**报告正文**

参照以下提纲撰写，要求内容翔实、清晰，层次分明，标题突出。**请勿删除或改动下述提纲标题及括号中的文字。**

**（一）立项依据与研究内容**（**建议8000字以下**）：

1．**项目的立项依据**（研究意义、国内外研究现状及发展动态分析，需结合科学研究发展趋势来论述科学意义；或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录）；

**1.1 研究意义**

自2020年正式商用以来，5G已逐步渗透到社会的各行各业，在国民经济和社会发展中发挥重大作用。2021年，工信部在发布的《5G应用“杨帆”行动计划》中，明确了5G融合应用在经济社会的数字化、网络化、智能化转型中的关键作用。同年，《“十四五”信息通信行业发展规划》进一步强调了5G在工业互联网、车联网、智慧城市等领域的核心支撑作用。与此同时，随着上述新型无线通信应用场景的快速普及和广泛应用，移动通信与人工智能、大数据等新兴技术深度融合，不仅拓展了无线通信的应用边界，也使得无线网络的特征与功能逐步发生深刻变革，推动网络业务主体从人向智能体扩展，业务空间从物理空间向数字、虚拟空间扩展，信息处理功能需求从信息传递向信息采集、信息计算扩展。5G 正逐步向“万物感知、万物智联”的6G演进。

2023年6月，国际电信联盟在瑞士日内瓦举行会议，首次确立了6G 的六大典型应用场景。**通信感知融合（Integrated Sensing and Communication, ISAC）被正式确立为6G 的典型应用场景与核心使能技术之一**。通感融合是指基于软硬件资源、频谱等多要素共享，同时实现通信与感知功能的新型无线设计范式。相较于传统的通信和感知双系统分离式架构，通感融合架构主要具备以下两点优势。一方面，通信和感知共享软硬件设备、无线资源以及信号处理算法，系统的软硬件成本和能耗降低，资源利用率提高。另一方面，基于软硬件资源的共享与一体化架构，通信和感知可以实现信息的共享互通，进而促进双功能的相辅相成、互惠互利。得益于上述优势，通信感知融合技术为推动智慧交通、智能家居、低空经济等新兴应用场景的发展与演进发挥重要作用，并在未来无线网络万物智联美好愿景的实现进程中扮演关键角色。然而，尽管通信和感知都依赖于电磁信号的无线传播和收发处理，但两者在功能目标、系统架构和信号设计等方面存在显著差异。具体而言，通信系统旨在通过无线信道实现两个或多个位置之间的可靠数据传输，通常收发异置，终端设备可以有一定的移动性，发射端通常发送调制信号（对于接收端是未知的），其设计目标为提高信号的信息承载能力，最大化收发端之间的信息传递效率以及准确性。感知系统旨在观测和获取高质量的信道和环境信息，通常收发共置或通过有线链路连接，收发设备位置固定，发射端发送未调制的形式相对简单的信号（对于接收端是已知的），设计目标为精确获取信道中待感知目标的距离、位置和速度等参数。鉴于上述差异，通信与感知的同平台一体化融合具有一定的技术挑战性。因此，针对不同应用场景的通感融合需求，**探索通信与感知双功能协同理论与方法，从而最大化未来多功能无线网络的潜在性能优势，具有重要的研究意义和价值。**

与此同时，得益于毫米波频段丰富的带宽资源，采用高频信号传输已经成为无线网络的一个重要发展趋势。然而，相较于散射体丰富、信道自由度充足的中低频段，高频无线信道呈现一定的稀疏性，信道矩阵通常存在以直达径分量为主的低秩特性，导致信号传输的自由度受限。这一特征对无线通信和感知均会产生深刻影响。对感知而言，在反射体稀少的信道稀疏环境下，直射径传播特征能够有效抑制多径干扰，有助于目标反射特性和信道特征的刻画，有利于检测、追踪、参数估计等感知功能的完成。相反，对无线通信而言，多径丰富度与空间自由度的降低会限制无线信道的信息传递能力，影响通信稳定性与可靠性。由此可见，**高频MIMO信道的稀疏特性对通信和感知呈现出差异化影响，迫切需要探索匹配高频稀疏信道的通感双目标协同方法。**

另一方面，传统MIMO系统通常固定阵元间距为半波长，通过增加天线数量来提升系统性能。然而，随着系统频段、带宽以及天线规模的持续增大，系统的硬件成本、复杂度和器件功耗急剧增加，成为制约大规模MIMO技术发展与应用的瓶颈，有必要发展新的成本可控的硬件架构。为此，稀疏MIMO技术作为一种新兴解决方案受到广泛关注。它通过增加阵元间距以构建稀疏阵列，大幅度减少天线数量、降低硬件复杂性和成本，同时辅以先进的信号处理方法获得逼近传统密集MIMO的性能表现。然而，目前对于稀疏MIMO技术的研究主要集中在感知定位领域以及简单场景下的通信性能分析，关于其在通感融合应用需求下的相关研究工作尚不充分。为此，**亟待深入分析大规模稀疏MIMO技术在通感融合场景下的性能提升空间，开展适配稀疏阵列的通感融合实现方法研究**。

综上所述，**本项目针对高频MIMO信道稀疏性与大规模天线阵列稀疏性两大核心挑战，明晰双稀疏性对通信与感知功能的差异化影响，探索双稀疏特征下的通感融合性能极限，并构建与双稀疏性相匹配的MIMO通感融合设计方法，为通感融合技术在未来高频信道与阵列双稀疏环境下的应用提供理论保障与技术支撑。**

**1.2 国内外研究现状**

随着智慧交通、智能家居、智慧工厂等新兴应用的快速发展，下一代无线网络不仅需要提供高质量的无线通信服务，还需具备高精度的环境感知能力。然而，传统通信系统与感知系统采用相互独立的架构设计，存在资源利用率低、协同交互性差的固有局限性，难以满足新兴应用对通信与感知能力的严苛需求。为此，探索面向通信感知融合的一体化新型无线设计范式成为一项重要的研究课题。下面将从通信感知同频共存与同平台融合以及高频大规模MIMO通信感知融合两个方面的国内外研究现状进行概述。

**1.2.1 通信感知同频共存与同平台融合**

通信与感知的主要功能目标存在显著差异。感知系统通过主动发射或被动接收观测信号，提取目标的空间位置信息或运动状态，以实现目标检测、参数估计和定位追踪功能[1]。而通信系统的设计侧重于优化信道容量、提升频谱利用率和降低误码率，以确保信息的高效、可靠传输[2]。上述差异使通信感知的共存与融合充满挑战。下面对此进行简要概述。

**通信感知同频共存研究现状：**在传统无线网络中，通信与感知通常作为独立系统运行，分别依赖不同的频谱、硬件与信号处理算法，遵循各自的设计原则，并服务于不同的应用需求。然而，随着无线通信系统传输频段的不断升高，通信系统与感知系统在工作频段上的相互重叠也不断增大，这促使研究人员探索二者在重叠频段内的频谱共享方案，以提高频谱资源的利用效率[3]。在频谱共享环境下，通信系统与感知系统之间可能会产生严重干扰，进而影响通信速率和感知精度。因此，通信感知共存系统的研究重点主要围绕共存优化与干扰抑制展开。机会式频谱共享被最早提出用于解决通信感知同频共存的挑战。例如，文献[4]提出一种面向旋转扫描感知系统和无线通信系统的频谱共享方案。其中，感知系统的主瓣方向不断旋转，通信系统在位于感知系统主瓣方向时保持静默，待主瓣远离后发射信号进行通信。除了机会式频谱共享外，通信感知同频共存的常见方案还包括增加通信系统与感知系统之间的物理隔离距离[5]、采用时频码域正交资源分配[6]，以及干扰迫零抑制[7]。然而，上述方案均存在系统自由度受限和频谱资源利用低的问题。为此，相关研究通过分析通信与感知互干扰下的性能指标，构建并求解优化问题，以联合设计发射信号，实现高效频谱共享与系统性能优化。例如，文献[8]首先定义通信信号对感知接收机的干扰噪声比，随后约束通信用户的最低SINR需求以及对感知系统的干扰上限，最后以发射功率消耗最小化为目标对通信基站的发射信号进行优化设计。进一步地，文献[9]在满足通信系统的速率需求以及发射信号功率约束条件下，以感知系统目标检测的SINR最大化为目标，对通信系统和感知系统的发射信号进行联合优化设计。

**通信感知同平台融合性能分析研究现状：**通信感知共存系统虽然同时具备无线通信和环境感知能力，但是通信和感知系统之间需频繁交换辅助信息以实现相互协作，带来了额外的交互开销和实现复杂度[10]。在此背景下，ISAC应运而生。ISAC通过共享硬件设施、频谱资源和信号处理算法，实现通信与感知功能的深度融合。相比于通信感知共存，ISAC可以显著降低系统的硬件开销，并进一步提升通信和感知的性能。一个重要的问题是揭示通信和感知的本质内在联系和性能折衷。该方向的早期工作可追溯至通信系统的研究，为后续ISAC系统的相关研究提供了重要的理论启示。文献[11]指出高斯信道中通信互信息量关于信噪比的导数等于接收端信号检测的最小均方估计误差（Minimum Mean Square Error，MMSE），首次从定量角度揭示了通信系统中通信容量与检测性能之间的折衷关系。在状态相关信道中，通信速率与信道状态估计精度之间同样存在性能折衷关系，通信速率的提升往往导致信道状态估计的均方误差增加[12]。在通信感知共存系统中，文献[13]分别分析了孤立子带、连续干扰抵消、通信注水最优和感知费舍尔信息最大四种情况下的通信感知性能边界。近年来，ISAC系统中通信与感知的性能分析已成为研究热点。相关研究表明，与传统的通信感知共存系统相比，ISAC系统不仅能够获得相同的分集增益，还能提供更高的自由度，从而实现更优的性能表现[14][15]。此外，文献[16]进一步揭示了ISAC系统中通信与感知之间的两类关键性能折衷关系：子空间折衷与确定-随机折衷。研究表明，当发射信号位于感知子空间并呈酉确定结构时，可实现最优感知性能；而当发射信号位于通信子空间并服从高斯随机分布时，则可达到最优通信性能。

