**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。

传统的单基站通感架构受制于基站数目，存在系统覆盖范围小、感知和通信能力弱的问题。为了解决这一问题，受协作通信和分布式雷达的启发，多基站协作通感吸引了越来越多研究者的关注。一方面，多基站之间的协作可以更好地消除小区间的干扰，提高接收用户的通信速率。另一方面，多基站之间也可以相互协作，从不同的角度感知环境和目标，提高感知的准确度和分辨率。多基站之间的相互协作以及通信和感知之间的相互干扰，使得在多基站协作通感场景中进行波形和传输设计，达到通信和感知的性能折衷，是一个十分具有挑战性的问题。文献\cite{ChengXu}考虑多天线网络通信感知一体化系统场景，给出一种多基站目标检测方法并进行传输设计，该系统可以在保证通信干噪比的前提下，最大化目标检测的概率。文献\cite{ChenQin}研究多基站多天线协作通感系统中的波形和集群联合设计优化问题，每个基站服务一簇用户的同时探测一簇目标，并且在满足回程链路开销限制的约束下，进行波形设计最大化通信和感知的信干噪比。文献\cite{WangFei}将协作通感引入无人机集群中，多个无人机同时作为通信和感知发送接收机，该系统首先使用聚簇算法对用户进行分组，根据分组情况确定每个无人机的位置，然后在保证定位CRB约束的条件下，进行无人机功率分配以最大化网络效用。与以上文献均是考虑窄带场景不同，文献\cite{QinLiu}研究多基站宽带正交频分复用系统中的通信感知一体化，在该系统中，多个基站利用正交频分复用信号子载波之间的正交性，根据多径回波信号的不同时延对多个物体同时进行感知，并且将感知和通信分配到不同的频段中以消除相互之间的干扰。

**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.

[14] G. Cheng and J. Xu, “Coordinated transmit beamforming for multi-antenna network integrated sensing and communication.” [Online], Available: https://arxiv.org/abs/2211.01085.

[15] L. Chen, X. Qin, Y. Chen, and N. Zhao, “Joint waveform and clustering design for coordinated multi-point DFRC systems,” *IEEE Trans. Commun*., vol. 71, no. 3, pp. 1323–1335, Mar. 2023.

[16] X. Wang, Z. Fei, J. A. Zhang, J. Huang, and J. Yuan, “Constrained utility maximization in dual-functional radar-communication multi-UAV networks,” *IEEE Trans. Commun*., vol. 69, no. 4, pp. 2660–2672, Apr. 2021.

[17] Q. Shi, L. Liu, S. Zhang, and S. Cui, “Device-free sensing in OFDM cellular network,” *IEEE J. Sel. Areas Commun*., vol. 40, no. 6, pp. 1838–1853, Jun. 2022.

**研究内容**

**高频信道下的MIMO ISAC性能边界分析**

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。目前，已有的通信感知融合系统性能边界分析方法主要是面向低频场景，基于高频资源受限场景的通信感知融合系统Pareto性能边界分析方法研究仍然处于起步阶段。因此，研究高频资源受限场景下通信感知融合系统的Pareto性能边界就变得尤为重要，可以为本课题后续研究提供理论指导和方向指引。为此，本研究将面向高频段的通信感知融合需求，着眼于通信感知一体化网络架构，进行通信感知融合系统Pareto性能边界分析。具体而言，首先从单基站系统入手，分析需求动态变化的高频资源受限场景下通信感知融合系统的Pareto性能边界；然后，着眼于空口传输设计，进一步分析高频多基站协作资源受限场景下通信感知融合系统的Pareto性能边界。

