**研究现状**

在传统的无线网络中，通信与感知通常作为相互独立的系统运行，各自遵循不同的设计原则，并服务于不同的应用需求。感知系统主要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，以实现目标的检测、参数估计和定位[1][2]。相比之下，通信系统的核心目标是确保收发端之间的信息高效、可靠传输，其设计通常侧重于优化信道容量、提升频谱利用率和降低误码率[3][4]，以满足不同应用场景的通信需求。在传统无线网络架构中，通信与感知作为相互独立的系统运行，分别依赖不同的频谱资源、硬件设施和信号处理算法。然而，通信系统与雷达系统在频谱上存在重叠，这促使研究人员探索二者在相同频段内的共存策略，以提高频谱资源的利用效率[5]。在共享频谱环境下，雷达信号与通信信号之间可能会产生严重干扰，进而影响通信速率和雷达感知精度。因此，雷达感知共存系统的研究重点主要围绕干扰抑制与共存优化展开，常见策略包括增加雷达系统与通信系统之间的物理隔离距离[6]、采用时频码域正交资源分配策略[7]，以及利用多天线空域自由度进行干扰迫零抑制等[8]，以实现高效的频谱共享和系统性能优化。随着无线网络需求的持续增长，下一代无线网络不仅需要提供高质量的无线通信，还需具备高精度的环境感知能力。在雷达通信共存系统中，雷达与通信系统需频繁交换辅助信息以实现相互协作[9]，这不仅增加了网络负担，也提高了系统实现的复杂度，使其难以成为最优解决方案。

在此背景下，通信感知融合（Integrated Sensing and Communication, 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，从而提升降低系统的硬件开销，同时提升整体性能，为未来无线网络的发展提供更具可行性的解决方案。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[10]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），从而定量分析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[11]。在雷达通信共存系统中，文献[12]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雷达通信性能边界。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，与传统的雷达通信共存系统相比，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。此外，文献[13]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。

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[14]研究基于通信数据包帧头的感知功能的实现，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波形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[15]，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。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，或利用雷达信号进行信息传输，但由于受限于现有系统架构，其雷达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的雷达和通信系统的制约，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，实现通信与感知功能的深度融合。其中，通信相关的性能指标包括信干噪比（Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio，SINR）[16]、多用户干扰[17]和能量效率[18]等；而感知相关的性能指标涉及波束方向图匹配误差[19]、CRB[20]以及目标检测概率[21]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束赋形优化算法，在满足感知需求的前提下显著提升系统能量效率[22]；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[23]。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。

高频段已成为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升数据通信的传输速率，还能增强雷达感知的分辨率和精度，从而进一步优化无线网络的通信与感知性能[24]。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较弱的挑战。具体而言，由于高频信号波长较短，其在传播过程中容易受到大气吸收、雨衰以及障碍物遮挡的影响，导致显著的路径损耗。为了克服高频信号对环境敏感的缺陷，高频ISAC系统通常采用大规模多输入多输出（Multiple-Input Multiple-Output，MIMO）天线阵列，在发射端形成高指向性、高增益的波束，从而有效增强信号能量，提高系统的抗干扰能力[25]。在高频场景下，相关文献提出了一种用于位置辅助通信的传输帧结构及基于软信息的定位算法，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[24]。此外，在高频车联网场景中，文献[26]提出了一种雷达辅助的预测波束成形算法，并将卡尔曼滤波器应用于车辆目标跟踪，以提升波束跟踪精度。然而，这些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[3]。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[27]、波形优化[28]以及信道估计[29]等关键领域。例如，文献[27]在混合传输架构下，使用正交线性调频信号估计通信信道并搜索潜在目标，同时识别来自雷达目标的通信路径。文献[29]进一步利用高频信道的稀疏特性，将压缩感知技术引入ISAC系统的信号处理中，可以在保障信道估计性能的同时显著降低导频开销。

**参考文献**

1. S. Fortunati, L. Sanguinetti, F. Gini, M. S. Greco, and B. Himed, “Massive MIMO radar for target detection,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 68, pp. 859–871, 2020.
2. 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.
3. 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.
4. Z. He, J. Xu, H. Shen, W. Xu, C. Yuen, and M. D. Renzo, “Joint training and reflection pattern optimization for non-ideal RIS-aided multiuser systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 72, no. 9, pp. 5735–5751, Sep. 2024.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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)*, Dec. 2012, pp. 5010–5014.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. 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.

