**国内外研究现状**

在传统的无线网络中，通信和感知是相互独立的系统，它们具有不同的设计目标和性能指标。感知系统旨在从观测信号中检测识别感知目标或提取感知目标的参数，其性能指标包括检测概率、虚警概率、均方估计误差和估计克拉美罗界（Cramer-Rao Bound, CRB）等。通信系统用于在收发端传递信息，其性能指标包括误码率、通信速率和频谱效率等。通信感知一体化技术的最终目标就是在无线网络中融合通信和感知的功能，并实现它们之间的直接权衡以及相互的性能提升\cite{LiuCui2022}。一个重要的问题是揭示通信和感知系统的本质内在联系，描述和刻画通信和感知一体化系统的性能折衷。文献\cite{Guo2005}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，建立了信息论和估计理论之间的桥梁，指出设计高斯发送信号使得通信互信息量最大的同时，也会使信号检测的均方估计误差达到了最大，即通信和感知之间存在天然的性能折衷。文献\cite{Sutivong2005}研究状态相关信道中同时发送信道状态信息和数据信息的系统场景，刻画了通信速率和均方估计误差的Pareto最优性能边界，指出该系统存在通信速率和状态估计均方误差的性能折衷，提高通信速率的同时也会增加信道状态估计的均方误差。文献\cite{Chiriyath2016}使用通信速率表征通信性能，引入雷达估计速率表征感知性能，分别推导了雷达通信共存系统在孤立子带、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Pareto性能边界。文献\cite{Xion2023}使用CRB-通信速率区域刻画通信和感知的Pareto性能边界，当发送信号协方差矩阵位于感知子空间且酉确定时可以达到感知最优，反之则可以达到通信最优，即通信和感知性能之间存在子空间折衷和确定-随机折衷，不过当感知时间周期足够大时，确定-随机折衷可以忽略。文献\cite{XieWang}将通信的指标设置为信干噪比，将感知的指标设置为信簇噪比，研究基站和目标监控终端组成的感知移动网络中通信和感知的Pareto最优性能边界。

根据不同的设计准则，在通信感知一体化系统中进行波形和传输设计，以逼近通信或感知的最优性能一直是学术界的研究热点。现有的通信感知一体化波形和传输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，利用导频，数据帧头等实现感知功能，而现有通信系统的主要信号形式和协议保持不变。文献\cite{Kumari2021}研究基于通信数据包帧头的感知功能，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。在第二类以感知为中心的设计中，数据信息被嵌入到雷达信号中以实现雷达系统的数据通信功能。一个典型的方案是索引调制\cite{Hassanien2019}{Ma2020}，该方案在空、时、频和码等一个或多个域，将数据信息嵌入到雷达信号参数的排列组合中，实现雷达波形的数据通信功能。第三类通信感知一体联合设计则不受现有的雷达和通信系统的制约，重新考虑信号波形和系统网络架构，直接面向通信和感知需求进行波形和传输设计。文献\cite{LiuLiu2022}分别在点目标和扩展目标场景下设计ISAC波形，在满足通信信干噪比约束下，最小化参数估计的CRB。文献\cite{Wei2023}考虑基于MIMO-OFDM的通信感知一体化系统场景，优化发送信号功率分配以最大化通信和感知的加权互信息量和。课题组初步研究了面向通感一体的高能效发射方案设计，并提出了一种高效的波束赋形优化设计算法，在满足感知需求的前提下显著提升系统能量效率\cite{He2022}；在文献\cite{He2023}中，课题组探索了基于全双工通信的通感一体化系统。通过合理设计全双工基站的收发波束赋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。

**参考文献**

[1] F. Liu et al., “Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 6, pp. 1728–1767, Jun. 2022.

[2] 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.

[3] A. 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.

[4] A. 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.

[5] 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.

[6] L. Xie, P. Wang, S. H. Song, and K. B. Letaief, “Perceptive mobile network with distributed target monitoring terminals: Leaking communication energy for sensing,” *IEEE Trans. Wireless Commun*., vol. 21, no. 12, pp. 10193–10207, Dec. 2022.

[7] 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.

[8] A. Hassanien, M. G. Amin, E. Aboutanios, and B. Himed, “Dual-function radar communication systems: A solution to the spectrum congestion problem,” *IEEE Signal Process. Mag*., vol. 36, no. 5, pp. 115–126, Sep. 2019.

[9] 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.

[10] 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, Dec. 2022.

[11] Z. Wei et al., “Waveform design for MIMO-OFDM integrated sensing and communication system: An information theoretical approach,” *IEEE Trans. Commun*., early access, Sep. 19, 2023, doi: 10.1109/TCOMM.2023.3317258.

[12] 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.

[13] 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.

**研究内容**

**稀疏MIMO信道下通感性能域分析及波形设计**

通信感知融合系统的性能域分析不仅是该领域理论研究的重要组成部分，也是指导通信感知一体化技术发展的关键基础。通过构建完善的理论分析框架，可以深入理解通信与感知在不同系统参数下的性能权衡关系，为优化系统架构和提升整体性能提供理论依据。与此同时，波形设计作为通信感知融合系统的核心工程问题，直接决定了系统的性能表现。合理的波形设计需要在通信和感知需求之间进行权衡和折衷，兼顾通信容量、雷达感知精度、抗干扰能力以及计算复杂度等因素。因此，性能域分析与波形设计相辅相成，共同推动通信感知一体化技术的深入研究与实际应用。为此，本研究聚焦高频环境下的通信感知融合需求，针对稀疏MIMO信道场景，开展通信感知融合系统的可达性能域分析与波形设计研究。具体而言，本研究首先从理论层面刻画高频传输条件下的通信感知双目标性能域，分析信道自由度下降对通信感知的综合影响，揭示通信与感知之间的内在权衡关系，为后续系统设计提供了理论指导；然后，针对高频信道的稀疏欠自由度特性，进一步研究基于混合传输架构的通信感知双目标MIMO波形设计方法。

