超大规模 MIMO 要将数据和

信道状态信息在参与传输的站点之间进行实时的交互，要求站点之间具有高速连接，且具有很高的时频同步精度。另一方面，如果采用新型的阵列结构，传统的实现多路空间复用的传输方案以及波束管理方案等不能直接应用，需要重新研究和设计。虽然深度学习技术对解决超大规模 MIMO 面临的部分技术挑战展现了潜力，但是其稳定性和泛化性是其自身面临的挑战。通信网络对可靠性的要求极高，深度学习模型如果在运行过程中的数据分布和训练的数据分布不同，模型可能会失效，导致通信链路的中断。后续将从以下几个方向开展研究：

在研究扩大阵列规模对通信系统指标影响的基础上，进一步研究低功耗、高能量效率、更高频段的新型天线架构实现方案，及与天线架构匹配的传输方案。

建立性能和复杂度有效折中的，匹配非平稳和近场特性的通用信道模型，并在建模中考虑天线单元之间的耦合情况。探索低开销、低复杂度的信道状态信息获取、波束管理、预处理和接收检测算法。

研究低成本分布式超大规模 MIMO 部署方案，研究先进的有线回程或者无线回程技术，研究通过空口实现的通道校准技术以及站点间时频同步技术。

智能化超大规模 MIMO 研究，探索适用于无线网络的深度学习模型，研究泛化能力提升技术，提升模型在不同场景中的泛化性能。

研究低功耗超大规模 MIMO 技术，从硬件工艺设计、系统设计和网络管理等多个维度研究降低超大规模 MIMO 功耗的技术方案。

技术研判：超大规模 MIMO 可有效提升系统频谱效率、能量效率

和覆盖等指标，支撑实现超级无线宽带和通信感知融合等 6G 典型场景，分布式超大规模 MIMO 有望在 6G 得到规模应用，超大规模 MIMO 与人工智能结合已成为业界共识，有必要探索适配低频到太赫兹的多频段多天线技术框架，分阶段逐步开展标准化工作。但超大规模 MIMO 仍然存在成本、功耗、体积和复杂度等问题。

1.2 先进调制编码

先进调制编码技术作为最底层的物理层技术，对 6G 各项性能指标的达成起到重要的支撑作用。考虑到 6G 应用场景更加多样化，性能指标更为多元化，为满足相应场景对吞吐量/功耗/时延/性能的需求，我们需要对空口物理层基础技术进行针对性的设计。

(1) 编码技术

目前业界普遍认为，6G 峰值吞吐率会达到 Tbps 量级。从速率指标来看，目前 5G 的数据信道编码（LDPC 码）设计难以满足如此高的峰值吞吐率要求，需要研究如何在中高码率实现该 KPI。从其他指标来看，6G 还要满足超低功耗和高数据速率场景的极低时延要求，这除了对信道编码译码器提出更高要求外，如更高的能量效率和面积效率，还需要进一步降低译码的 error floor 来提高单次传输的可靠性。6G 极高的峰值吞吐率与极低时延也将对数据存储、译码器处理主频提出更高要求，必然会带来终端或者基站功耗的大幅提升，需要研究低功耗译码技术。此外，从应用场景来看，6G 系统应用场景更加宽泛，例如陆海空天一体化通信将对信道编码提出新的挑战，为满足卫星通信要求需要设计性能更好、可靠性更高的纠错编码和降低 HARQ 重传的

编码调制方案。

在编码领域，国际上在极化码、LDPC 码、代数码、卷积码、中短码长译码算法的改进，各种级联码设计，有限长编码性能，AI 与信道编码结合等领域有大量的研究，成果涉及 5G NR 编码的低复杂度译码演进，基于 5G NR 编码方案的码构造演进、多层编码、编码与 NOMA 和 MIMO 的结合、基于 AI 的信道编码构造方法、Tbps 量级超高吞吐编译码技术、理论基线极限等。

