

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}研究状态独立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}使用克拉美罗界-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，最小化参数估计的克拉美罗界。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}考虑多基站单天线系统场景，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，然后在保证定位克拉美罗下界约束的条件下，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

本研究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，瞄准分布式协同网络，进行通信感知性能边界分析，为未来通信感知一体化网络设计提供理论支撑。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段通信感知融合系统的 Pareto 性能边界；然后，着眼于发送接收机的空口传输设计，进一步分析高频段多基站协作场景下通信感知融合系统的 Pareto 性能边界。此研究内容结构如图\figure{}所示。

1. 基础场景下的高频 MIMO ISAC Pareto 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。因此，研究通信和感知融合系统的性能边界就变得尤为重要。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。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在适用于高频场景，需要寻找基于混合传输架构的高频段通感融合系统 Pareto 性能边界理论分析方法。

为此，本研究点立足于高频信道下的通信感知一体化系统，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，针对通信感知一体化网络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，探究通信感知融合系统在高频信道下基于混合传输架构的通用信号模型。其次，根据通信感知一体化系统在高频信道下的服务目的，分别探索通信和感知系统的性能指标并分析二者之间的内在联系。再者，构建通信感知一体化系统的性能可达域，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。特别地，高频信道矩阵的庞大维度会使波形优化问题的求解变得非常困难，因此，提出一种基于分支定界法的低复杂度通用波形设计方法用于刻画通信感知融合系统的 Pareto 性能边界。

2. 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回波信号的强度，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。与单基站通信感知融合系统不同的是，在分布式协作通信感知融合系统中，感知信号接收基站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，并且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。因此，多基站协作系统相较于单基站系统可以获得的更好的感知性能。然而，多基站协作通信感知一体化系统的相关研究仍然处在起步阶段，因此分析高频多基站协作场景下通信感知融合系统的 Pareto 性能边界可以为后续的研究提供理论支撑和方向指引，具有重要的意义。需要指出的是，在多基站协作通信感知融合系统中，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。因此，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。

本研究点立足多基站协作通信感知融合场景，针对高频信号传输系统，着眼于多基站空口传输设计，分析和刻画通信和感知的 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，基于多基站分布式协作架构，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 性能边界的优化问题。最后，基于先进优化理论，寻求优化算法进行问题求解。由于通信和感知性能指标的相互耦合，以及引入多基站造成的问题规模扩大，优化问题通常是一个强耦合的大规模非凸优化问题，因此必须要寻求高效的非凸优化算法求解。

研究路线

1. 基础场景下的 MIMO ISAC Pareto 性能边界分析

本研究点对高频信道场景下通信感知融合系统的 Pareto 性能边界进行理论分析。本研究点首先基于高频信道场景建立通信感知融合系统通用信号模型，其次分别探究该场景下通信和感知系统的性能指标，接着分析通信感知融合系统性能可达域的重要性质，最后设计低复杂度通用波形优化方法刻画通信感知融合系统的 Pareto 性能边界。具体方案如下：

第一步：建立通信感知融合系统通用信号模型

通信感知的融合以及需求的高动态多变化特性使得建立通信感知融合系统的普适高频信号模型具有十分重要的意义，也是首先需要解决的问题。如图  所示，考虑高频下行信道场景，基站配备 N_t 根发送天线和 N_r 根接收天线，向 K 个单天线通信用户和一个具有 M 个散射体的拓展目标发送信号，同时完成通信和感知两种功能，一个系统时间内包含的时隙数设为 N 。注意，当 $M = 1$ 时，扩展目标将退化为点目标。

基站发送数据可以被表示为 $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_K, \dots, \mathbf{s}_{K+S}]^T$ ，其中， \mathbf{s}_k 表示发送给第 k 个通信用户的 N 维数据符号，用于完成数据通信功能， \mathbf{s}_{K+s} 表示第 s 个 N 维的雷达专用信号，用于增加发送信号空间自由度，完成目标感知功能。经过波束成形之后，基站发送信号可以表示为：

