**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“扬帆”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，随着上述新兴无线通信应用场景的快速普及和广泛应用，移动通信与无线感知、人工智能、大数据等技术深度融合，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。5G正逐步向“万物感知、万物智联”的6G演进。在国内外近年来对5.5G/6G的讨论与展望中，均指出感知功能的融入将是无线通信的重要发展趋势之一[1]-[3]。其中，2023年6月，国际电信联盟在瑞士日内瓦举行的会议上，首次正式确立了6G的六大典型应用场景[4]，**通信感知融合（Integrated Sensing and Communication, ISAC）被正式确立为下一代无线网络的典型应用场景与核心使能技术之一。**

通信感知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，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已知信号，设计目标为在接收端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，**高频多输入多输出（Multiple-Input Multiple-Output, MIMO）信道的稀疏特性对通信和感知呈现出差异化影响，迫切需要探索针对信道稀疏特性的高频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应用优势，并开展适配稀疏阵列的通感融合方法研究**。

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，下一代无线网络在提供高质量的通信服务之外，还需兼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。下面将首先介绍通信与感知同频共存与同平台融合的国内外研究现状，随后对高频大规模MIMO下的通感融合研究进行概述。

**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[5]。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[6]。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：**通信感知同频共存是关于一体化融合的最初级尝试。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[7]。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[8]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[9]、采用时频码域正交资源分配[10]，以及干扰迫零抑制[11]。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[12]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信干噪比（Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, 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[13]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：**在通信感知同频共存方案中，通常需要通过中心节点集中调控或者信息交换的方式，实现雷达系统和通信系统之间的协同，带来了额外的交互开销和实现复杂度[14]。这一问题可以通过将雷达与通信系统集成到同一平台上构建真正的双功能一体化架构来避免。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[15]指出高斯信道中通信互信息量关于信噪比（Signal-to-Noise Ratio, SNR）的导数等于接收端信号检测的最小均方误差（Mean Square Error, MSE），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MSE增加[16]。在通信感知共存系统中，文献[17]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[18][19]。此外，文献[20]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[21]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[22]，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SINR[23]、多用户干扰[24]和能量效率[25]等；而感知相关的性能指标涉及波束方向图匹配误差[26]、估计克拉美罗界（Cramér-Rao Bound, CRB）[27]以及信簇噪比（Signal-to-Clutter-plus-Noise Ratio， SCNR）[28]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[29]；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[30]。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[31]。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[32]。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[31]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[33]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[6]。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[34]、波形优化[35]以及信道参数估计[36]等关键领域。例如，文献[34]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[36]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算法设计。**

**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[37]。此外，文献[38]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[39]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[40]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[41]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[42]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[43]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[44]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[45]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[46]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[47]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。文献[48]考虑了一种环境依赖型感知接收阵列，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。为了缓解稀疏阵列感知角度模糊问题，文献[49]基于角度模糊函数分析对稀疏MIMO雷达阵列进行了设计，在阵列孔径大小和阵元间距的约束下直接优化旁瓣电平和主瓣宽度，有效提高了阵列的角度估计性能。

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[50]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[51]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[52]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，稀疏阵列的研究主要聚焦于单一通信或感知场景的基本性能分析与信号处理，相关研究仍不完善。在通信感知融合场景下，其应用潜力更是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得到充分研究，仍有许多基础性问题亟待解决。**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。尤其值得强调的是，信道与阵列的稀疏特性对通信感知呈现差异化影响。具体而言，高频信道的稀疏特性会减少多径干扰，提升感知分辨率与精度。然而，信道稀疏却会减少空间复用增益，影响通信传输可靠性。另一方面，稀疏阵列的大孔径特征能够增加空间自由度、提升波束分辨率，同时利好通信与感知。然而，阵元间距扩大会在空间波束中引入较强的旁瓣干扰，同时影响通信与感知的性能。如何分析把握上述差异化影响是研究高频通感融合技术的关键科学问题。

表1 通信与感知信号与系统对比

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | | 通信 | 感知 |
| 系统架构需求 | 频段 | 中高低全频段[1-4] | 中高频段为主[5][7] |
| 带宽 | 宽带通信提高速率[6][31] | 宽带感知提高精度[5][7][31] |
| 波形 | 随机调制符号[6][7][20][32] | 简单确定波形[5][7][20] |
| 硬件架构 | 模拟-数字混合架构[6][32] | 相控-MIMO混合架构[12][13] |
| 稀疏特征影响 | 信道稀疏 | 降低空间复用增益[28] | 提升感知精度[33][36] |
| 阵列稀疏 | 大天线孔径增加空间自由度，提升波束分辨率[37][40][42] | |
| 加剧用户间干扰[52] | 模糊感知角度[49] |

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. W. Saad, M. Bennis and M. Chen, “A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems,” *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, May 2020.
2. 尤肖虎，王承祥，黄杰等, “6G 研究白皮书”, 东南大学&华为，2020.
3. S. Chen, Y.-C. Liang, S. Sun, S. Kang, W. Cheng, and M. Peng, “Vision, requirements, and technology trend of 6G: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed.” *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 2, pp. 218-228, Apr. 2020.
4. ITU-R, DRAFT NEW RECOMMENDATION, “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond,” Jun. 2023.
5. 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.
6. J. Du, **W. Xu**, C. Zhao, and L. Vandendorpe, “Weighted spectral efficiency optimization for hybrid beamforming in multiuser massive MIMO-OFDM systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 10, pp. 9698–9712, Oct. 2019.
7. F. Liu, L. Zhang, Y. Cui, C. Masouros, A. P. Petropulu, H. Griffiths, Y. C. Eldar, “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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. S. Lu, F. Liu, and L. Hanzo, “The degrees-of-freedom in monostatic ISAC channels: NLoS exploitation vs. reduction,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 2, pp. 2643–2648, Feb. 2023.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. Z. Gao, Z. Wan, D. Zheng, S. Tan, C. Masouros, D. W. K. Ng, S. Chen, “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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. 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.
44. 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.
45. 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.
46. Ahmed and Y. D. Zhang, “Generalized non-redundant sparse array designs”, *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 69, pp. 4580-4594, Aug. 2021.
47. 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.
48. 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.
49. M. Huan, J. Liang, Y. Wu, Y. Li and W. Liu, “SASA: Super-resolution and ambiguity-free sparse array geometry optimization with aperture size constraints for MIMO radar”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 71, no. 6, pp. 4941-4954, Jun. 2023.
50. 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.
51. M. Lou, J. Jin, H. Wang, D. Wu, L. Xia, Q. Wang, Y. Yuan, J. Wang, “Performance analysis of sparse array based massive MIMO via joint convex optimization”, *China Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 88-100, Mar. 2022.
52. 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）**；**

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）；

4．**本项目的特色与创新之处；**

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）。

**（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）；

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）；

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）；

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）。

**（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。

无

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。

无

1. 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）。

无

1. 其他。

无