极化码在非常宽的码长/码率下都表现出均衡且优异的性能，如构造得当，其在 1 比特细颗粒度下性能稳定可靠。同时，受益于 SC 译码算法复杂度极低，在支持高吞吐率编译码时，Polar 码在功耗、芯片面积等方面有显著优势。准循环 LDPC 码具有很高的并行性，可支持灵活的码长和码率，非常适合中高吞吐率业务。通过优化准循环 LDPC 码的奇偶校验矩阵，可以进一步提升译码可靠性，降低 error floor，满足 6G 数据信道需求。

（2）调制技术

在调制领域，国际上的研究主要聚焦在 QAM 调制星座的概率整形和几何整形、APSK 调制、调制和编码的联合优化等领域。

通过更高的 QAM 星座图所能获得的边际收益逐渐消失，6G 需要重新审视调制技术。概率幅度整形（PAS）可以生成接近达到香农极限所需的最优分布；几何整形（GS）基于格雷映射的规则幅度相移键控（GRAPSK）技术，可以较好地平衡成形增益与解调复杂度之间的关系，两者都能够获得优于普通 QAM 调制的整形增益。

技术研判：为了达到 6G 的 Tbps 量级的峰值吞吐率，需要使用更高效的译码算法和高阶的星座调制。概率成形和几何成形都有一定的增益，但在实现复杂度方面有差异，还需要进一步从频谱效率，能效率，硬件一致性，鲁棒性等方面进行全面的评估。面向 6G，编码技术有很大可能还将沿着 LDPC 码和极化码的方向进行演进和优化。当然，综合考虑 6G 典型场景和指标体系的多样化，探讨用统一的框架，实现控制信道和业务信道编码的统一，也是有意义的探索。

1.3 新波形技术

变换域波形将发送符号映射于不同于普通时频域的特殊对偶域（如时延-频率、时变-多普勒等对偶域），可以更直观地刻画时延、多普勒等维度的信息。在高速移动等场景下，变换域波形方案相比于传统基于 OFDM 的波形方案（包含 DFT-s-OFDM）在 MIMO 兼容性、复杂度、PAPR、带外泄露、相噪抑制、定时误差鲁棒性等方面需要深入研究。

超奈奎斯特系统包括 FTN、SEFFM 和 OVXDM 等，相比于传统的奈奎斯特采样系统，其突出的技术优势是在非 sinc 脉冲成形下的高频谱效率和高吞吐量。对于有限星座和非 sinc 脉冲成形，超奈奎斯特系统有可能是实现通信容量上界的唯一路径。传统的正交传输信号无法利用滚降部分的频谱，从而带来信息速率的损失，调制阶数越高，损失越大。超奈奎斯特系统在衰落信道下的性能分析和参考信号设计、信道估计，与多天线和大带宽等现有技术的结合，非 sinc 脉冲成形的应用场景等是需要解决的问题，并需要和现有通信系统中可动态调

整 MCS 的方案进行对比。

在波形领域，国际上提出了 OTFS，超奈奎斯特等新的波形，国内也在该领域进行了不少的研究，但能否在 6G 标准化中取得突破还有待各方的共识。

未来 6G 将包含比 5G 更多和更复杂的应用场景，不同应用场景的需求各不相同。例如高频通信中的低 PAPR、相噪鲁棒等需求；高速场景中抵抗多普勒带来失真的需求。多种波形类型的组合方案设计将可以潜在地满足 6G 不同场景的需求，但是多种波形类型组合方案中，不同波形之间的灵活切换、配合及兼容性问题需要深入研究。

技术研判：更高频段、高速移动场景、天地一体化，以及通信感知融合典型场景等 6G 新特征，引发新波形探索。新波形引入需要重点探索与 OFDM 波形之间的灵活切换、配合及兼容性问题，兼顾辅助信号、上行下行侧行链路设计的需求。

1.4 全双工

无线通信业务量需求激增与频谱资源紧缺的外在矛盾，持续驱动无线通信标准的内在变革。提升 FDD 与 TDD 的频谱效率，并消除其对频谱资源利用方式的差异性，成为 5G 和 6G 通信革新中的一个目标。基于自干扰抑制理论和技术的同时同频全双工成为实现这一目标的解决方案之一，它从理论极限上可提升一倍的频谱效率。