$$\mathbf{X} = \mathbf{F}\mathbf{S}$$

其中 \mathbf{F} 表示基站的波束成形矩阵，用于将待发送信号映射到多个发送天线上。当 N 足够大时， \mathbf{X} 满足 $\frac{1}{N} \mathbb{E}\{\mathbf{X}\mathbf{X}^H\} = \mathbf{I}_{N_t}$ ，其中 \mathbf{I}_{N_t} 表示 N_t 维的单位矩阵。在高频信道场景中，庞大的天线数量导致成本高昂的全数字波束成形架构难以应用，因此这里采用混合架构，即 $\mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{RF}}\mathbf{F}_{\text{BB}} = \mathbf{F}_{\text{RF}}[\mathbf{f}_{\text{BB},1}, \dots, \mathbf{f}_{\text{BB},K}, \dots, \mathbf{f}_{\text{BB},K+S}]$ ，其中 \mathbf{F}_{RF} 和 \mathbf{F}_{BB} 分别表示模拟和数字波束成形矩阵， $\mathbf{f}_{\text{BB},k}$ 表示数字波束成形矩阵中的第 k 个数字

波束成形向量。 \mathbf{F}_{RF} 由移相器实现，因此其中的每个元素都要求满足恒模约束。将基站的最大允许平均发送功率记作 P ，假设 \mathbf{S} 中每一列的每个元素均是满足零均值单位方差的高斯随机变量并相互独立，那么发射功率应满足：

$$\|\mathbf{F}_{\text{RF}}\mathbf{F}_{\text{BB}}\|^2 \leq P$$

一方面，发送信号经过自由空间传播后到达接收端，第 k 个通信用户接收到的信号可以表示为：

$$\{\mathbf{y}_k^{\text{comm}}\}^T = \mathbf{h}_k^H \mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{f}_{\text{BB},k} \mathbf{s}_k^T + \sum_{i=1, i \neq k}^{K+S} \mathbf{h}_k^H \mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{f}_{\text{BB},i} \mathbf{s}_i^T + \mathbf{n}_k^T$$

其中 \mathbf{n}_k 表示加性高斯白噪声， \mathbf{h}_k 表示基站到第 k 个用户的信道，假设信道在一个系统周期 N 内保持不变。与低频信道场景一致，对于高频信道场景，也可以采用经典的多径传播模型将 \mathbf{h}_k 表示为：

$$\mathbf{h}_k = \sum_{l=1}^L \alpha_l a_t(\theta_l^t) \quad \text{🗨️}$$

其中 L 表示多径数量， α_l 表示第 l 条路径上的信道增益， θ_l^t 表示第 l 条路径上的信号离开角， $a_t(\cdot)$ 表示发送天线阵列响应函数。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：

$$a_t(\theta_l^t) = \left[1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \theta_l^t}, \dots, e^{j(N_t-1)\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \theta_l^t} \right]^T$$

其中 λ 表示信号波长， d 表示天线间隔，通常设置 $d \geq \lambda/2$ 。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 $L = 1$ ，此时基站和第 k 个用户之间的通信信道退化为：

$$\mathbf{h}_k = \alpha a_t(\theta^t)$$

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：

$$\mathbf{Y}^{\text{sens}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^J \beta_{i,j} b_r(\phi_{i,j}^r) b_t^H(\phi_{i,j}^t) \mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}} \mathbf{S} + \mathbf{Z}$$

其中 J 表示每个散射体的反射路径数， $\beta_{i,j}$ 表示经过第 i 个散射体的第 j 条反射路径的反射系数， $\phi_{i,j}^r, \phi_{i,j}^t$ 分别表示经过第 i 个散射体的第 j 条反射路径的信号到达角和离开角， $b_r(\cdot)$ 和 $b_t(\cdot)$ 分别表示接收天线和发送天线阵列响应函数。当发送天线和接收天线都按均匀线性方式排列时，发送天线和接收天线阵列响应函数可以表示为：

$$b_t(\phi_j^t) = \left[1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \phi_j^t}, \dots, e^{j(N_t-1)\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \phi_j^t} \right]^T$$

$$b_r(\phi_j^r) = \left[1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \phi_j^r}, \dots, e^{j(N_r-1)\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \phi_j^r} \right]^T$$

同样，在高频信道场景下，假设经过每个散射体只存在一条反射路径，并且当扩展目标距离基站比较远时，可以认为反射路径的到达角和离开角是相等的。这样，回波信号表达式可以被简化为：

$$\mathbf{Y}^{\text{sens}} = \sum_{i=1}^M \mathbf{G}_i \mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}} \mathbf{S} + \mathbf{Z}$$