**通信感知同平台融合波形设计研究现状：**除了性能域分析之外，在ISAC系统中进行波形设计，以逼近通信和感知的最优性能一直是学术界的研究热点。现有的通信感知融合波形设计准则可以主要分为三类，分别是：以通信为中心的设计，以感知为中心的设计和通信感知一体联合设计。第一类以通信为中心的设计强调在保证通信性能的前提下挖掘通信系统中的感知潜力。该方法利用导频，数据包帧头等通信信号波形实现感知功能，而现有通信系统的主要信号形式和协议保持不变。例如，文献[17]研究利用通信数据包帧头实现感知功能的方法，分别利用帧头中短训练字段的重复模式和信道估计字段的完美非周期自相关性，实现目标检测以及参数估计的目的。在第二类以感知为中心的设计中，数据信息被嵌入到感知信号波形中以实现感知系统的数据通信功能。一个典型的方案是索引调制[18]，该方案在空时频码等一个或多个正交域，将数据信息嵌入到感知信号参数的排列组合中，以实现感知波形的数据通信功能。尽管上述两类设计准则在一定程度上实现了通信与感知的融合，使通信信号可用于感知或利用感知信号进行信息传输，但受限于现有系统架构，其感知精度和通信传输速率仍然较低，难以满足实际应用需求。第三类通信感知一体联合设计则不受现有通信和感知系统的制约，重新构建信号波形和系统网络架构，直接面向通信和感知的性能指标进行波形和传输设计。其中，通信相关的性能指标包括信干噪比（Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio，SINR）[19]、多用户干扰[20]和能量效率[21]等；而感知相关的性能指标涉及波束方向图匹配误差[22]、CRB[23]以及目标检测概率[24]等。在该设计准则下，课题组初步开展了面向通信感知融合的高能效发射方案研究，并提出了一种高效的波形优化算法，在满足感知需求的前提下显著提升系统能量效率[25]；此外，课题组还探索了基于全双工通信的通信感知融合系统[26]。通过合理设计全双工基站的收发波形以及上行通信用户的发射功率，不仅能够确保感知性能，而且有效地抑制系统内存在的干扰，显著提升系统的通信速率，实现频谱资源的高效利用。

**1.2.2 高频大规模MIMO通信感知融合**

高频大规模MIMO技术通过构建高维度天线阵列并采用中高频信号传输，对通信与感知性能均带来显著性能提升。下面分别对高频MIMO信道下和大规模稀疏阵列下的通感融合相关研究进展进行简要概述。

**高频通信感知融合研究现状：**高频段是未来无线网络演进的重要方向。随着ISAC系统向高频段发展，其丰富的带宽资源不仅能够提高通信的传输速率，还能增强感知的分辨率和精度[27]。高频段虽然提供了丰富的带宽资源，但同时也面临抗干扰能力弱的挑战。具体而言，由于高频信号的波长较短，其在传播过程中易受到大气吸收、雨衰以及障碍物遮挡的影响，从而导致显著的路径损耗，并使信道自由度显著下降。为应对这一挑战，高频ISAC系统通常配备大规模MIMO天线阵列，通过在发射端形成高指向性、高增益的波束来有效增强信号能量，从而提高系统的抗干扰性能[28]。因此，大规模MIMO赋能的高频ISAC系统已成为重要的研究方向，研究重点主要包括其性能分析与传输优化。例如，文献[27]提出了一种用于位置辅助通信的传输帧结构和基于软信息的目标定位算法，并通过分析高频信道的统计特性，推导出该系统的通信与定位性能极限。此外，文献[29]提出了一种感知辅助的预测波束成形算法，将卡尔曼滤波器应用于目标的角度跟踪，以提升波束跟踪的精度和无线通信速率。然而，上述研究均基于传统的全数字传输架构，即每根天线均配备独立的射频链路，这种架构显著增加了系统的硬件成本和能耗，限制了其在实际应用中的可行性。混合传输架构通过在模拟域和数字域协同处理信号，实现混合波束成形以减少射频链路的需求，在降低硬件复杂度和能耗的同时，仍能保持较优的系统性能[2]。在此背景下，高频ISAC系统在混合传输架构下的研究逐渐成为学术界的关注热点，涵盖双功能导频设计[30]、波形优化[31]以及信道参数估计[32]等众多关键领域。例如，文献[30]在混合传输架构下设计了双功能导频信号，使其在估计通信信道的同时实现对潜在目标的探测，并对来自雷达目标的通信路径进行估计。文献[32]进一步利用高频信道的统计特性，首次将压缩感知技术引入ISAC系统的信号处理，以在保证信道估计性能的同时显著降低导频开销。**然而，现有针对高频ISAC系统的性能分析与传输优化相关研究尚未充分考虑信道自由度下降的影响，且缺乏与信道稀疏特性相匹配的优化设计算法。**

**通信和感知系统中稀疏阵列性能分析研究现状：**大规模MIMO系统中天线数量的增加显著提升了硬件成本、功耗和计算开销，从而加大了实际部署的难度。作为一种潜在的替代方案，稀疏MIMO通过放宽传统MIMO系统中半波长天线间距的限制，使系统能够在减少天线数量的同时扩大阵列孔径，从而有效降低系统部署成本并减小信号处理复杂度。值得指出的是，由于天线元件间隔大于半波长，稀疏阵列展现出与传统半波长间隔阵列不同的性质，例如主瓣更加狭窄、近场区域扩大和栅瓣的产生等。这些性质对于稀疏阵列系统的通信和感知性能均产生了显著影响。在感知系统中，稀疏阵列最初用于目标定位，通过构建虚拟共阵列来提高系统的空间分辨率[33]。此外，文献[34]推导了稀疏阵列下角度估计的CRB，并为适用于稀疏阵列的MUSIC算法提供了一个简化的渐近均方误差闭式表达式。文献[35]进一步分析了利用两个互质频率的稀疏均匀线性阵列的到达方向角估计性能，并推导了相应的CRB。研究表明，增大两个频率信号的相位差可以提高阵列的角度分辨率。文献[36]对互质阵列和嵌套阵列CRB的渐近行为进行了研究，并给出了阵元数目较大时这两种阵列的最佳配置参数。研究表明，当阵元数目有限时，互质阵列和嵌套阵列相较于均匀线阵可以获得更好的渐近估计性能。文献[37]则研究了低SNR下稀疏阵列CRB的非渐近行为特征。研究表明，在低SNR下，稀疏阵列相比传统密集均匀线阵能够实现更低的CRB，并且性能差距随着阵元数量的增加而增大。对于通信系统而言，稀疏阵列的栅瓣可能会造成用户间的强烈干扰，然而文献[38]的研究表明当用户密集分布时，由于主瓣宽度更窄，稀疏阵列与传统阵列相比更不容易受到用户间干扰的影响。另外，相关文献还对稀疏阵列可实现数据速率进行了推导。文献[39]对圆柱形稀疏阵列的空间分辨率和通信信道容量进行了分析，发现稀疏圆柱形阵列可以用更少的天线获得更高的分辨率，并且其上行链路信道容量大于具有相同天线数的传统均匀圆柱形阵列。文献[40]研究了模块化超大规模阵列在近场通信中的性能，推导了系统最大SNR的闭式表达式，并分析了阵列尺寸增大时SNR的渐近缩放规律。目前，稀疏阵列性能分析的研究主要集中在通信和感知系统领域，而稀疏阵列在ISAC系统中的性能分析尚未得到充分探索，仍然是一个亟待研究的方向。

**稀疏阵列的阵元位置设计与传输方法研究现状：**稀疏阵列的阵元排布与系统自由度、阵列空间分辨率密切相关，合理的阵列位置设计不仅能够有效抑制栅瓣，减轻用户间干扰，提升感知目标检测精度，还有助于以更少的天线数目实现更优的通信感知性能，从而提高系统资源利用率和能量效率。目前关于稀疏阵列设计的工作主要集中在感知领域，很多文献在完成稀疏阵列设计的基础上进一步对感知波形进行设计。例如，文献[41]通过将两个具有不同阵元间隔的均匀线阵并排放置，设计了一种具有位移子阵列的嵌套阵列。与以往的阵列结构相比，该阵列提供了更大的虚拟阵列孔径，并增强了到达方向角估计性能。文献[42]提出了一种广义非冗余稀疏数组设计策略，通过析取规划和混合整数线性规划优化阵列结构，为到达方向角估计提供了更高的自由度。进一步，文献[43]提出了一种基于整数线性规划的稀疏阵列设计框架，对非冗余阵列和最小冗余阵列进行了优化设计。所提出方案允许根据冗余需求灵活调整约束条件，还能够扩展到具有更高阶累积量的阵列设计。文献[44]考虑了一种环境依赖型感知接收阵列，通过开关控制天线阵元是否激活，以灵活构建所需的稀疏阵列。作者在激活天线数有限的约束下最大化接收SINR，实现了对稀疏阵列阵元位置和波束赋形的同时优化。通信领域有关稀疏阵列设计的研究较少，关于匹配稀疏阵列的通信传输方案的研究也较为有限。文献[45]研究了毫米波MIMO通信系统中非均匀线性天线阵列的部署优化，通过优化天线阵元位置最大限度提高系统的有效多路复用增益。文献[46]充分考虑通信系统的特点，提出了一种基于凸优化的稀疏阵列设计方法，并基于优化得到的稀疏阵列构建了波束赋形码本。文献[47]研究了部署模块化超大规模阵列的多用户MIMO通信系统，提出了一种多用户调度方案有效缓解了栅瓣导致的用户间干扰问题。**目前稀疏阵列相关研究工作主要集中于单一通信或感知场景下的基本性能分析及信号处理设计，关于稀疏阵列在通感融合场景下的应用潜力尚未得到充分揭示和探索。**

综上所述，无线信道稀疏与大规模阵列稀疏环境下的高频通感融合技术研究尚未充分研究，仍有许多开放问题亟待解决。表1总结了通信与感知功能在系统架构需求与稀疏特征影响等方面的异同。从该表格可以看出，通感双功能有一定的共同点，例如大带宽传输提高性能，采用数模混合/相控-MIMO混合的架构减少射频链数目降低硬件成本等，这些共同点为高频通感融合的实现提供了基础。然而，通信与感知在信号形式、对于信道自由度的需求等方面存在显著差异，为一体化的设计带来了新的挑战。

表1 通信与感知信号与系统简要对比

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | | 通信 | 感知 |
| 系统架构需求 | 频段 | 中高低频段 | 以LoS径为主的中高频段 |
| 带宽 | 大带宽，提高传输速率 | 大带宽，提高感知精度 |
| 波形 | 较为复杂的调制数据符号 | 相对简单的准确定性信号 |
| 硬件架构 | 混合数模波束赋形架构 | 混合相控-MIMO架构 |
| 稀疏特征影响 | 信道稀疏 | 多径丰富度降低，空间复用  增益与传输可靠性受损 | 多径干扰减弱，感知分辨率  与测量精度提升 |
| 阵列稀疏 | 阵列孔径增大，空间自由度增加，波束分辨率提升 | |
| 用户间干扰加剧 | 目标虚检，感知角度模糊 |

**1.3 应用前景**

本项目面向未来高频段大规模MIMO系统，结合通信感知深度融合的技术发展趋势，研究信道与阵列双稀疏特征下的高频通感融合理论与方法，以应对广域行业应用服务需求多变、多维资源受限的挑战。**项目拟形成具有自主知识产权的专利成果、高水平学术论文成果以及基于硬件平台的实物演示验证系统，满足通感融合技术在新兴应用场景下的高性能需求，为我国未来6G网络的商业化应用提供理论支撑和技术储备。**