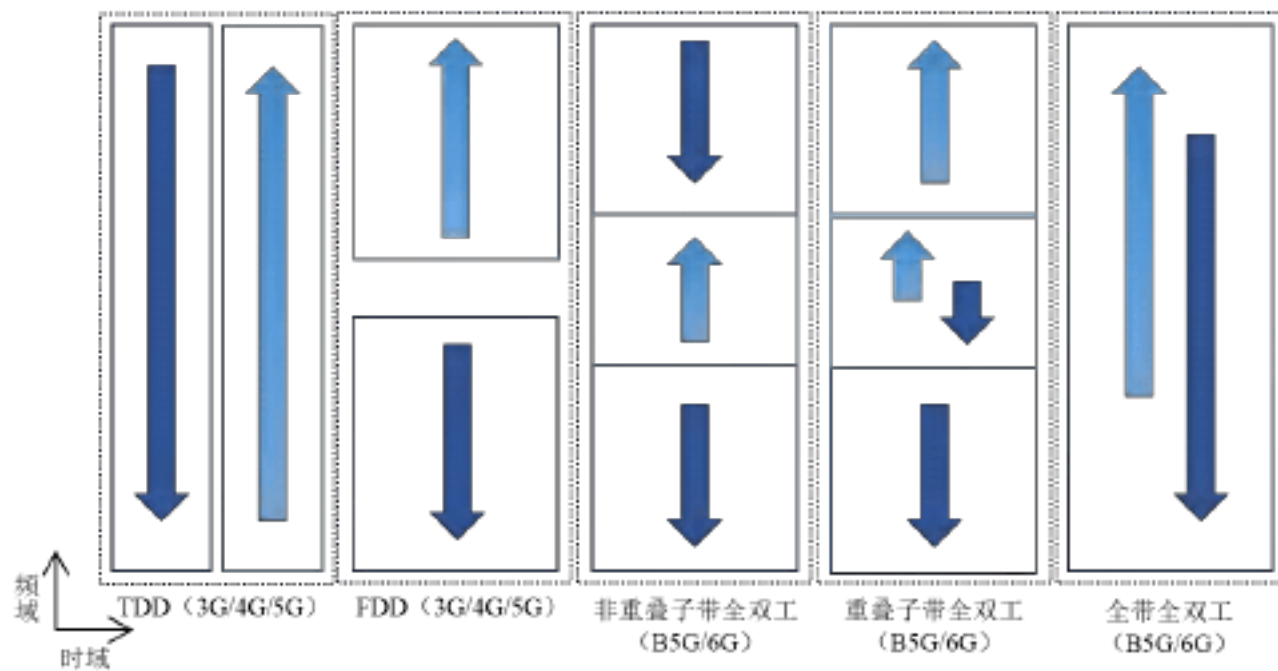


图 1 新型双工方式

图 1 示意了 3 种新型双工方式与传统 TDD/FDD 的差别。非重叠子带全双工是指在一个载波带宽内允许在不重叠的频率子带资源上进行同时上行和下行的收发或发收；而重叠子带全双工是指一个载波带宽内在某相同的频率子带资源同时上行和下行的收发或发收。全带全双工则为在同一个载波的整带宽资源上都允许同时同频的上行和下行的收发或发收。目前子带全双工已纳入 5G-R18 研究内容，期待其后续纳入标准和产业成熟。

目前，点对点全双工通信理论相对成熟，sub6G 和毫米波频段小功率阵元自干扰抑制技术研究较多，全双工高隔离度天线的研究热度增加，大功率大带宽自干扰抑制技术有待深入研究；组网方面，多站组网面临基站间交叉干扰和边缘用户互干扰的难题；自干扰抑制芯片化方面，以美国哥伦比亚大学等高校、KUMU 和 GenXComm 等公司为代表的研发团队推出了相关芯片与产品，国内在芯片、器件方面的技术研究刚起步，尚无全双工相关产品发布。