其中 $\mathbf{G}_i = \beta_i b_r(\phi_i) b_t^H(\phi_i)$ 表示发送天线和接收天线关于第 i 个散射体的目标响应矩阵。

第二步：分析通信感知一体化网络的性能指标

基于上述通信和感知信号模型，本步骤给出表征通信和感知功能的性能指标。首先，根据每个用户接收到的通信信号，分析通信功能的性能指标。第 k 个用户接收信号的均方误差可以被表示为：

$$MSE_k^{\text{comm}} = \frac{1}{N} \mathbb{E}\{\|\mathbf{y}_k^{\text{comm}} - \mathbf{s}_k\|^2\}, k \in [1, K]$$

定义通信系统的性能指标为 $g_k^{\text{comm}}(MSE_k^{\text{comm}})$, $k \in [1, K]$ ，并且 $g_k^{\text{comm}}(\cdot)$, $\forall k \in [1, K]$ 是关于 MSE_k^{comm} 的严格单调递减函数。

接着，根据基站接收天线收到的回波信号，考虑感知的性能指标。当 $M = 1$ ，即扩展目标退化为点目标时，可以直接对角度进行估计，将基站估计角度的函数定义为 $f_\phi^{\text{Rx}}(\cdot)$ ：

$$\hat{\phi} = f_\phi^{\text{Rx}}(\mathbf{Y}^{\text{sens}})$$

角度估计的均方误差可以表示为：

$$MSE^{\text{sens}} = \mathbb{E}\{\|\phi - \hat{\phi}\|^2\}$$

当 $M > 1$ ，即考虑扩展目标场景时，由于基站没有关于散射体数量 M 的先验信息，因此无法直接对角度进行估计，转而选择直接估计发送天线和接收天线之间的目标响应矩阵 $\mathbf{G} = \sum_{i=1}^M \mathbf{G}_i$ 。将基站估计目标响应矩阵的函数定义为 $f^{\text{Rx}}(\cdot)$ ：

$$\hat{\mathbf{G}} = f^{\text{Rx}}(\mathbf{Y}^{\text{sens}})$$

此时目标响应矩阵的均方估计误差可以表示为：

$$MSE^{\text{sens}} = \mathbb{E}\{\|\mathbf{G} - \hat{\mathbf{G}}\|^2\}$$

同样的，定义感知系统的性能指标为 $g^{\text{sens}}(MSE^{\text{sens}})$ ，其中 $g^{\text{sens}}(\cdot)$ 是一个严格单

调递减函数。

第三步：通信感知融合系统性能可达域的构建和分析

基于上述通信和感知的性能指标，本步骤从理论角度构建并分析通信感知融合系统的性能可达域。首先，将通信感知融合系统的性能可达域表示为：

$$\mathcal{R} = \bigcup_{\{\mathbf{F}_{\text{RF}}, \mathbf{F}_{\text{BB}}\} \in \mathcal{V}} \{g_1^{\text{comm}}, g_2^{\text{comm}}, \dots, g_K^{\text{comm}}, g^{\text{sens}}\}$$

其中 \mathcal{V} 表示基站决策可行集：

$$\mathcal{V} = \{\mathbf{F}_{\text{RF}}, \mathbf{F}_{\text{BB}} \mid \|\mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}}\|^2 \leq P, |\mathbf{F}_{\text{RF}}| = 1, \forall i, j\}$$

$K+1$ 维度的集合 \mathcal{R} 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。通常来说，集合 \mathcal{R} 具有下列性质：