**参考文献**

1. Q. He, R. S. Blum, H. Godrich, and A. M. Haimovich, “Target velocity estimation and antenna placement for MIMO radar with widely separated antennas,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 4, no. 1, pp. 79–100, Feb. 2010.
2. X. Yu, J.-C. Shen, J. Zhang, and K. B. Letaief, “Alternating minimization algorithms for hybrid precoding in millimeter wave MIMO systems,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 10, no. 3, pp. 485–500, Apr. 2016.
3. F. Liu et al., “Seventy years of radar and communications: The road from separation to integration,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 40, no. 5, pp. 106–121, Jul. 2023.
4. R. Saruthirathanaworakun, J. M. Peha, and L. M. Correia, “Opportunistic sharing between rotating radar and cellular,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 30, no. 10, pp. 1900-1910, Oct. 2012.
5. B. Li and A. P. Petropulu, “Joint transmit designs for coexistence of MIMO wireless communications and sparse sensing radars in clutter,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 53, no. 6, pp. 2846–2864, Dec. 2017.
6. Q. Zhao and B. M. Sadler, “A survey of dynamic spectrum access,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 3, pp. 79–89, May 2007.
7. S. Sodagari, A. Khawar, T. C. Clancy, and R. McGwier, “A projection based approach for radar and telecommunication systems coexistence,” in *IEEE Glob. Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Anaheim, CA, USA, Dec. 2012, pp. 5010–5014.
8. F. Liu, C. Masouros, A. Li, T. Ratnarajah and J. Zhou, “MIMO radar and cellular coexistence: A power-efficient approach enabled by interference exploitation,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 66, no. 14, pp. 3681-3695, Jul. 2018.
9. B. Li and A. Petropulu, “MIMO radar and communication spectrum sharing with clutter mitigation,” in *IEEE Radar Conf. (RadarConf)*, Philadelphia, PA, USA, Jun. 2016, pp. 1-6.
10. F. Liu, L. Zhou, C. Masouros, A. Li, W. Luo, and A. Petropulu, “Toward dual-functional radar-communication systems: Optimal waveform design,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 66, no. 16, pp. 4264–4279, Aug. 2018.
11. D. Guo, S. Shamai, and S. Verdu, “Mutual information and minimum mean-square error in Gaussian channels,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 4, pp. 1261–1282, Apr. 2005.
12. Sutivong, M. Chiang, T. M. Cover, and Y.-H. Kim, “Channel capacity and state estimation for state-dependent Gaussian channels,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 4, pp. 1486–1495, Apr. 2005.
13. R. Chiriyath, B. Paul, G. M. Jacyna, and D. W. Bliss, “Inner bounds on performance of radar and communications co-existence,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 64, no. 2, pp. 464–474, Jan. 2016.
14. C. Ouyang, Y. Liu, and H. Yang, “MIMO-ISAC: Performance analysis and rate region characterization,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 12, no. 4, pp. 669–673, Apr. 2023.
15. C. Ouyang, Y. Liu, and H. Yang, “Performance of downlink and uplink integrated sensing and communications (ISAC) systems,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 11, no. 9, pp. 1850–1854, Sep. 2022.
16. Y. Xiong, F. Liu, Y. Cui, W. Yuan, T. X. Han and G. Caire, “On the fundamental tradeoff of integrated sensing and communications under Gaussian channels,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 69, no. 9, pp. 5723-5751, Sep. 2023.
17. P. Kumari, N. J. Myers, and R. W. Heath, “Adaptive and fast combined waveform-beamforming design for mmWave automotive joint communication-radar,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 15, no. 4, pp. 996–1012, Jun. 2021.
18. D. Ma, N. Shlezinger, T. Huang, Y. Liu, and Y. C. Eldar, “Joint radar-communication strategies for autonomous vehicles: Combining two key automotive technologies,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 37, no. 4, pp. 85–97, Jul. 2020.
19. H. Hua, J. Xu, and T. X. Han, “Optimal transmit beamforming for integrated sensing and communication,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 8, pp. 10588–10603, Aug. 2023.
20. F. Liu, C. Masouros, A. Li, H. Sun, and L. Hanzo, “MU-MIMO communications with MIMO radar: From co-existence to joint transmission,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 2755–2770, Apr. 2018.
21. J. Zou, S. Sun, C. Masouros, Y. Cui, Y.-F. Liu, and D. W. K. Ng, “Energy-efficient beamforming design for integrated sensing and communications systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 72, no. 6, pp. 3766–3782, Jun. 2024.
22. X. Liu, T. Huang, N. Shlezinger, Y. Liu, J. Zhou, and Y. C. Eldar, “Joint transmit beamforming for multiuser MIMO communications and MIMO radar,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 68, pp. 3929–3944, 2020.
23. F. Liu, Y.-F. Liu, A. Li, C. Masouros, and Y. C. Eldar, “Cramér-Rao bound optimization for joint radar-communication beamforming,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 70, pp. 240–253, 2022.
24. G. Cheng, Y. Fang, J. Xu, and D. W. K. Ng, “Optimal coordinated transmit beamforming for networked integrated sensing and communications,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 8, pp. 15059–15074, May 2024.
25. Z. He, W. Xu, H. Shen, Y. Huang, and H. Xiao, “Energy efficient beamforming optimization for integrated sensing and communication,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 11, no. 7, pp. 1374–1378, Jul. 2022.
26. Z. He, W. Xu, H. Shen, D. W. K. Ng, Y. C. Eldar, and X. You, “Full-duplex communication for ISAC: Joint beamforming and power optimization,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 41, no. 9, pp. 2920–2936, Sep. 2023.
27. G. Kwon, Z. Liu, A. Conti, H. Park, and M. Z. Win, “Integrated localization and communication for efficient millimeter wave networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 41, no. 12, pp. 3925–3941, Dec. 2023.
28. E. Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. W. Heath, “Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 3, pp. 1499–1513, Mar. 2014.
29. F. Liu, W. Yuan, C. Masouros, and J. Yuan, “Radar-assisted predictive beamforming for vehicular links: Communication served by sensing,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 11, pp. 7704–7719, Nov. 2020.
30. F. Liu, C. Masouros, A. P. Petropulu, H. Griffiths and L. Hanzo, “Joint radar and communication design: Applications, state-of-the-art, and the road ahead,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 6, pp. 3834-3862, Jun. 2020.
31. X. Wang, Z. Fei, J. A. Zhang, and J. Xu, “Partially-connected hybrid beamforming design for integrated sensing and communication systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 70, no. 10, pp. 6648–6660, Oct. 2022.
32. Z. Gao et al., “Integrated sensing and communication with mmWave massive MIMO: A compressed sampling perspective,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 3, pp. 1745–1762, Mar. 2023.
33. P. Pal and P. P. Vaidyanathan, “Nested arrays: A novel approach to array processing with enhanced degrees of freedom,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 58, no. 8, pp. 4167–4181, Apr. 2010.
34. M.Wang and A.Nehorai, “Coarrays, music, and the Cramér-Rao bound,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 65, no. 4, pp. 933–946, Feb. 2017.
35. M. Wang, Z. Zhang, and A. Nehorai, “Further results on the Cramér-Rao bound for sparse linear arrays,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 67, no. 6, pp. 1493–1507, Mar. 2019.
36. M. Guo, Y. D. Zhang and T. Chen, “Performance analysis for uniform linear arrays exploiting two coprime frequencies”, *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 25, no. 6, pp. 838-842, Jun. 2018.
37. S. Shahsavari and P. Pal, “Cramér-Rao bounds and resolution benefits of sparse arrays in measurement-dependent SNR regimes,” *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 32, pp. 601-605, Jan. 2025.
38. H. Wang and Y. Zeng, “Can sparse arrays outperform collocated arrays for future wireless communications?”, in *IEEE Glob. Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Kuala Lumpur, Malaysia, Mar. 2024, pp. 667-672.
39. N. Wu, F. Zhu and Q. Liang, “Evaluating spatial resolution and channel capacity of sparse cylindrical arrays for massive MIMO”, *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23994-24003, Oct. 2017.
40. X. Li, H. Lu, Y. Zeng, S. Jin, and R. Zhang, “Near-field modeling and performance analysis of modular extremely large-scale array communications,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 26, no. 7, pp. 1529-1533, Jul. 2022.
41. P. Gupta and M. Agrawal, “Design and analysis of the sparse array for DoA estimation of noncircular signals,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 67, no. 2, pp. 460-473, 15 Jan. 2019.
42. Ahmed and Y. D. Zhang, “Generalized non-redundant sparse array designs”, *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 69, pp. 4580-4594, Aug. 2021.
43. Y. Zhuang, X. Zhang, Z. He, M. S. Greco and F. Gini, “Sparse array design via integer linear programming,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 72, pp. 4812-4826, Sep. 2024.
44. S. A. Hamza and M. G. Amin, “Hybrid sparse array beamforming design for general rank signal models”, *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 67, no. 24, pp. 6215-6226, Nov. 2019.
45. P. Wang, Y. Li, Y. Peng, S. C. Liew and B. Vucetic, “Non-uniform linear antenna array design and optimization for millimeter-wave communications”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 11, pp. 7343-7356, Aug. 2016.
46. M. Lou, J. Jin, H. Wang, D. Wu, L. Xia, Q. Wang, *et al.*, “Performance analysis of sparse array based massive MIMO via joint convex optimization”, *China Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 88-100, Mar. 2022.
47. X. Li, Z. Dong, Y. Zeng, S. Jin and R. Zhang, “Multi-user modular XL-MIMO communications: Near-field beam focusing pattern and user grouping”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 10, pp. 13766-13781, Oct. 2024.