总的来看，全双工最大限度的提升了网络和设备收发设计的自由度，可消除 FDD 和 TDD 差异性，具备潜在的网络频谱效率提升能力，

它可应用于多种场景，但复杂度和应用条件不尽相同，相关芯片产业还不够成熟，需要分阶段推进。同时，在全双工技术的实用化进程中，尚需解决的问题和技术挑战，包括：大功率大带宽动态自干扰信号的抑制，多天线射频域自干扰抑制电路的小型化，全双工体制下的网络新架构与干扰管理机制，与 FDD/TDD 半双工体制的共存和演进策略。

同时同频全双工体制涉及的通信理论与工程技术研究目前已全面展开，形成了空域、射频域、数字域联合的自干扰抑制技术路线。基于自干扰抑制理论和技术的同时同频全双工从理论极限上可提升一倍的频谱效率。业界对应用场景、全双工组网、自干扰抑制、无线资源管理等关键技术方向进行了研究、评估和硬件验证，目前能够实现 122dB 以上的自干扰抑制能力，正在努力尝试从点对点全双工通信向多站多用户现实网络环境拓展。面向未来全双工技术产业发展，提出如下发展建议。

开展低频段多天线、毫米波阵列天线、大功率大带宽自干扰抑制、通感一体化全双工技术的研究工作，突破工程应用的关键技术；

积极探索全双工组网面临的交叉链路干扰抑制技术研究和全双工的潜在应用场景；

射频干扰抑制芯片、真时延器、数字自干扰抑制芯片，是全双工技术发展的重要方向，相比于国外，国内还有一定差距；

搭建实验验证平台，评估新型双工体制工程化落地的可行性。

技术研判：子带全双工已进入 5G-A 标准化进程，全带全双工在

物理层自干扰信号抑制技术方面有一定发展，但其真正应用，仍需以干扰抑制芯片为代表的硬件器件发展作为商业应用的重要支撑，并且在多站多用户组网场景研究方面获得突破。

1.5 新型多址接入移动通信从第一代（1G）到第四代（4G）基本上采用的都是正交多址，即不同用户占用相互正交的频域、时域或码域资源。由于用户之间的干扰较低，正交多址实现起来比较简单，尤其是接收侧的信号处理。但对于多用户系统，正交多址的性能潜力与系统的容量界仍有很大差距。新型多址，即非正交多址，能够有效地支持多个用户同时同频同空域的传输，以提高系统吞吐和终端连接数。理论上可以证明，非正交多址能够达到多用户系统容量界。新型多址还包含随机接入，既可以工作在调度系统，还可以工作在免调度的无用户标识场景。

自 2018 年以来，学术界在巨址海量接入方面取得了一些突破性的进展，针对有限码块长度，从信息论的角度推导出一系列的海量接入容量界，显示出相比正交多址具有巨大的性能优势。适用于多址接入的多用户系统的信道编码成为研究热点，并结合适合海量接入的压缩感知对用户进行激活检测，对无线传输信道进行估计。在学术界，基于调度的多址叠加传输也有不少论文发表，例如速率分割的多址技术（RSMA），但尚未成为业界共识。目前中国的一些高校在非协作海量多址的容量界分析、多用户编码、激活用户检测的研究水平与国外高校的著名团队基本相当。中国的一些企业在 6G 新型多址接入的场景需求、方案设计、性能仿真和实验条件等方面有深厚的技术积累。

多址接入是每一代移动通信系统的基本功能，不可能再引入 5G-Advanced 标准中，但有望在 6G 新空口的标准化中（大约是 2025 年左右）开展研究。新型多址接入目前存在的挑战主要包括：

场景需求尚未转化成为方案评估的具体指标，例如海量连接数、业务模型、码块大小、空口传输时延等，需要尽快对应空口仿真评估的性能指标；

巨址海量接入涉及多项物理层基础技术，如多用户信道编码、信号序列、激活检测等，研究和设计难度很高，需要与新型调制编码领域相结合，尤其对于中短码长的多用户系统，性能优化与场景关系很大，性能最优和系统设计复杂度之间的折衷比单用户系统的更为重要；

接收机需要大量的优化设计，以便在性能和算法复杂度之间达到最佳的折衷，以利于在实际系统中应用；

基于调度的多用户多点传输（超过两用户两点）的理论容量界仍然一个开放性问题。

技术研判：基于非正交多址的巨址海量接入有望大幅提升终端连接数密度，有力支持 6G 网络的低功耗、超大规模连接场景，将作为物理层基础技术在 6G 新空口中开展研究。