1. 基础场景下的高频MIMO ISAC Pareto性能边界分析

值得指出的是，高频信号传输为分析通信感知融合系统的Pareto性能边界带来了新的挑战。一方面，与低频段传输场景具有丰富的传播路径不同，高频传输场景的路径损耗非常严重，可以认为收发天线之间只存在一条直射路径，因此，信道矩阵是一个欠自由度的秩亏矩阵。一般而言，信道自由度的欠缺有利于感知的性能，但是不利于通信的性能。然而，分析信道欠自由度对通信和感知性能的影响，并且刻画信道欠自由度场景下通信和感知的性能边界仍然有待进一步地研究。另一方面，高频信号传输系统通常使用大规模MIMO天线阵列，以克服高频信号受环境影响大的缺点。在传统的全数字传输架构中，每根天线都需要搭配一条成本高昂的射频链路，这导致全数字架构难以在天线数量庞大的高频传输场景中应用，因此高频信号传输系统需要使用混合传输架构。在这种情况下，传统低频段下基于全数字传输架构的性能分析方法和分析结论已不再适用于高频场景，本研究点将寻找高频欠自由度场景下基于混合传输架构的通信感知融合系统Pareto性能边界理论分析方法。

在现有的通信感知融合系统Pareto性能边界研究工作中，通常会分别针对通信和感知系统的某个具体的性能指标进行性能边界分析，如CRB、通信速率和MSE等。然而，在实际的系统中，通信和感知系统的需求是动态变化的，这种需求动态变化特性要求通信感知融合系统的性能指标也需要随之动态变化，比如对于感知系统，在进行参数估计时，会选择CRB作为性能指标，而在进行目标检测时，则会选择检测概率作为性能指标。在这种情况下，现有的基于某种固定指标的通信感知融合系统Pareto性能边界分析方法难以适应这种需求动态特性。因此，本研究点将针对系统需求动态变化的场景，分析影响通信和感知系统性能的关键因素，探究具有普适特性的通信和感知性能指标。此外，通信和感知性能指标的普适动态特性要求Pareto性能边界刻画方法需同时具有普适特性，因此，本研究点还将基于通信和感知普适性能指标，寻找具有普适特性的通用通信感知融合系统Pareto性能边界刻画方法。

本研究点立足于高频欠自由度场景下的通信感知融合系统，围绕通信感知Pareto性能边界分析展开理论研究。拟从下面几个方面开展：首先，探究通信感知融合系统在高频欠自由度场景下基于混合传输架构的通用信号模型。其次，针对通信感知一体化系统需求的高动态多变化特点，分析通信和感知一体化系统的典型应用场景和服务目的，分别探索通信和感知系统的普适性能指标并分析二者之间的内在联系。再者，构建通信感知融合系统的性能可达域，并分析该性能可达域的重要性质，为后续刻画Pareto性能边界提供理论基础。最后，利用通信感知融合系统性能可达域的性质，通过求解一系列Fairness-Profile波形优化问题，刻画出通信感知融合系统的Pareto性能边界。

1. 协作场景下的高频MIMO ISAC Pareto性能边界分析

通信感知融合系统的感知性能取决于感知反射信号的强度，在传统单基站系统中，基站和感知目标之间的距离通常较远，感知信号在自由空间传输和反射的过程中会受到严重的衰减，因此单基站同址天线系统的感知性能难以得到保障。此外，在小区间全频率复用场景中，如果不考虑多基站之间的协作，那么不同基站之间产生的相互干扰会严重降低系统的通信性能。对于通信而言，在多基站协作通信感知融合系统中，多基站之间的相互协作可以消除基站之间的干扰，并提高系统通信速率。对于感知而言，在多基站场景下，接收基站可以收到多个发送基站从不同角度发送的感知信号，同时，感知信号接收基站还可以设置在离感知目标较近的位置，反射信号受到的衰减较小，从而提高感知精度和准确率。因此，不管是从感知的角度还是从通信的角度而言，多基站协作系统相较于单基站系统均可以获得的更好的性能。然而，目前多基站协作通信感知融合系统的Pareto性能边界的相关研究仍然处在起步阶段。因此，本研究点将在高频资源受限场景下，研究多基站协作通信感知融合系统的Pareto性能边界。