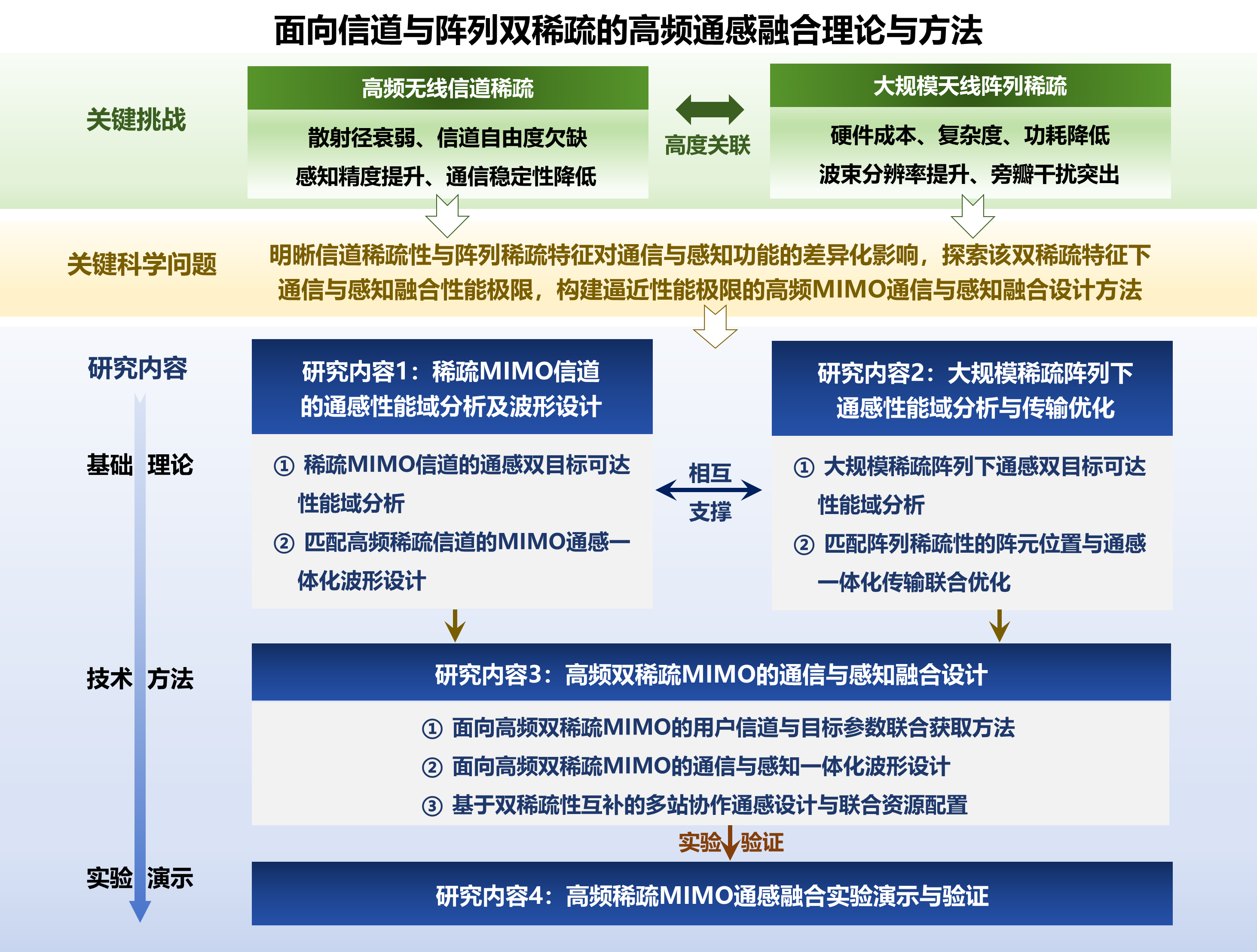
2．**项目的研究内容、研究目标，以及拟解决的关键科学问题**（此部分为重点阐述内容）**；**

**2.1 研究目标**

针对高频大规模MIMO通感融合技术在未来网络应用中面临的信道稀疏与阵列稀疏瓶颈问题（稀疏带来的自由度受限的瓶颈问题），以项目组在MIMO系统性能分析与传输设计、通感融合一体化信号设计、分布式优化设计等方面已取得的研究成果为基础，利用随机矩阵分析、凸优化和机器学习等理论方法，建立一套面向信道与阵列双稀疏的高频MIMO通感融合理论框架，重点解决“如何明晰信道稀疏性与阵列稀疏特征对通信与感知功能的差异化影响，刻画该双稀疏特征下通信感知融合双目标性能区域及边界，并设计能逼近性能域边界的通信与感知融合方法”这一关键科学问题，为高频大规模MIMO通感融合技术在未来网络的应用提供理论与技术支撑。

**2.2 研究内容**

根据研究目标，项目将面向MIMO信道与大规模天线阵列的双稀疏特征，开展高频通感融合理论与方法研究。研究内容逻辑结构关系如下图所示。



图X 项目研究内容及其逻辑结构关系图

**2.2.1 稀疏MIMO信道的通感性能域分析及波形设计**

为满足未来移动网络对高速数据传输与高精度感知的新需求，利用6 GHz以上乃至毫米波等高频段频谱资源已成为重要发展趋势之一。与存在丰富多径散射的中低频段电磁波传播特性不同，高频信号在传播过程中由于受到严重路径损耗等影响，MIMO信道通常表现为以直达径分量为主的近似低秩高维矩阵。由此，高频信道的强稀疏性会导致MIMO系统信号传输的自由度显著下降。这种欠自由度特性对通信与感知性能均会产生深刻影响，目前仍缺乏系统性的定量分析。鉴于此，项目将针对高频信道的稀疏特性，开展通信感知性能域的定量分析，并探索与高频MIMO信道稀疏特性相匹配的通感双功能波形设计方法。具体研究内容包括：

1. **稀疏MIMO信道的通感双目标可达性能域分析**

为探明高频通感融合系统的性能极限，需要定量分析信道自由度受限对通信和感知这两个目标的可达性能区域边界的影响。对感知而言，高频信号的直射径传播特征能够有效抑制多径干扰，有助于提高感知分辨率与测量精度。然而，对无线通信而言，高频信号非直射路径严重衰减、多径丰富度大幅降低，导致MIMO信道的空间复用增益不足，系统传输可靠性受损。由此可见，高频MIMO信道的稀疏特性对通信和感知呈现出差异化影响。由于高频信道自由度对通信与感知性能的量化关系尚未得到充分揭示，系统“通信速率-感知误差”双指标能力折衷的可达性能域边界仍不明确。为此，本项目拟利用高频稀疏信道的角度域分解，首先分析信道多径概率分布与信道矩阵二阶统计量的显式关系表征，由此构建高频通感融合系统的信号传输角度域统计模型。然后，基于此模型，推导高频欠自由度信道下的“通信速率-感知误差-信道自由度”多指标参数博弈关系的闭合表达式，从而定量刻画通感可达性能域边界。进一步，项目将推广上述分析方法到多点协作的通感融合场景中，分析MIMO信道稀疏环境下的节点间传输干扰与通信感知互干扰之间的耦合影响关系，定量刻画多用户通信与多目标感知共存的协作通感融合系统可达性能域的边界。

1. **匹配****高频稀疏信道的MIMO通感一体化波形设计**

感知需求的引入会与通信需求竞争使用无线信道自由度。在高频信号传播时，信道稀疏性导致MIMO信道的空间自由度严重受限，使得系统中通信需求与感知需求对信道空间自由度的竞争加剧，成为制约通感融合系统整体性能的瓶颈。为此，项目拟突破现有通感系统中窄带一体化波形直接用于宽带系统的典型技术路线，在优化通感一体化波形时，联合考虑高频段大带宽的频率选择性特征，通过将大带宽MIMO信号的波束斜视（Beam Squint）效应对通信的不利影响，转化为对目标跟踪感知的有益因素，从而缓解自由度受限的挑战，提升MIMO稀疏信道下通感一体化宽带波形的优化性能。具体而言，信号带宽扩大使得大规模MIMO天线不同阵元间产生不可忽视的信号传播时延，导致阵列的空间导引矢量随频率变化，由此MIMO波束会在不同频点上产生变化的指向偏差，形成波束斜视。拟首先分析并推导不同方向上的斜视波束增益的闭合表达式，揭示MIMO规模、载波频率、信号带宽等关键参数对信号自由度的影响机理。然后，基于上述理论关系式，主动利用波束斜视效应，研究基于该效应的目标角度估计与反射系数估计等感知方法，推导波束斜视辅助的通信与感知可达性能域的边界。最后，研究MIMO通感波形设计、频段分配、以及收发波束赋形的联合优化方法，最大限度地降低高频信道稀疏性对通感融合性能的负面影响。

**2.2.2 大规模稀疏阵列通感性能域分析与传输优化**

稀疏阵列技术通过增大阵元间距，能够有效降低系统复杂性与硬件开销。与传统采用半波长阵元间隔的密集阵列相比，稀疏阵列能实现更大的阵列孔径，从而获得更高的空间自由度与波束分辨率。但阵元间隔的扩大同时会引入较大的旁瓣干扰，导致系统性能损失。为充分发挥稀疏阵列的优势，已有部分研究工作对其在通信系统与感知系统中的基本性能表现及设计方法展开探索（主要针对感知定位），然而，稀疏阵列在通感融合场景下的应用潜力尚未得到充分揭示（太虚了，融入通信之后的耦合影响未揭示）。因此，项目将针对大规模阵列的阵元稀疏特性，研究通信感知双目标性能的定量分析与性能边界刻画，并探索适配稀疏MIMO架构的通感一体联合优化方法。具体研究内容包括：

1. **大规模稀疏阵列下的通感双目标可达性能域分析**

为充分挖掘大规模稀疏MIMO在通信感知融合应用中的潜力，需构建通感双目标性能域分析框架，并探明其性能极限。一方面，稀疏阵列下阵元的稀疏排布能够增大阵列孔径，从而扩展信号自由度、提升波束分辨率，有助于增强通信稳定性与感知精度。另一方面，阵元间距增大会在空间波束中滋生较强的旁瓣，加剧通信用户间干扰，造成感知角度模糊。此外，阵列孔径的增大还会导致高频传输下近场区域的扩展，使得传统的远场分析方法不再适用。由此可见，大规模阵列的稀疏特性对通感融合系统呈现显著的双面性影响（这句修改）。基于此，项目首先聚焦基于均匀稀疏MIMO阵列的远场通感融合模型，定量分析“通信速率-感知误差”双目标性能折衷关系随阵列规模、阵元间距等关键参数的渐近变化规律，进而刻画稀疏MIMO下的通感可达性能域边界。然后，进一步考虑大孔径、高频段引入的近场效应，分析近场球面波传播模型中新增的距离维度对通感双目标性能博弈关系的影响，探明近场均匀稀疏MIMO的通感可达性能域边界。最后，将上述基于均匀阵列的分析方法推广到包括xxx在内的非均匀稀疏阵列架构下（如嵌套阵列、互质阵列等，放前面），揭示稀疏阵列几何特征与通感性能边界之间的关联规律。

**（2）匹配阵列稀疏性的阵元位置与通感一体传输联合设计**

稀疏MIMO阵列的阵元排布方式直接影响阵列的虚拟孔径扩展能力与空间波束特征（如主瓣宽度、旁瓣数量和幅度等，放前面）。为充分发挥稀疏阵列在通感融合场景中的优势，需要在有限的阵元数量下优化阵列布局，以同时提升感知精度与通信可靠性。另一方面，通信用户和感知目标位置的动态变化特性会导致稀疏阵列的旁瓣干扰问题更加突出，亟需设计与稀疏阵列相匹配的通感一体传输方法。为此，本项目拟探索稀疏MIMO阵元位置与通感一体化传输的联合优化方法。具体而言，首先分析旁瓣方向、增益与阵列稀疏结构的显式关系，弱化对通信影响，借助多方向性、缓解多目标跟踪自由度问题。随后，基于优化所得稀疏阵列布局，联合考虑用户与目标的运动特征，设计天线选择、用户调度、波形设计等多元素联合优化方法，缓解稀疏阵列旁瓣干扰*突出问题*。最后，将上述联合方法推广至近场场景，解决近场波束聚焦带来的旁瓣在“角度-距离”二维扩散的干扰问题。