2、新型技术

2.1 智能超表面

智能超表面（RIS）技术采用可编程新型亚波长二维超材料，通过数字编码对电磁波进行主动的智能调控，形成幅度、相位、极化和

频率可控制的电磁场。智能超表面技术能够突破传统无线信道不可控特性，实现主动地控制无线传播环境，在三维空间中实现信号传播方向调控及增强或消除，抑制干扰并增强信号，构建 6G 智能可编程无线环境新范式。

RIS 技术具有电磁特性实时可编程的特点，允许超表面改变其电磁特性，从而实现传统超材料无法实现的各种功能。RIS 通常由大量精心设计的电磁单元排列组成，通过给电磁单元上的可调元件施加控制信号，可以动态地控制这些电磁单元的电磁性质，进而实现以可编程的方式对空间电磁波进行主动的智能调控，形成幅度、相位、极化和频率等参数可控制的电磁场。作为一种全新且极具潜力的基础性关键技术，RIS 具有低成本、低功耗、易部署等特点，将能够支持绿色通信，使能智能无线环境，实现未来感知通信一体化。RIS 通过构建智能可控无线环境，将有机会给未来 6G 带来一种全新的网络范式。RIS 的应用研究是跨学科的，需要无线通信、射频工程、电磁学和超材料等学科的协同配合。RIS 在未来无线网络中的应用将涵盖发射机、无线信道环境以及接收机组成的整体闭环无线传输链路，基于 RIS 的新型无线通信系统有望通过联合优化设计取得最佳的整体性能。

目前针对 RIS 的研究仍处于初始阶段，亟待学术界和工业界共同探索和大力推进相关研究。RIS 未来技术发展和应用面临如下挑战：

RIS 信道测量与建模：需要在考虑 RIS 的物理和电磁特性的基础上，建立不同情况下 RIS 辅助无线通信的自由空间路径损耗和小尺度衰落模型，并进行实验测量进一步验证。另外，需要考虑 RIS 信道

模型与传统的通信理论框架具有内在的相容性。

RIS 信道估计与反馈：利用 BS 和 RIS 位置固定的特点以及 RIS 单元阵列特性，设计低复杂度的信道估计方法来获得信号到达角等关键信息。可以通过挖掘 RIS 级联信道的结构化稀疏特征，提升信道反馈性能并降低信道估计开销。利用 RIS 信道矩阵低秩特性，构造联合稀疏矩阵并设计稀疏矩阵恢复来实现级联信道估计。

RIS 波束赋形：RIS 辅助通信系统的波束赋形设计一般从优化的角度出发，将相移矩阵设计问题转化为特定目标的优化问题，进而通过各类优化方法进行求解。如果忽略硬件偏差的影响，假设理想硬件状态下的波束赋形算法将会在实际应用中产生严重的扭曲训练导频和期望接收信号，因此也需要考虑硬件受限下的波束赋形，需重点考虑离散相位、波束宽度、反射角度等硬件约束。

RIS 控制与网络架构：RIS 是一种全新的技术，改变和控制传统电磁波的传输路径、用户接收的信号，对现有的通信系统与网络架构带来巨大的变化。RIS 部署优化设计的目标是寻求复杂度、成本及性能的平衡，确定 RIS 部署位置、密度、RIS 形态、调控/协作关系等参数。

为加快 RIS 技术的成熟和商用，RIS 未来的主要研究方向包括：RIS 硬件架构及调控算法的研究、智能环境通信新理论和基带新算法的研究、无线网络新架构等。

RIS 硬件架构及调控算法研究：探索具备对电磁信号特性实现独立控制的单元器件扩展；设计具有功能多样性的 RIS 阵列；探索紧

密阵列，甚至全息 RIS 的可能性，在减少阵子耦合特性的情况下，提高系统的空间分辨率，吞吐和频谱效率；研究超高频段以及光频段 RIS 的硬件研究，扩展整体组网的灵活性；研究和设计 RIS 基础调控算法集合及其功能扩展的调控算法，灵活扩展 RIS 阵列的功能集合和拓展 RIS 新的应用场景。