1. **信道欠自由度下的通感双目标可达性能域分析**

通信感知一体化架构可以使通信和感知子系统共享硬件、功率和频谱等资源，实现系统资源的有效利用。但是，资源的共享也会导致通信和感知子系统出现相互耦合，相互制约的问题。一个关键问题是刻画通信感知融合系统的可达性能域，分析通信与感知之间的内在权衡与折衷关系。值得指出的是，高频信号传输为分析通信感知融合系统的可达性能域带来了新的挑战。与低频段传输场景具有丰富的传播路径不同，高频传输场景中的路径损耗非常严重，甚至可以近似认为收发天线之间只存在一条直射路径。因此，信道矩阵表现为一个欠自由度的秩亏矩阵。对于雷达感知而言，这种高频传输特性是一种利好。雷达感知系统依赖信号的反射来探测目标，而高频信号在直射路径上的强指向性和较小的波束宽度，使得雷达能够更精确地定位和追踪目标，减少了多径效应带来的干扰，提高了感知的准确性和分辨率。然而，对于无线通信系统来说，高频信道的稀疏特性却是一种挑战。无线通信依赖于多径传播来实现信号的覆盖和增强，而非直射路径的严重损耗意味着信号的多样性和丰富性下降，这使得通信系统面临信号衰减、覆盖范围缩小以及数据传输速率下降等问题。

因此，在高频稀疏信道场景中，我们面临着一种权衡：一方面，雷达感知系统能够从高频信号的高指向性和低干扰中获益；另一方面，无线通信系统则必须克服由高频信道欠自由度特性带来的限制，寻找新的技术手段和策略来保证通信的质量和稳定性。这种权衡要求我们在进行系统设计和优化之前，必须深刻揭示高频信道的自由度欠缺特性对通信和感知的联合影响，以实现两者在高频环境下的和谐共存与性能最优化。为此，本研究点将立足于高频传输场景下的通信感知融合系统，围绕通信感知性能域开展理论分析。拟从以下两个方面开展：首先，根据通信感知融合系统的服务目的，探索通信和感知系统的通用性能指标，针对高频稀疏信道模型的统计特征，分别分析信道自由度下降对通信和感知性能的影响，推导通信和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。然后，在不同的系统设计准则下，构建通信感知融合系统的双目标可达性能域，分析信道自由度下降对通信感知性能的综合影响，揭示通信和感知之间的内在权衡和折衷，推导不同系统设计准则下的最优信道自由度。

1. **匹配高频稀疏信道的通感双目标MIMO波形设计**

高频信道为无线通信和雷达感知系统提供了更宽广的传输带宽，使得数据传输速率和雷达感知精度都得以显著提升。然而，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，从而出现显著的路径损耗。为了克服高频信号受环境影响大的缺点，高频信号传输系统通常使用大规模MIMO天线阵列，通过在发射端配置大规模天线阵列以形成高增益波束，从而有效增强信号能量，提高通信系统抗干扰性能。在这种情况下，MIMO波形设计就成为高频场景下的一种关键无线传输技术。然而，在传统的全数字传输架构下，每根天线均需配备独立的射频链路，这不仅显著增加了系统的硬件成本和能耗，而且在高频段，由于射频器件的设计复杂度较高，进一步限制了全数字架构在大规模MIMO系统中的实际应用。因此，硬件成本和功耗已经成为限制高频通信感知融合系统发展的一个重要挑战。混合传输架构通过在模拟域和数字域协同处理信号，采用有限数量的射频链路驱动大规模天线阵列，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。因此，在高频传输场景下，混合传输架构不仅是一种降低系统成本和功耗的有效手段，而且在一定程度上缓解了高频段射频器件设计复杂度的问题，使得高频通信系统能够在实际应用中获得更好的可扩展性和能效比。

一般而言，混合传输架构中射频链路数量达到数据流数的两倍，即可实现与全数字架构相当的通信性能。其主要挑战在于模拟预编码矩阵的恒模约束，现有文献已提出有效方法较好地解决了这一问题。但是，在通信感知融合系统中，感知功能的引入将为MIMO系统的混合波束成形设计带来新的挑战。具体而言，当感知距离缩短或目标散射体空间分布较大时，目标特性需采用扩展目标模型进行表征。在此场景下，混合波束赋形架构因受限于有限的天线自由度，将导致参数估计费舍尔信息矩阵呈现病态特性。此时，系统自由度数无法满足扩展目标参数估计的可辨识条件，致使费舍尔信息矩阵秩亏缺而不可逆，直接导致传统克拉美罗下界闭式解析表达式的推导失效。该问题本质上源于扩展目标建模带来的高维参数估计需求与混合架构硬件约束之间的固有矛盾，对通信感知一体化系统的波形设计提出了严峻挑战。现有的解决方案主要通过引入额外的约束或增加射频链路数量来克服自由度不足的问题，但这些方法往往会导致性能下降或增加硬件开销。因此，在高频传输场景下，这些方案并不理想，仍需进一步探索更高效的解决方案。为了应对这一挑战，本研究将在贝叶斯准则下，利用待估计参数的先验统计信息，推导通信感知融合系统在高频传输场景下的贝叶斯克拉美罗下界的闭式表达式，并据此构造匹配高频稀疏信道的通感双目标MIMO波形设计问题，最后使用先进优化算法进行最优求解。

**研究路线**

**稀疏MIMO信道下通感性能域分析及波形设计**

通信感知融合系统的性能域分析是指导通信感知一体化技术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。