**2.2.3 高频双稀疏MIMO的通信与感知融合设计**

信道稀疏性与阵列稀疏性并存是未来高频通感融合系统的关键特征（典型场景下，会共存，欠自由度跟突出）。区别于仅存在单一稀疏性的场景，双稀疏特性相互交织共同作用，对通信与感知性能产生差异化的复杂影响。针对通信过程，稀疏阵列的栅瓣效应通过构造虚拟多径分量，能够一定程度补偿信道稀疏性导致的自由度损失。针对感知需求，稀疏散射环境抑制了栅瓣干扰的弥散效应，从而能够减小参数估计的精度损失。针对高频xxx的双稀疏特性，尚未有相关研究探索其通感场景联合作用机理。鉴于此，项目将聚焦双稀疏特征，探索基于稀疏特征互补的信道信息与目标参数联合估计方法，优化符合双稀疏特征的一体化波形设计，并通过多站协同实现稀疏性的跨节点互补，提升通感融合性能。具体研究内容包括：

**（1）面向高频双稀疏MIMO的用户信道与目标参数联合获取方法**

高效、准确的通信信道信息与目标参数的获取是实现高容量通信与高精度感知的先决条件。在资源受限的条件下，xxx，将目标参数获取过程融入信道估计、波束训练等过程，复用导频信号或探测波束，可实现通信信道参数和感知目标参数的联合获取，提升资源利用率。在高频场景下，直达径，波束训练方法能够高效地获取全域的多径角度信息，且与感知任务中的波束扫描模式高度类似，有力促进了两者的深度集成。然而，通信信道信息获取旨在最大化通信速率，而感知目标参数估计则侧重于提升探测精度，两者目标并不等价，进而导致差异化的最优波束码本。此外，大规模稀疏阵列引入一方面显著增加了波束训练开销，更重要的是其带来的栅瓣效应会与主瓣混淆，进而对双功能波束训练过程产生严重干扰。为此，本项目拟面向高频双稀疏MIMO，研究信道参数和目标参数联合获取方法。首先，针对波束训练下通感的差异化目标，基于最小均方误差（MMSE）准则，构建能够权衡通信速率和感知精度的统一设计准则，并充分挖掘信道稀疏特性，研究最优稀疏码本设计。然后，针对大规模稀疏阵列导致的巨大开销与栅瓣效应，通过划分不同区域进行分层波束探测，并研究最优区域划分与分层码本设计，从而减少栅瓣效应的负面影响。

1. **面向高频双稀疏MIMO的通信与感知一体化波形设计**

高频双稀疏MIMO下的通感双功能波形设计是实现高速率通信传输以及高精度目标追踪的关键技术。然而，受限于双稀疏特征，信道信息与目标运动参数的估计不可避免存在更多误差，估计误差会通过波束赋形的错配引发传输阶段的速率损失与追踪精度恶化，如何在非完美参数估计条件下提升数据传输速率与目标追踪精度成为一大难题。此外，阵列与信道的双稀疏特性呈现一定的互补效应，对通信与感知功能的产生差异化影响。如何基于稀疏特征的先验信息，优化双功能波形设计以减少对两者性能的负面影响，仍然有待探索。为此，本研究点聚焦于在高频双稀疏MIMO下融合数据传输与目标追踪的双功能通感融合波形设计。首先，依据稀疏信道的统计模型，理论分析双稀疏性特性对通信速率和跟踪感知精度具体影响，定量刻画推导出通信速率与应用卡尔曼滤波下的目标追踪精度。然后，建模双稀疏融合特征下信道参数与目标参数获取的误差结构特征，基于误差传播机制分析，研究鲁棒性的双功能波形设计方法，以最小化非完美估计带来的性能损失。最后，结合鲁棒性波形设计，推导“估计时长-传输时长”最优划分比例的闭式解，研究基于李雅普诺夫优化的动态时间分配算法，实现时变信道条件下长时平均通感性能的均衡优化。干扰方向的数量平方增加；同时动态变化；低复杂度优化算法

1. **基于双稀疏性互补的多站协作通感设计与联合资源配置**

高频双稀疏MIMO严重制约了单基站通感融合系统的性能边界。单站架构不仅受限于高频信号的高路径损耗导致的覆盖半径收缩，更面临阵列稀疏性导致的栅瓣效应难以通过传统空域滤波消除的固有缺陷。为此，亟待构建多基站协同网络架构实现稀疏性互补，通过空间分集增益扩展覆盖范围，通过多视角融合提升感知分辨率，从而突破单站系统的物理性能极限。并且，通过进行多站之间的分区覆盖与干扰抵消，能够有效降低栅瓣效应的负面影响。然而，多站协作架构不可避免地引入多维复杂干扰，通信业务需抑制多站信号干扰，而感知业务需协同利用多站探测信号，二者在干扰管理层面存在本质性矛盾。此外，多站协同机制带来的高维联合优化问题与海量信令交互需求，对实际系统的可实现性构成严峻挑战。因此，本研究点聚焦于多站通感融合系统，针对高频双稀疏特征，探索稀疏性互补的多点高效协作机制与优化方法。首先，建立双稀疏特征下多站干扰的统计模型，定量刻画其对通信速率与感知精度的影响，揭示影响通信与感知性能的差异化机理。基于理论结果，研究多站协作区域划分设计，创新性构建栅瓣干扰转化机制，将传统抑制的栅瓣重构为辅助感知辐射源，同时研究通信干扰对齐抵消方法。最后，基于信道稀疏先验信息，减少多站间的高维信道信息交互与信令开销，探索低复杂度的联合感知信号处理方法与有限开销下的鲁棒性联合资源配置方法，解决限制多站协作通感融合的实际部署难题。

**2.3 拟解决的关键科学问题**

1. **科学问题一：针对高频MIMO信道的强稀疏性，如何分析通感双目标可达性能域并设计与信道稀疏特性相匹配的一体化波形？**

在具有强稀疏性的高频MIMO信道下，表征通信感知双任务目标的性能可达域并研究匹配信道稀疏特性的一体化波形设计是十分重要的任务。然而，高频MIMO信道的稀疏特性对通信和感知性能呈现差异化影响，且会加剧通信与感知需求对空间自由度的竞争，现有集中在中低频段的通感融合分析研究方法可能不再适用。为此，项目首先揭示高频信道自由度对通信与感知性能的量化关系，分析推导“通信速率-感知误差-信道自由度”多指标闭合关系式，定量刻画通感可达性能域边界，随后利用大带宽MIMO信号的波束斜视效应对目标感知的潜在优势，考虑高频段大带宽的频率选择特性，研究MIMO波形设计、频段分配、以及波束赋形的联合优化方法，缓解自由度受限的挑战。

1. **科学问题二：针对大规模MIMO阵元排布稀疏的特征，如何刻画通感双目标可达性能域并设计一体化联合传输方案？**

稀疏MIMO技术通过增加天线阵列的阵元间距，显著减少天线规模、降低系统硬件开销。然而，阵元数目的减少会降低信号自由度和空间分辨率，更大的天线间距也会产生较大的旁瓣，这些转变为MIMO通感融合系统的分析与设计带来全新挑战。为此，项目首先针对均匀稀疏阵列，揭示阵列稀疏度对信道容量、干扰抑制、目标检测、感知定位等通信感知性能的量化关系，明晰阵列均匀稀疏特性下的双任务目标的性能域及理论边界，随后推广上述分析方法至非均匀稀疏阵列，探索适配通感融合需求的最优阵列架构与阵元布局方式，并联合用户调度、波形和波束赋形等多角度，研究稀疏MIMO下的通感一体优化设计方法，获得保持或接近传统密集MIMO阵列下的通感融合性能表现。

1. **科学问题三：针对信道与阵列的双稀疏的挑战，如何构建高频双稀疏MIMO下的通信与感知融合设计方法？**

构建面向高频双稀疏MIMO的通信与感知融合理论与设计方法是推动通感融合技术在未来网络中实际应用的关键难题。然而，目前对于稀疏MIMO技术的研究主要集中在感知定位领域以及简单场景下的通信性能分析，关于其在高频通感融合应用需求下的相关研究工作尚不充分。为此，项目基于前文研究结果，深度剖析信道自由度与阵列稀疏度对通感双功能的联合影响机理，构建高频双稀疏MIMO通感融合系统的信号传输角度域模型，探索面向高频双稀疏MIMO的用户信道与目标参数联合获取方法，研究一体化波形设计方法，随后推广到多站协作场景，利用多站的空间位置优势研究基于双稀疏性互补的多站协作通感设计与联合资源配置方法。

3．**拟采取的研究方案及可行性分析**（包括研究方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明）；

根据上面拟定的研究目标和内容，本项目将从欠自由度MIMO信道的通感性能域分析及波形设计、大规模稀疏阵列下通感性能域分析与传输优化以及高频双稀疏MIMO的传输与感知融合设计三个角度展开研究，再搭建高频稀疏MIMO通感融合实验平台进行验证与演示。项目研究遵循由理论分析到算法设计，再由算法设计到系统验证的推进过程。具体的研究方案和技术路线，以及项目可行性分析如下。

**3.1 稀疏MIMO信道下通感性能域分析及波形设计**

性能域分析是指导通信感知融合系统研究的关键理论基础，而波形设计则是影响其实际应用的关键工程技术问题。现有的关于通信感知融合系统的性能域和波形设计研究主要针对的是低频段系统，高频系统的通信感知性能域研究和波形设计尚处于起步阶段。相比于低频段系统，高频段信号具有传输损耗更大、空间多径数量更少、天线数量更大和带宽资源更多等特点。高频信号的这些特点导致高频传输信道具有空间稀疏特性，同时要求资源受限的系统只能采用混合架构而不能采用全数字架构，这给通信感知融合系统的性能域研究和波形设计增加了新的挑战。本研究点将首先基于高频欠自由度传输场景，建立通信感知融合系统的通用信号模型并推导通信和感知系统的性能指标，接着分别构建通信感知融合系统的可达性能域，推导通信感知性能指标关于信道自由度的闭式表达式或者紧致性能界，然后基于不同的系统设计准则，构建通信感知双目标可达性能域，最后，分析信道自由度下降对于通信感知的综合影响，推导出不同设计准则下的最优信道自由度。本研究点的整体技术路线示意图如图\figure{}所示，具体技术路线如下：

考虑下行多输入多输出（MIMO）信道场景，与低频信道一致，对于高频信道，也可以采用经典的多径传播模型将信道表示为：

其中表示多径数量，表示第条路径上的信道增益，和分别表示第条路径上的信号离开角和到达角，和分别表示发送和接收天线阵列响应函数。若考虑发送天线按均匀线性排列，那么发送天线阵列响应函数可以具体表示为：