智能环境通信新理论和基带新算法的研究：探索智能环境无线通信系统架构及传输体系设计的基础理论和方法论。例如，探索电磁信息理论，用其指导未来无线传输系统的设计。研究和开发高效的基带算法以支持 RIS 技术在无线系统中的广泛应用。

无线网络新架构设计方面的研究：探索多种传输场景下 RIS 网元功能的定义，RIS 和无线网络间的控制方式及对应的接口协议；研究在无线同构网络内或在无线异构网络内 RIS 的网络拓扑结构及部署方案；研究不同形态 RIS 联合组网的拓扑架构和部署方案；探索融合 RIS 的无线网络新架构的可扩展性、移动性、安全性、鲁棒特性及时延特性等，并推动新型无线接入网络架构相关的标准化进程。

技术研判：RIS 作为一种全新且极具潜力的基础性关键技术，具有低成本、低功耗、易部署等特点，其典型应用包括覆盖空洞补盲、覆盖范围扩展、电磁干扰抑制，提升传输自由度、支持大规模连接及辅助感知与定位等。RIS 可与通感一体化、人工智能、太赫兹通信等技术紧密结合，共同为 6G 愿景服务。

2.2 全息无线电

全息无线电是通过 RF 干涉测量和 RF 计算全息技术实现电磁空

间的重构（上行）和精密调控（下行），从而一方面实现无线通信超高分辨率的空-时-频全维复用，另一方面实现无线通信、成像和感知的融合。

对于全息无线电来说，通常的波前记录传感器是天线，所以需要连续孔径天线阵列来接收和测量信号波的连续波前相位。目前连续孔径天线阵列包括先进的 UTC-PD 紧耦合有源天线阵列、连续孔径的 RIS+传统的离散孔径有源天线阵，以及相干分布式天线或蜂群孔径（SwarmAperture）等。在相干分布式天线或蜂群孔径天线中，每个天线的射频路径以某种方式同步和相干组合，多个同时工作的天线振子可以像连续孔径一样工作，通过合成全息（SyntheticHolography）实现全息无线电。

理论和建模上，上行链路通过空间谱全息或编码的孔径相关全息（COACH）实现全息电磁空间的再现与重构，下行链路通过空间波场合成或时间反演（相共轭）实现电磁空间的全维调制与调控，并将全息无线电（或全息空口）概念和卷积定理结合在一起，同时将部分信号处理从数字层面转移到电磁层面（引入光学计算或超表面作为计算单元），以满足智能全息无线电在灵活性、低延迟、功耗和复杂性方面的要求。

2019 年，Marzetta 等人通过线性系统理论和傅里叶变换等深入探讨了全息无线信道模型。2021 年，Khodaei 等人提出了一种全息频谱复用（HSM）技术方案，利用超短脉冲的频谱空间，以二维全息图的形式生成线路码，实现超高数据密度的并行通信。当前美国特拉华

大学已建立了一个基于微波光子天线前端和 SLM 光学计算的全息无线电实验平台,并基于 k 空间实现全息电磁空间重建和 RF 全息成像。美国 S2 公司基于全息无线电(空间谱全息)实现了一个极致宽带动态谱地图平台,瞬时带宽高达 40GHz。

在国内,北京交通大学对连续孔径的紧耦合天线阵的每一个天线振子对应的多径信道进行准确地表征及联合处理,得到全息无线电链路的整体信道。南京航空航天大学深入研究了 K-空间层析成像和基于光子技术的实时傅里叶变换,实现了对空间频率(频率及空间位置)的测量及高分辨率成像。北京邮电大学提出了一种基于多模光纤的全息射频频谱压缩感知系统方案,在远小于奈奎斯特采样率的条件下实现了信号的全光压缩感知和高精度恢复。大连理工大学完成了基于微波光子三维信息处理的智能全息无线电功能验证系统设计,验证了全息无线电感知与通信一体化功能。浙江大学提出近场全息无线电信道模型,并分析了信道自由度,实验验证了利用倏逝波可以提升全息无线电的近场自由度。