相比于单基站场景，多基站场景下的通信和感知均更加复杂。从通信的角度出发，如果基站之间不进行协作，不同基站的信号一般被视为干扰，系统的通信性能将会下降，因此需要考虑多基站之间的通信协作，此时会额外引入基站选择和用户分组等问题，在数学上体现为难解的非凸二进制约束或整数约束。从感知的角度出发，不同基站发送的信号均可以被视作有用信号，可以提供不同角度的感知信号，具有空间分集增益，然而，如何在通信的干扰之下有效利用这些空间分集增益也是一个有待解决的问题。因此，在多基站协作通信感知融合系统Pareto性能边界分析中，不仅要考虑通信与感知性能指标之间的相互耦合，同时还要考虑多基站之间的相互协作和干扰。此外，多基站的引入也将进一步地扩大问题规模，加大问题求解的复杂度。此时，单基站系统的Pareto性能边界分析方法和结论难以直接应用到多基站协作通信感知融合系统中。为此，本研究点将在多基站协作资源受限场景下的性能边界分析问题中，使用矩阵理论和先进优化理论，研究如何解耦通信和感知子问题以及多个基站之间的干扰，得到具有良好优化特性的问题结构，并提出低复杂度的求解算法以实现高效的问题求解。

本研究点将在单基站通信感知融合系统Pareto性能边界研究的基础上，立足多基站协作资源受限通信感知融合场景，针对高频信号传输系统，着眼于多基站空口传输设计，刻画多基站通信感知融合系统的Pareto性能边界。本研究点拟从以下几个方面开展：首先，分析多基站协作通信感知融合系统的应用场景，构建高频段基于混合传输架构的通用信号模型。然后，基于多基站协作架构，分析多基站之间的相互干扰和相互协作，分别探究通信和感知系统的普适性能指标。再者，着眼于多基站协作通信感知融合系统的空口传输设计，构建刻画Pareto性能边界的通用优化问题。最后，基于矩阵理论和先进优化理论，寻求优化算法进行问题重构和问题求解。特别地，由于多基站的引入造成的问题规模扩大，拟采用一种基于分支定界法的低复杂度通用优化方法用于刻画多基站通信感知融合系统的Pareto性能边界。

**研究路线**

**高频信道下的MIMO ISAC性能边界分析**

通信感知融合系统的Pareto性能边界理论分析是指导通信感知一体化技术研究的重要理论基础。现有的关于通信感知融合系统的性能边界研究主要针对的是低频段系统，高频段系统的通信感知性能边界研究尚处于起步阶段。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Pareto性能边界研究增加了新的挑战。此外，对于多基站协作通信感知一体化系统，不仅存在通信和感知之间的干扰和耦合，还存在多基站之间的相互协作和干扰，这又进一步地加大了通信感知融合系统性能边界分析的难度。本研究点将首先基于高频欠自由度资源受限系统场景，建立通信感知融合系统的通用信号模型，然后分别分析通信和感知的性能指标，接着构建通信感知融合系统的性能可达域并分析其性质，然后基于通信感知融合系统性能可达域的性质，刻画通信感知Pareto性能边界，最后进一步刻画多基站协作场景下的通信感知融合系统Pareto性能边界。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：

第一步、建立通信感知融合系统的通用信号模型

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拥有丰富的非直射路径不同，高频信号在传播过程中的路径损耗很大，导致高频信道中的直射路径分量要远大于非直射路径分量，因此可以认为，此时基站和用户之间的通信信道退化为：

上式表明，高频场景下，信道的每个元素近似于只包含主路径分量，对于通信而言，该信道可能会处于深度衰落，此时系统的通信性能受衰落的影响很大，而对于感知而言，单条路径却是有益的，因为这会降低目标检测的虚警概率，也可以降低状态估计的均方误差。

根据上述高频信道模型，可以分别建立高频段资源受限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，和分别表示用户数量和雷达专用信号数量，表示发送给第个通信用户的数据符号，用于完成数据通信功能，表示第个雷达专用信号，用于增加发送信号空间自由度，完成目标感知功能。表示模拟波束成形矩阵，该波束成形矩阵由移相器实现，因此其中的每个元素都要求满足恒模约束。表示数字波束成形矩阵中的第个数字波束成形向量。

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关于第个散射体的目标响应矩阵，表示数字波束成形矩阵，表示发送数据（包括用户数据和雷达专用数据），表示待感知目标包含散射体的数量，表示经过第个散射体的反射系数，分别表示经过第个散射体的反射路径的信号到达角和离开角。