其中和分别表示发送和接收天线数量，表示信号波长，表示天线间隔，通常设置。与低频段信号传播场景相比，高频信号在传输过程中面临更严重的路径损耗，导致直射路径分量远大于非直射路径分量，使得高频信道中的有效散射路径数量较少，即取值较小。这种信道特性直接影响通信和感知的系统性能。从通信的角度来看，由于主路径分量占主导地位，高频信道的矩阵通常表现为秩亏，使得信号传输主要依赖于主路径。然而，当该路径处于深度衰落时，通信性能会受到严重影响，导致信号接收质量下降，甚至引发系统性能瓶颈。相较之下，对于感知任务而言，高频信道的稀疏特性以及主路径的高能量特征反而带来了优势。一方面，多径数量较少可以降低目标检测过程中的虚警概率，提高检测精度；另一方面，主路径的能量较强有助于增强目标的可观测性，从而降低状态估计的均方误差。因此，高频信道的传播特性在通信和感知任务中呈现出不同的影响，为通信感知融合系统的设计带来了机遇和挑战。。

根据上述高频信道模型，可以分别建立高频段传输场景下的通信传输模型和雷达感知模型。一方面，发送信号经过自由空间传播后到达接收端，第个通信用户接收到的信号可以表示为：

其中表示加性高斯白噪声，表示基站到第个用户的信道，表示用户数量，表示发送给第个通信用户的数据符号，用于完成数据通信和目标感知功能。表示第个用户的波束成形向量，表示发射天线数量，该波束成形矩阵可以在全数字架构下实现，也可以在带有移相器网络的混合架构下实现，从性能分析的角度，这里选择最大比传输预编码向量。

另一方面，发送信号经过自由空间传播到达感知目标后发生反射产生回波信号，回波信号返回基站被接收天线接收，接收到的回波信号可以表示为：

其中表示发送天线和接收天线之间第条路径上关于第个散射体的目标响应矩阵，表示路径数量，表示散射体数量，表示数字波束成形矩阵，表示维发送数据，表示感知时间周期数，表示经过第个散射体的反射系数，分别表示第条路径上经过第个散射体的反射路径的信号到达角和离开角，表示高斯白噪声，表示接收天线数量。

基于上述通信和感知信号模型，可以给出表征通信和感知功能的性能指标。首先，对于通信系统，常见的性能指标包括系统容量、SINR、误码率以及系统中断概率等。对于感知而言，常见的性能指标包括均方估计误差（MSE）、目标检测概率、信簇噪比（SCNR）以及CRB等。在实际通信系统中，系统需求是动态变化的，因此适合系统的性能指标也是动态变化的。对于通信而言，系统容量，误码率等经典通信性能指标均与用户SINR成正相关，即较高的SINR能够提升数据传输速率并降低误码率，从而提高通信系统的整体性能；对于感知而言，目标检测概率，CRB等经典的感知性能指标均与回波信号的SCNR密切有关，其中较高的SCNR有助于提高目标检测的准确性并降低参数估计误差。因此，本研究选取通信SINR和感知SCNR作为性能分析的核心指标，重点探讨高频传输场景下信道自由度对这两个性能指标的影响。其中，第个用户的通信SINR可以表示为：

其中表示通信噪声方差。接收信号的感知SCNR可以表示为：

其中。

本研究将基于随机矩阵理论、概率论、最优化方法以及统计信号处理等基础理论，首先推导通信与感知性能指标关于信道自由度的闭式表达式或紧致性能界。随后，我们将系统性地分析信道自由度下降对不同系统设计准则下综合通信与感知性能的影响，并进一步推导各设计准则下实现性能最优所对应的最优信道自由度配置。

进一步考虑混合架构下的波形设计问题，本研究点选取通信容量和感知CRB作为优化目标。其中，通信容量的表达式为

在拓展目标场景下，我们选择对目标响应矩阵进行估计，估计的费舍尔信息矩阵为

预编码矩阵可以被表示为，其中和分别表示模拟预编码和数字预编码矩阵。在混合架构下，表现为一个秩亏的矩阵，这导致费舍尔信息矩阵不可逆，因而无法计算出CRB。为了解决这一问题，本研究提出基于贝叶斯准则，使用贝叶斯CRB作为优化准则。贝叶斯准则下的费舍尔信息矩阵可以被表示为

其中表示关于先验统计信息的费舍尔信息矩阵。根据中心极限定理，我们可以假设目标响应矩阵的先验信息满足独立同分布复圆高斯随机分布。此时，可以被表示为。这样，trace设计准则下的贝叶斯CRB的表达式就可以被表示为：。因此，混合架构下的波形设计优化问题就可以被表示为：

其中表示贝叶斯CRB门限，表示最大发射功率，表示恒模约束集合。由于贝叶斯CRB具有复杂的非线性形式，且模拟预编码矩阵需满足恒模约束，该优化问题呈现高度非凸性，难以直接求解。为此，本研究将结合矩阵理论、流形优化及非线性优化方法，寻求该问题的高质量次优解。同时，为降低计算复杂度，我们将进一步优化算法，提出高效的波形设计优化方案。

**3.2 大规模稀疏阵列下通感性能域分析与传输优化**

大规模稀疏阵列通感性能域分析与传输优化整体研究方案如图X所示。具体而言，项目将首先从理论研究出发，分析稀疏阵列几何参数对通信感知性能权衡关系的影响机制，推导远场和近场场景中不同稀疏阵列架构下通信与感知的双目标可达性能域。然后，基于性能分析提供的理论依据，探索ISAC系统中稀疏MIMO阵元位置与通感传输的联合设计方案。下面将以基础的线性稀疏阵列为例对具体研究方案进行阐述，但是在具体研究过程中项目将进一步考虑对稀疏平面阵列进行性能分析和优化设计。

考虑一个下行MIMO-ISAC系统，基站的发射和接收阵列均采用大规模均匀稀疏线阵，发射和接收天线数分别为和。基站发射和接收阵列天线间隔分别表示为和，其中为信号波长，和分别表示阵列的稀疏程度，满足和。个单天线用户位于基站远场，基站在为用户提供通信服务的同时作为单基地雷达对一个感知目标进行探测，发射信号可以表示为：

其中，为基站发送给个用户的通信符号，为感知专用符号，为通信波束赋形矩阵，为感知波束赋形矩阵。

基站发射信号经过通信信道到达用户接收机，用户接收信号可以表示为：

其中，为基站到用户的下行信道向量，为加性白高斯噪声。考虑多径信道模型，可以将表示为，其中为散射路径的数量，为散射路径的复增益，为发射阵列导向矢量，散射路径相对于发射天线阵列的离开角。

基站接收感知目标反射的回波信号，可以表示为：

其中，为感知目标响应矩阵，为加性白高斯噪声。若假设带探测目标为点目标，则可以进一步表示为，其中为感知目标反射系数，为接收阵列导向矢量，为感知目标相较于基站的角度。可以发现，通信信道与感知目标响应矩阵均与阵列导向矢量密切相关。然而对于配备大规模稀疏阵列的ISAC系统，基站发射和接收阵列天线阵元的稀疏排布将导致阵列导向矢量相较于传统半波长阵列发生变化，和具体可以表示为：和。

现有稀疏阵列性能研究多聚焦于单一通信或感知性能指标的独立评估，无法对通感性能边界随系统参数的变化规律进行刻画。对于通信系统，目前工作多基于迫零（ZF）、最小均方误差（MMSE）等经典波束赋形方案推导通信SINR、可达速率等性能指标的闭合表达式，然后对这些性能指标关于稀疏阵列参数的变化规律进行渐近分析。对于感知系统，现有研究多关注阵列的角度估计性能，很多工作在某些渐近假设下分析稀疏阵列到达方向估计的CRB的变化行为。

观察现有研究对稀疏阵列性能的分析过程可以发现，系统发射波形的设计将直接影响通信与感知性能指标的数学表达式，并进一步影响这些指标的渐近分析结果。因此，在对大规模稀疏MIMO-ISAC系统进行性能分析时，确定合理的波束赋形方案至关重要。与仅需要满足单一功能需求的通信与感知系统不同，ISAC系统的发射波形需同时支撑通信与感知功能，在进行发射波束赋形时涉及通信与感知功能之间的功率资源分配问题。不同功率分配比例下通信与感知性能的最优值确定了ISAC系统的通感可达性能域边界。因此，为了对该大规模稀疏MIMO-ISAC系统的通信感知双目标性能边界进行刻画，需要首先构建基于不同发射功率分配比例的ISAC波束赋形方案集合。这一过程可以通过构建并求解一系列ISAC波束赋形优化问题实现，此外，为了方便后续对通感性能界进行渐近分析，也可以考虑从现有经典通信和感知波束赋形方案出发构造通感融合波束赋形矩阵和，使其与发射功率分配参数之间有显式关系。

在确定ISAC波束赋形方案后，应选择通信和感知性能指标，推导其关于阵列稀疏程度和、天线数量和、发射功率分配参数等的闭式表达式。以通信和速率和感知CRB为例，将通信和速率记为，感知CRB记为。保持其他参数不变，改变参数，点在二维平面运动的轨迹即为此系统设置下的通信感知双目标性能边界，记为。为了研究稀疏阵列参数对通信感知性能边界的影响，需要分析当和趋于无穷大时边界关于各参数的渐近行为，讨论远场场景下大规模均匀稀疏线阵对ISAC系统通信感知性能权衡关系的影响，并与传统半波长阵列系统进行对比。最后，通过数值仿真验证上述性能分析所得出的结论。

当用户和感知目标位于基站近场时，远场的平面波模型在该场景下将不再适用，需要采用球面波模型对信号传播进行建模，因此阵列导向矢量将不仅与角度有关，还与距离有关。近场下发射和接收阵列导向矢量和可以表示为：

其中，表示散射体或感知目标相对于天线阵列中心的方位角，表示散射体或感知目标与天线阵列中心的距离，为载波波长，，表示第个发射天线到散射体或感知目标的距离，为天线单元间隔。

为了充分利用近场场景中距离维度引入的自由度，需要重新设计近场下ISAC波束赋形矩阵和，基于近场ISAC波束赋形方案推导所需通信和感知性能指标的数学表达式，重新刻画该场景下通感可达性能域边界，并参照远场下性能研究方法对近场下各种系统参数对性能边界的影响进行分析。

常见的非均匀稀疏阵列包括嵌套阵列（Nested Array）、互质阵列（Co-prime Array）、模块化阵列（Modular Array）等，其中嵌套阵列由两个具有不同天线间隔的均匀阵列拼接而成，互质阵列由两个重叠且具有不同天线间隔的均匀阵列组成，模块化阵列包含一系列均等间距的阵列模块，每个阵列模块为半波长间距的均匀阵列。由于各种非均匀稀疏阵列中阵元分布有显著差异，需要对其分别提炼阵列几何参数并推导相应的阵列导向矢量的表达式。然后，参照均匀稀疏阵列下通感可达性能界分析方法对非均匀稀疏阵列架构进行分析。