**研究内容**

**稀疏MIMO信道下通感性能域分析及波形设计**

通信感知性能域分析与双功能波形设计作为核心理论基础和关键工程问题，二者相辅相成，共同促进ISAC系统在理论研究与实际应用方面的深度发展。另一方面，采用毫米波、太赫兹等高频信号已成为未来网络的必然选择，高频段丰富的带宽资源有助于同时提升通信速率和感知精度。然而，高频信号的传输特性相较于低频段存在显著差异，给高频ISAC系统的性能分析与波形设计带来了新的挑战。具体而言，与低频段的丰富多径传播不同，高频信道中的非直射路径由于严重的传播损耗而显著衰减，在某些场景下甚至可以近似认为收发天线之间仅存在一条直射路径。因此，高频信道表现出高度的稀疏性，其信道矩阵呈现秩亏特征，导致信道自由度显著下降。高频信道自由度下降对通信与感知性能均产生了深远影响，但目前仍缺乏系统性的定量分析。此外，现有高频通感双功能波形设计主要关注混合传输架构下的性能提升，但计算复杂度普遍较高，且尚未充分利用高频信道的稀疏特性，亦缺乏与之匹配的专门优化策略。鉴于此，本项目将在高频ISAC系统场景下，重点针对高频信道的稀疏特性，开展通感性能域的定量分析，并探索匹配高频信道稀疏特性的通感双功能波形设计，以推动ISAC系统在高频传输场景下的理论创新与技术突破。具体研究内容包括：

**信道欠自由度下的通感双目标性能域分析：**为了指导未来高频ISAC系统的设计与优化，有必要深入分析高频信道自由度受限对通感双目标性能域的定量影响。在雷达感知方面，高频信号在直射路径上的强指向性能够有效抑制多径干扰，从而提高雷达感知的分辨率和准确性。然而，在无线通信领域，高频信号的稀疏特性对系统性能带来了不利影响，由于非直射路径的严重损耗，信道的空间分集增益和多径丰富度大幅降低，导致通信系统的覆盖范围缩小并限制了系统容量。上述定性分析表明，高频信道的稀疏特性对通信和感知呈现出相反的性能影响。然而，当前针对高频信道自由度受限对通信与感知性能的具体量化分析仍然不足，亟需进一步研究。为此，本项目将首先立足于高频ISAC系统场景，挖掘典型高频稀疏信道的角度域特征，包括信道路径数的概率分布及信道矩阵的二阶统计信息。然后，在充分挖掘高频稀疏信道角度域特征的前提下，基于通信理论和统计理论推导通信容量和感知CRB的闭式表达式，并从理论上定量分析通信容量和感知CRB随信道自由度变化的闭式表达式或紧致性能界。在此基础上，本项目将上述研究思路进一步推广到加权平均、几何平均和最大最小优化准则下的通感双目标性能分析上，分析不同准则下信道自由度变化对通感双目标性能的量化影响，并推导各优化准则下的最优信道自由度。

**匹配高频稀疏信道的通感双功能MIMO波形设计：**受高频信号稀疏传播特性的影响，高频ISAC系统通常配备大规模MIMO天线阵列，并采用混合传输架构，以较低硬件成本和功耗实现高增益、强指向性波束，从而提升系统整体性能。高频通感双功能MIMO波形设计的关键挑战在于混合传输架构下模拟预编码矩阵的恒模约束。尽管现有算法能够实现较优的系统性能，但其计算复杂度普遍较高，限制了实际应用。因此，为了在保障系统性能的同时有效降低计算复杂度，亟需充分挖掘高频信道的稀疏特性，并基于此开展专门的通感双目标波形设计研究。由于高频信道的稀疏特性，通信信道和感知信道在角度域上均以一条直射路径为主导。因此，通信波束需对准用户的直射路径，感知波束则需对准目标的直射路径，这要求高频ISAC系统在通信和感知之间合理折衷波束指向，同时也为低复杂度波形设计提供了新的优化空间。具体而言，本项目将首先针对单用户系统场景，利用高频信道的稀疏特性，基于用户指向波束与目标指向波束的组合构造天然满足恒模约束的模拟域候选波束以降低波形设计的计算复杂度，接着依托先进优化理论推导最优组合结构，并进一步求解最优数字预编码矩阵。在此基础上，本项目将继续拓展至多用户系统场景，基于高频信道的稀疏特性，通过克罗内克分解下的迫零策略在模拟域抑制用户间干扰，同时降低问题求解维度，并进一步求解最优组合结构和数字预编码矩阵。最后，本项目将结合高频信道的时频域稀疏特性，进一步将上述研究思路推广至高频多载波混合传输架构下的波形设计。

**研究路线**

**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。