第二步：分析通信感知融合系统的性能指标

基于上述通信和感知信号模型，本步骤需要针对不同应用场景，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。特别地，相比于低频全数字传输架构，在高频信号场景下，由于混合传输架构的使用以及信道自由度的下降，信道容量将会出现下降。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、信噪比（SNR）以及CRB等。同样，高频场景也会给感知性能带来影响，这些影响主要体现在只有直射路径带来的MSE和虚警概率降低。现有的通信感知融合系统Pareto性能边界研究通常会分别选择通信和感知系统的一个或几个固定的性能指标进行性能边界分析，但是在实际通信系统中，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，传统的通信感知融合系统Pareto性能边界研究方法固定的性能指标设置无法适应实际系统需求动态变化的特点，因此需要分析影响通信和感知系统性能的决定性因素，寻找具有普适特性的通信和感知性能指标。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，因此可以将第个用户的通信性能指标表示为，其中表示第个用户的SINR，并且是一个单调递增函数。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SNR有关，因此选择感知系统的性能指标为，同样，是关于SNR的单调递增函数。上述通信和感知性能指标均可以根据系统需求进行动态调整，因此具有普适特性，更加适用于需求动态变化的实际系统场景。

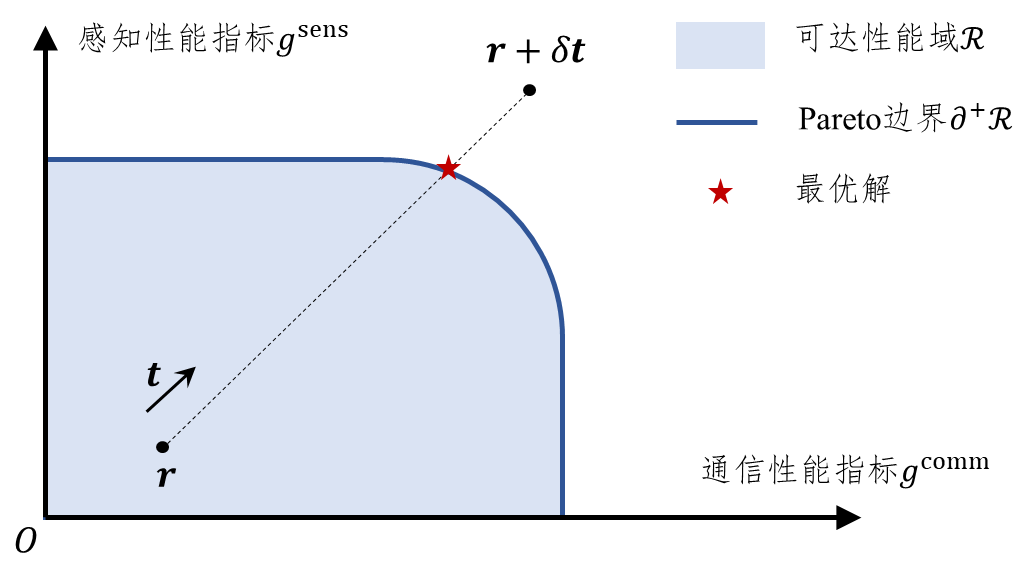
第三步：构建和分析通信感知融合系统性能可达域

因为步骤二中的通信和感知系统的性能指标是普适和动态变化的，而传统的通信感知融合系统的Pareto性能边界分析方法均是针对固定的性能指标，所以难以直接利用，因此本研究点需要基于上述通信和感知的普适性能指标，寻求普适通用的Pareto性能边界刻画方法。为了达成这一目标，本步骤首先尝试从理论角度构建并分析通信感知融合系统的性能可达域，为后续刻画通信感知融合系统的Pareto性能边界提供理论基础。可以将通信感知融合系统的性能可达域表示为：，其中表示基站决策可行集。图\figure{}给出了通信感知融合系统性能可达域的示意图，图中性能可达域的外边界即为通信感知融合系统的Pareto性能边界，对于上的任意一点，不存在另一点，使得。因此，本研究点的目标即是刻画出通信感知融合系统性能可达域的Pareto边界。