**3.3 XXX**

**3.4 可行性分析**

**项目研究内容与技术路线合理可行：**本项目首先聚焦信道与阵列单一稀疏的基础场景，揭示信道自由度与阵列稀疏度对通感融合系统性能的量化关系，分析信道/阵列稀疏下通感融合的可达性能域与性能边界，并研究逼近性能边界的通感一体设计方法。随后，依托上述研究结果，项目开展面向信道与阵列双稀疏的高频MIMO通感融合方法研究。最后开展硬件平台测试，并进行系统级验证与演示。总体来说，研究计划循序渐进、逻辑完备，技术方案详尽具体、切实可行。

**申请人团队的相关理论成果丰富：**项目团队具有良好的研究基础和科研能力。长期以来一直专注于中高频MIMO通信、MIMO通感感知一体化技术研究，相关领域已经发表学术论文100余篇， 6篇论文入选ESI热点论文，12篇论文入选ESI高被引论文。在 IEEE 顶级期刊和杂志上举办专刊，包括IEEE Wireless Communications 杂志专刊“目标导向的通信技术”，IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing 杂志专刊“面向B5G物联网下边缘学习的分布式信号处理技术”，在国际会议IEEE GLOBECOM、ICC进行关于分布式机器学习的大会报告，项目团队主要成员担任国际会议IEEE ICASSP、ICC、ITW、VTC、ICCC中技术程序委员会的共同主席。

**项目团队人员构成合理**：项目团队包括教授2名，副教授2名，讲师2名以及多名博士生和硕士生，项目组负责人和成员都是长期从事5G/6G通信理论、通感算一体化技术与目标导向的通信技术研究的一线科研人员，具有扎实的专业基础理论知识和丰富的技术应用成果积累。这些经历将有益于我们进一步研究多任务导向的分布式通感算网络传输理论与方法。

**团队项目经验积累丰富**：项目负责人和团队主要成员曾主持和参与过国家重点基础研究发展计划（973计划）、国家重点研发计划、自然科学基金等科研项目。在相关领域的基础理论与应用技术研究方面有着丰富的成果积累。项目申请人多次负责国家自然科学基金和省部级科研课题，具有良好的组织管理能力和科研项目负责经验，能够带领团队顺利完成预期的科研任务，解决项目拟攻克的关键科学问题。

基于上述情况，申请人认为**此项目内容合理完备、研究路线切实可行，团队理论基础坚实、项目经验丰富。总之，该项目可行性强，申请人坚信能够出色完成。**

4．**本项目的特色与创新之处；**

本项目紧密围绕面向信道与阵列双稀疏的高频通感融合理论与方法展开深入研究，其主要特色和创新点体现在以下三个方面。

1. **稀疏MIMO信道的通感融合理论与方法：**高频稀疏MIMO信道的欠自由度特性对通信与感知性能均会产生深刻影响，目前仍缺乏系统性的定量分析与专门的优化设计方法。项目针对高频稀疏MIMO信道，揭示信道空间自由度对通信与感知性能的量化关系，推导“通信速率-感知误差-信道自由度”多指标参数博弈关系的闭合表达式，从而定量刻画稀疏MIMO信道的通感可达性能域边界。随后，联合考虑高频段大带宽的频率选择性特征，主动利用大带宽MIMO信号的波束斜视效应缓解自由度受限的挑战，提升MIMO稀疏信道下通感一体化宽带波形的优化性能。
2. **大规模稀疏阵列下的通感融合理论与方法：**稀疏MIMO技术可以降低硬件复杂性，提供更高的空间自由度与波束分辨率，但同时也伴随旁瓣干扰突出、信号处理开销大等挑战。稀疏阵列在通感融合场景下的应用潜力尚未得到充分揭示。项目针对大规模稀疏阵列，分析“通信速率-感知误差”双目标性能折衷关系随阵列规模、阵元间距等关键参数的渐近变化规律，刻画远/近场通感可达性能域边界，并推广上述分析方法到非均匀稀疏阵列下，揭示稀疏阵列几何特征与通感性能边界之间的关联规律。随后，研究面向通感融合需求的大规模稀疏MIMO阵列几何结构设计问题，并联合考虑通感需求的动态变化，结合天线选择、用户调度、波形设计等角度研究动态阵元位置与通感传输的联合设计方案。
3. **高频双稀疏MIMO的通感融合方法：**针对信道稀疏性与阵列稀疏特征对通感双功能的差异化影响，构建高频稀疏MIMO传输与感知融合设计方法。采用大规模稀疏阵列的高频传输与感知是未来无线系统的必然发展趋势。然而，目前对于高频稀疏MIMO技术的研究主要集中在感知定位领域以及简单场景下的通信性能分析，关于其在通感融合应用需求下的相关研究工作尚不充分，亟需开展系统的技术探索与验证。为此，本项目深度剖析信道稀疏性与阵列稀疏特征对通感双功能的差异化影响，理论分析并刻画双稀疏特征下的通感融合性能极限，从用户信道与目标参数联合获取、高频双稀疏MIMO波形设计、基于稀疏性互补的多站协同通信感知资源配置联合调度等角度出发，探索并构建逼近性能极限的系统性高频双稀疏MIMO传输与感知融合设计方法。

5．**年度研究计划及预期研究结果**（包括拟组织的重要学术交流活动、国际合作与交流计划等）。

5.1 **年度研究计划**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **执行期** | **研究计划** | **研究成果体现** |
| 2026.1.1  ~  2026.12.31 | 1. 完善对现有研究成果的调研和学习； 2. 分析欠自由度MIMO信道对通信感知双功能的影响并刻画通感性能域； 3. 研究匹配高频稀疏信道的MIMO通感双目标波形设计。 | * 申请专利1~2项； * 研究结果撰写并投稿IEEE Transactions等期刊1~2篇和IEEE国际会议论文1~2篇； |
| 2027.1.1  ~  2027.12.31 | 1. 分析大规模稀疏阵列的阵元稀疏度对空间自由度、波束分辨率的量化关系； 2. 刻画稀疏阵列下通信和感知双目标可达性能域； 3. 研究匹配阵列稀疏性的阵元位置与通感一体传输联合设计。 | * 申请专利2项； * 研究结果撰写并投稿IEEE Transactions等期刊2~3篇和IEEE国际会议论文2篇； * 参加国际学术会议1~2次； * 邀请国内外相关领域专家学术讲座1 次。 |
| 2028.1.1  ~  2028.12.31 | 1. 研究面向高频双稀疏MIMO的用户信道与目标参数联合获取方法； 2. 研究面向高频双稀疏MIMO的通信与感知一体化波形设计方法； 3. 研究高频双稀疏场景下的通感融合信道获取与传输两阶段联合设计方法。 | * 申请专利2项； * 研究结果撰写并投稿IEEE Transactions等期刊2~3篇和IEEE国际会议论文2篇； * 参加国际学术会议1~2次； * 邀请国内外相关领域专家学术讲座1次。 |
| 2029.1.1  ~  2029.12.31 | 1. 研究基于双稀疏性互补的多站协作通感设计与联合资源配置方法； 2. 综合上述研究点，形成信道与阵列双稀疏下高频通感融合理论与方法； 3. 搭建系统级仿真平台，对关键算法进行验证。 | * 完成演示平台搭建； * 申请专利2项； * 研究结果撰写并投稿IEEE Transactions等期刊2~3篇和IEEE国际会议论文2篇； * 参加国际学术会议1次。 |

**5.2 预期研究成果**

本项目为基础理论与技术应用研究，项目成果形式主要为学术论文成果和实物演示和验证平台等，按上述计划说明，预期研究成果包括：

1. 在国内外核心期刊和会议上发表学术论文12篇（SCI/EI检索），其中在IEEE Transactions/Journal/Letters、中国科学等国内外知名期刊上发表高水平学术论文不少于8篇；
2. 搭建毫米波频段大规模稀疏MIMO阵列的通感融合演示系统，实现典型应用场景驱动的通感协同，提升资源利用率以及系统整体性能；
3. 相关研究成果申请国家发明专利6项；
4. 积极开展国际交流，组织课题组成员参加国内外知名学术会议，邀请领域内国际知名专家访问交流；
5. 培养博士研究生和硕士研究生6名及以上；
6. 研究成果整理形成完整的项目报告。

**（二）研究基础与工作条件**

1．**研究基础**（与本项目相关的研究工作积累和已取得的研究工作成绩）；

项目申报人从属于东南大学信息学院以及移动通信国家重点实验室，在移动通信领域具有长期坚实的研究基础和科研能力。申报人及其团队长期以来一直专注于MIMO通信、通信感知一体化等相关方向的研究。近年来，团队在MIMO通信以及通感算一体化算法优化设计方面取得了丰富的成果。申请人**牵头完成了国家自然科学基金优青/专项/面上项目、国家重点研发计划“6G总体技术研究”项目、江苏省杰出青年基金项目等，研究成果得到学术界和业界的广泛关注与积极评价。相关成果曾获得江苏省科学技术奖一等奖、中国通信学会青年科技奖、中国电子学会自然科学二等奖等，论文获得IEEE通信学会海因里希-赫兹奖，以及IEEE Globecom、IEEE/CIC ICCC、IEEE ICUWB、WCSP等国际知名会议最佳论文奖。**

项目申报人团队研究成果发表在IEEE JSAC/JSTSP/TWC/TCOMM等国际顶级期刊上的论文150余篇，技术成果获美国发明专利授权5项以及中国国家发明专利授权40余项，核心研究成果被国内外同行积极评价，共计被引用15000余次（谷歌学术），10篇论文成果入选ESI高被引和ESI热点论文，其中关于高频模数混合预编码架构的代表性论文引用单篇最高810次（谷歌学术），单篇论文WoS他引最高462次；一篇代表性论文发表在无线通信领域国际期刊IEEE Wireless Communications Letters上，其被引次数在创刊以来发表的所有论文中排第四位（4/3722）。关于宽带通信下模数混合信号波形设计的工作，由申报人牵头在中国通信标准化协会（CCSA）获批技术立项（批准号：通标发[2023]207号），参与单位包括中国信息通信研究院、中国移动、中国联通、中兴通讯、高通（中国）、罗德与施瓦茨（中国）等国内优势单位共17家。

项目申报人牵头负责了国家重点研发计划“6G总体技术研究”项目，作为主要参与者之一完成搭建了具备分级智能控制能力的6G综合试验平台。该平台实现了对5G/B5G网络数据的自动采集、智能分析与性能追踪功能，经由6G总体项目承担单位“紫金山实验室”的学术委员会专家组验收评估，一致认为该平台能力“技术水平国际领先”。