全息无线电不仅可以实现无线通信超高分辨率的空-时-频全维复用,大幅度提高通信容量,而且具有天然的全谱内生通信感知融合和真正的原生智能特性,但是目前仍有许多挑战,后续的研究方向建议重点放在:

完善空间谱全息或编码的孔径相关全息(COACH)、空间波场合成或时间反演(相共轭)和 K 空间等理论、算法和建模,全息空间谱复用和解复用算法优化。

进一步优化全息微波信号到全息光学信号的高保真映射方案。

基于光、电和超表面的衍射神经网络和计算的层次化异构信号处理架构的评估验证。

技术研判：全息无线电尤其近场 RF 全息不仅可以实现接近瑞利衍射极限的空-时频全维复用，满足 6G 的超大容量需求。同时，基于光、电和超表面融合的新架构，全息无线电整个链路可以表征为层次化、异构和联邦学习的新型计算系统或衍射神经网络，有望实现能效和时延性能的极大提升，但是在工程化和产业化方面仍存在着大规模光电融合集成的挑战。

2.3 轨道角动量

轨道角动量（OAM）是电磁波的固有物理量，也是无线传输的新维度。OAM 的物理量纲和电场强度的物理量纲线性无关，所以彼此独立。电磁波角动量包括自旋角动量和轨道角动量。根据是否与坐标系有关，OAM 可以分为“内禀 OAM”和“外部 OAM”两部分。电磁波从微观上看是由大量电磁波量子构成的，内禀 OAM 表征了电磁波量子波包针对其中心形成的 OAM，外部 OAM 则是针对定义的坐标系形成的 OAM。因此，内禀 OAM 不会随着外界空间坐标系的不同而发生变化，利用电磁波量子波包形成涡旋，可以构建量子态 OAM 涡旋电磁波量子传输系统，获得传统多天线 MIMO 传输以外的无线传输新维度，具有超越传统 MIMO 容量界的能力；外部 OAM 则会因为坐标原点选择的不同而发生变化，适用于统计态 OAM 涡旋波束。该波束也具有类似涡旋波包的螺旋相位面，适宜在点对点视距直射信道（LoS 信道）传输中

获得正交信道和低复杂度，统计态 OAM 涡旋波束可用天线阵实现，因此也被认为是多天线 MIMO 传输特例。

在未来的 6G 链路中引入 OAM 传输技术，不仅可以获得频谱效率和链路传输速率的提高，而且可以获得较低的复杂度和成本，以及相对较低的功耗。统计态 OAM 涡旋电磁波目前主要用于点对点视距传输，场景仍局限于宏基站和微基站之间的数据中继传输，最新传输实验表明可以在 1km 距离上传输 1Tbps 数据量，频谱效率超过 50bit/s/Hz。统计态 OAM 涡旋波束在空口方面的应用正在结合大规模 MIMO 和智能超表面等 6G 技术展开研究；量子态 OAM 涡旋微波量子传输系统的研究近几年得到长足发展，虽然目前的实验系统仍旧体积大、功耗大、复杂且笨重、技术成熟度低，但已经能够验证其在传输容量、复杂移动传输场景等的显著优点。在实际应用场景上，量子态 OAM 传输不再受限于统计态 OAM 传输那样的倒锥状波束，适用范围涵盖几乎所有复杂场景，可以建立灵活的 OAM 复用、OAM 多址、OAM 超窄带等无线传输系统。

由于传统无线传输系统均建立在电场强度之上，而 OAM 是独立于电场强度的传输新维度，其未来技术发展和应用面临如下挑战：

当前 OAM 传输技术研究中，存在着发展不均衡的问题。在射频无线通信中，统计态 OAM 涡旋波束研究早，研究团队多，技术成熟度高。但统计态 OAM 涡旋电磁波应用场景受限，主要应用于 LoS 信道环境。相比之下，量子态 OAM 涡旋电磁波不受 LoS 信道的限制，应用场景广泛，但相关研究仍处于探索阶段，技术成熟度低。因此，未来 OAM

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/458001114022007003>