集合刻画了通信感知融合系统的性能可达域，它的形状由无线信道和基站端的功率约束共同决定。根据现有的文献可知，集合应具有下列性质：

性质一：是一个紧致且规范的集合；

性质二：对于一个严格递增函数，问题的全局最优解一定位于集合的Pareto边界上。



本研究点将利用通信感知融合系统性能可达域的上述两条重要性质，针对通信和感知系统的普适性能指标，刻画出通信感知融合系统的Pareto性能边界。

第四步：刻画通信感知融合系统Pareto性能边界

基于上述通信感知融合网络性能可达域的形状和两条重要性质，本步骤的目标是给出通信感知融合系统针对普适性能指标的通用Pareto性能边界刻画方法。根据步骤三中的性质二可知，利用一个单调递增函数刻画出通信感知融合系统Pareto边界是可行的，并且更重要的是，这样的刻画方法是普适的，不依赖于通信和感知系统具体的性能指标。那么一个重要的问题便是单调递增函数选取。根据不同的设计准则，会具有不同的函数形式，常见函数形式包括加权和、调和平均、Proportional-Fairness和Max-Min-Profile等。然而，对于大多数单调递增函数来说，问题均是非凸的，难以在多项式时间内获得全局最优解，因此对于该类函数难以加以利用。但是当是Max-Min-Profile函数时，形成的下列优化问题却可以高效地求解：

其中，，该优化问题被称为Fairness-Profile问题。又根据步骤三中的性质二，上述Fairness-Profile优化问题的最优解对应的的最优值一定在Pareto边界上。因此，可以通过求解一系列Fairness-Profile问题刻画出通信感知融合系统的Pareto性能边界。下面简要描述拟采用的求解方法。

首先定义：，根据步骤三中性质一，性能可达域是一个紧致且规范的集合，所以上述Fairness-Profile问题的最优解对应的的最优值一定是线段与通信感知Pareto性能边界的交点，如图\figure{}所示。因此，Fairness-Profile问题可以按照下列步骤迭代求解：

步骤1：固定，求解关于的可行性验证问题；

步骤2：根据可行性验证问题的结果，采用二分法更新。

迭代上述步骤直到收敛，即可得到该Fairness-Profile问题对应的Pareto边界上的一点。理论上，只要遍历所有的，即可刻画出Pareto边界上所有的点。然而，由于恒模约束的存在以及非凸的分式优化，上述求解步骤1关于的可行性验证问题仍然会是一个非凸的问题，难以在多项式时间内获得全局最优解。为了解决该问题，本研究点拟利用交替优化、锥优化和黎曼流形优化的现代优化理论，对上述非凸问题进行松弛，以期获得一个高质量的次优解。

第五步、刻画多基站协作通信感知融合系统Pareto性能边界

进一步推广到多基站协作场景，本步骤给出多基站协作通信感知融合系统的Pareto性能边界刻画方法。本研究点考虑的多基站协作场景仍然采用上述步骤中的高频通信感知信号模型和普适性能指标，通信感知性能可达域也类似于单基站场景，因此上述步骤中的通用通信感知融合系统Pareto性能边界刻画方法仍然适用于多基站场景。但是相比于单基站场景，多基站协作场景需额外考虑多基站之间的相互协作和干扰，因此多基站场景下需要进一步地对上述步骤中的通用Pareto性能边界刻画方法，尤其是预编码矩阵的求解方法进行优化设计。具体而言，相比于单基站，多基站场景需考虑多个基站服务一个用户时的基站选择问题，这会导致数字预编码矩阵需要额外引入非凸的二进制约束。为了解决这一问题，本研究点拟对引入的二进制约束进行实数松弛，并使用连续凸逼近技术将其松弛为一个凸约束。此外，多基站模拟预编码矩阵在满足恒模约束的同时还需满足非凸的块对角约束。针对这一问题，本研究点拟对信号模型进行深入探究，分析其结构，尝试对信号模型进行重构，并利用矩阵理论，找出一种解耦方法松弛非凸的块对角约束。最后，多基站的引入使得问题维度快速扩大，单基站情况下的求解方法难以直接使用。为了解决这一问题，拟将分支-定界-剪支的思路引入多基站场景，通过剪去不必要的问题分支的方法降低问题求解的计算复杂度。