项目申报人承担完成了多项华为、中国移动等企业院所委托的横向科研项目共。**申报人团队与中国移动设计院合作，通过引入人工智能方法，辅助无线通信网络资源优化配置，无线网络业务的智能优化技术。**在现网实测数据下，对网络业务流量、上下行物理资源（PRB）利用率等核心指标进行预测，相对误差比现有方法降低2~3倍，栅格级数据的基站定位精度由70%提升至97.84%。研究成果与中国移动合作推进示范应用。申请人牵头负责的研究项目获“华为无线通信联合实验室优秀项目奖”。在与本项目研究课题密切相关的华为合作项目“大规模上行干扰的估计&抑制——少量样本下的复杂特征提取”中，提出一套基于先验信息的抗干扰半盲估计方法，被授予华为公司“火花奖”。

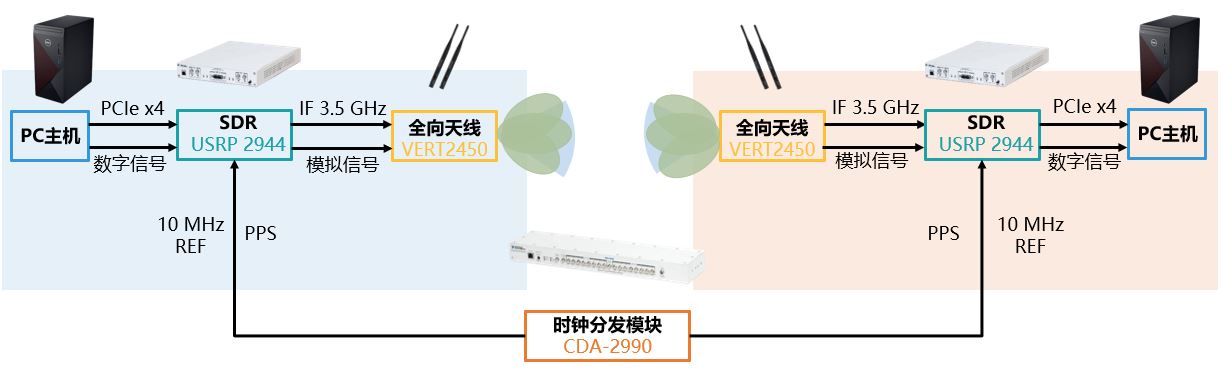
针对本项目研究内容所涉及的高频MIMO通信感知融合技术领域，部分代表性研究基础和研究成果积累如下。

* 针对低开销、低功耗的无源智能反射表面辅助的高频通信系统，团队分析刻画了基站、智能反射面的硬件非理想性对系统传输性能的影响，并研究了相应的功率设计算法，以提升能量效率。相关研究成果发表在IEEE Wireless Communications Letter，论文题目：Spectral and energy efficiency of IRS-assisted MISO communication with hardware impairments，**获2023年度IEEE通信协会海因里希-赫兹奖项（Best Communications Letter）。**
* 针对移动互联场景下的通感融合理论，团队重点研究了分布式通信和感知中的信号处理理论方法。相关的研究成果已被信号处理领域国际顶级期刊IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing录用，论文题目为：Edge Learning for B5G Networks with Distributed Signal Processing: Semantic Communication, Edge Computing, and Wireless Sensing。该成果发表后迅速得到学术界的广泛关注，**自发表两年以来已被引用424次，入选ESI高被引论文，长期位列该刊最热点论文前三。**
* 针对通感融合应用中存在的同频收发自干扰问题，团队通过合理的建模分析，设计有效的波束赋形及功率联合优化设计算法，实现通感系统频谱效率的更高效利用。相关研究成果发表在IEEE Journal on Selected Areas in Communications，论文题目：Full-Duplex Communication for ISAC: Joint Beamforming and Power Optimization。该成果发表后迅速得到学术界的广泛关注，**自发表一年以来已被引用129次，长期位列该刊最热点论文前五。**

除了上述理论研究工作之外，项目申请人团队已经完成了系统级实验平台的搭建，并进行了一些初步测试：

* 申请人团队自主搭建了Sub-6G通信感知一体化的实验平台系统，如下图所示，系统载波频率为3.5 GHz，带宽可达100 MHz，支持 BPSK、QPSK、16QAM 和64QAM 调制。该系统考虑到杂波和噪声同时存在的感知场景，通过接收信号对杂波协方差矩阵与目标响应信道进行最大似然估计，实现了高准确度目标检测的感知功能。与此同时，该系统还实现了高速实时可靠的通信互联，支持高清视频传输，在频谱资源、硬件资源以及波形设计层面均达成了通信和感知一体化目标。





1. 超宽带通信感知一体化系统测试图

2．**工作条件**（包括已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决的途径，包括利用国家实验室、全国重点实验室和部门重点实验室等研究基地的计划与落实情况）；

本项目申请的主要依托为东南大学移动通信全国重点实验室以及东南大学与南京市共建的国家级平台紫金山实验室。

**东南大学移动通信全国重点实验室**（前身为移动通信国家重点实验室）是1990年经国家教委和国家计委批准，在东南大学建立国内高校中唯一专门从事移动通信研究的全国重点实验室。实验室是国内外较早开展面向4G、5G等无线移动通信网络关键技术的研究团队之一。实验室曾牵头承担多项863计划重大项目、国家自然科学基金重大项目等，在若干关键理论和技术方面取得突破，获得了一系列核心技术专利授权。在长期的科研与教学过程中，实验室建立有完备的无线通信系统仿真和硬件测试平台，如图35所示。



1. 移动通信全国重点实验室大规模MIMO与边缘计算演示平台

**东南大学与江苏省政府共建紫金山实验室**为国家级平台，也为本项目提供支撑。紫金山实验室是以解决网络通信与安全领域国家重大战略需求、行业重大科技问题、产业重大瓶颈问题为使命的重大科技创新平台，2020年10月进入国家战略科技力量序列。实验室以尤肖虎院士团队、刘韵洁院士团队、邬江兴院士团队为基础，目前已汇聚了1000多人的研发队伍，并获批国家级博士后工作站。紫金山实验室成立以来，围绕助力网络强国战略和数字中国战略开展关键核心技术攻关，取得了一系突破性成果，包括构建了首个6G技术综合试验平台，如图36所示。实验室研究成果得到了中央、部委和省市各级领导的高度关注，以及业界的广泛认可。正运用在东数西算、航空航天、电信、金融等国家重点关注的产业领域，为网络强国建设提供技术支撑。



1. 紫金山实验室6G综合演示平台

3．**正在承担的与本项目相关的科研项目情况**（申请人和主要参与者正在承担的与本项目相关的科研项目情况，包括国家自然科学基金的项目和国家其他科技计划项目，要注明项目的资助机构、项目类别、批准号、项目名称、获资助金额、起止年月、与本项目的关系及负责的内容等）；

无

4．**完成国家自然科学基金项目情况**（对申请人负责的前一个已资助期满的科学基金项目（项目名称及批准号）完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系加以详细说明。另附该项目的研究工作总结摘要（限500字）和相关成果详细目录）。

**项目名称：**MIMO协作通信

**批 准 号：**62022026

**经费来源：**国家自然科学基金委优秀青年科学基金项目

**起止年月：**2021.01 – 2023.12

**完成情况与后续进展：**已完成项目既定目标，于2023年12月按时完成结题。项目聚焦资源受限的MIMO协作通信理论与技术研究，针对移动通信网络面临的带宽、器件成本和功耗等资源受限难题，提出采用有限射频链路驱动的数模混合波束赋形新方法，实现了高性能大规模MIMO协作通信，成果应用于中兴通讯系统研究部，混合波束赋形被推进5G国际标准化，成果得到香农奖得主和MIMO发明人等著名学者积极评价。项目后续进展包括大规模协作通信中智能化网络信道信息压缩与共享方法、基于深度学习方法的MIMO 接收机优化设计、基于联邦学习的网络频谱及计算资源协作调配方法、基于数据和模型双驱动的开集识别射频指纹学习与提取四个方面。成果进一步支撑了该技术在高频协作通信网络等典型场景中的应用。

**与本项目的关系：**已完成项目面向大规模阵列、海量终端接入下的协作通信场景，研究相应的5G空口MIMO技术。本申请项目也是面向移动物联网的万物互联场景，以面向高频信道的大规模MIMO技术为基础，探索未来多终端互联互通场景下传输与感知融合理论与方法。项目研究场景关系密切，都关注无线网络频谱资源紧缺、大规模MIMO协作、面临复杂干扰等特征，围绕具体传输技术展开研究。因此，已完成项目的部分成果可以对本次申请项目提供借鉴和指导意义，保障项目技术路线的可行性和项目研究内容的先进性。另外，本次申请项目特别聚焦于高频信道稀疏性和大规模阵列稀疏性带来的新挑战，探索双稀疏特征下的MIMO通感融合理论与方法，所需解决的关键科学问题和难点与已完成项目也有显著区别。

**已完成项目的研究工作总结摘要（限500字）：**项目从5G及其演进网络面临的频谱资源紧缺、高维信号处理复杂、宽带多媒体终端需求多样化、多维资源受限等挑战出发，分别针对MIMO协作通信系统中的信道信息压缩与共享技术、收发机设计优化、计算资源协作调配理论和射频指纹系统仿真平台四大内容进行了研究。具体而言，面向大规模MIMO通信系统，针对巨量网络信道信息共享需求下反馈链路频谱带宽受限问题，提出了一种数据驱动和模型驱动结合的信道信息压缩方法以及一种融合双传播特征的信道信息压缩反馈方法。其次，针对大规模MIMO接收机设计，提出了一种基于元学习的低复杂度智能MIMO检测方法。此外，针对分布式网络系统，研究了频繁的联邦学习参数传输误差和非完整联邦学习模型聚合问题，提出一种全局模型复用的创新策略，显著提高网络聚合性能。最后面向射频指纹在物理层身份安全认证中的应用，针对传统射频指纹提取中设备身份信息丢失的问题，提出了一种基于数据和模型双驱动的开集识别射频指纹的深度学习框架，并实现了基于开集射频指纹系统的仿真平台的搭建和开源。相关成果发表高水平学术论文数十篇，提交国内专利申请十余项，获得多项专利授权。项目开展过程中，培养硕士、博士研究生共14名。

**已完成项目的相关成果详细目录：**已按要求上传至附件，请参见附件。

**（三）其他需要说明的情况**

1. 申请人同年申请不同类型的国家自然科学基金项目情况（列明同年申请的其他项目的项目类型、项目名称信息，并说明与本项目之间的区别与联系；已收到自然科学基金委不予受理或不予资助决定的，无需列出）。

2. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在同年申请或者参与申请国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，申请或参与申请的其他项目的项目类型、项目名称、单位名称、上述人员在该项目中是申请人还是参与者，并说明单位不一致原因。

1. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在与正在承担的国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，正在承担项目的批准号、项目类型、项目名称、单位名称、起止年月，并说明单位不一致原因。
2. 同年以不同专业技术职务（职称）申请或参与申请科学基金项目的情况（应详细说明原因）。
3. 其他。