性质一： \mathcal{R} 是一个紧致（compact）且规范（normal）的集合；

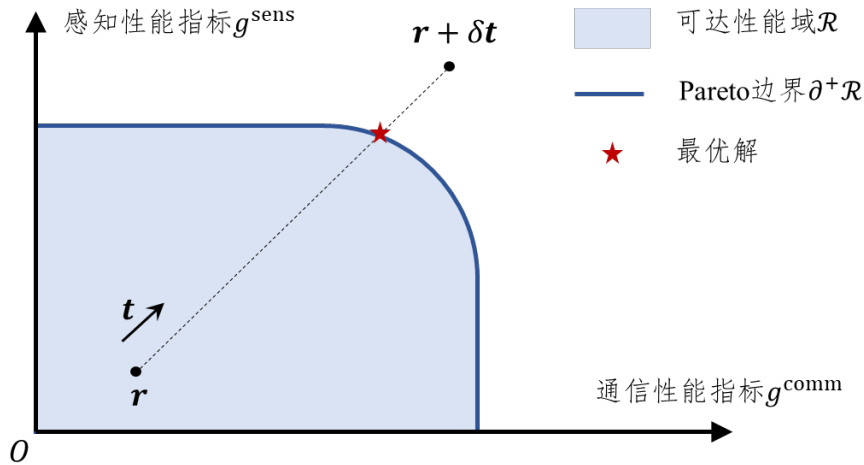
性质二： \mathcal{R} 集合的外边界被称作 Pareto 边界，记作 $\partial^+ \mathcal{R}$ 。对于 $\partial^+ \mathcal{R}$ 上的任意一点 $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{K+1}]^T$ ，不存在另一点 $\Psi' = [\psi'_1, \psi'_2, \dots, \psi'_{K+1}]^T \in \mathcal{R}$ ，使得 $\Psi' > \Psi$ 。

性质三：对于一个严格递增函数 $f(\cdot)$ ，下列问题的全局最优解

$$\underset{\Psi \in \mathcal{R}}{\text{maximize}} \quad f(\Psi)$$

一定位于集合 \mathcal{R} 的 Pareto 边界 $\partial^+ \mathcal{R}$ 上。

图\figure{}给出了通信感知融合系统性能可达域的示意图，性能可达域的外边界 $\partial^+ \mathcal{R}$ 即为通信感知融合系统的 Pareto 性能边界。



第四步：Pareto 性能边界刻画

本步骤给出通信感知融合系统 Pareto 性能边界的通用具体刻画方法。根据不同的设计准则， $f(\cdot)$ 具有不同的函数形式。常见函数形式有加权和、调和平均、Proportional-Fairness 和 Max-Min-Profile 等。对于大多数函数 $f(\cdot)$ 来说，问

题 $\max_{\Psi \in \mathcal{R}} f(\Psi)$ 是非凸的，难以在多项式时间内获得全局最优解。但是当 $f(\cdot)$ 是 Max-Min-Profile 函数时，形成的下列优化问题可以高效地求解：

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{F}_{\text{RF}}, \mathbf{f}_{\text{BB},k}} \min_{1 \leq k \leq K+1} \frac{g_k - a_k}{\alpha_k} \\ & \text{s.t. } g_k \geq a_k, \quad 1 \leq k \leq K+1 \end{aligned}$$

其中 $g_k = g_k^{\text{comm}}, 1 \leq k \leq K$, $g_{K+1} = g^{\text{sens}}$ ，该优化问题被称为 Fairness-Profile 问题。根据步骤三中的性质三，上述 Fairness-Profile 优化问题的最优解对应的 g_k 的最优值一定在 Pareto 边界 $\partial^+ \mathcal{R}$ 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。下面给出具体求解方法。

首先定义：

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= [a_1, a_2, \dots, a_{K+1}]^T \geq 0 \\ \mathbf{t} &= [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{K+1}]^T \geq 0 \end{aligned}$$

因为性能可达域 \mathcal{R} 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 g_k 的最优值一定是线段 $[\mathbf{r}, \mathbf{r} + \mathbf{t}\delta]$ 与 Pareto 性能边界 $\partial^+ \mathcal{R}$ 的交点。因此，Fairness-Profile 问题可以按照下列步骤迭代求解：

步骤 1：固定 δ ，求解关于 $(\mathbf{F}_{\text{RF}}, \mathbf{F}_{\text{BB}})$ 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 δ 。

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 $\partial^+ \mathcal{R}$ 上的一点。理论上，只要遍历所有的 \mathbf{t} ，即可刻画出 $\partial^+ \mathcal{R}$ 上所有的点。然而，由于高频信号传输场景庞大的天线数量，该遍历方案的计算开销是难以接受的。为了解决这一问题，拟引入分支定界的思想，在迭代过程中，不断分支-减支-定界，以减去无用区间达到降低问题规模的目的，最终低复杂度地刻画出 Pareto 性能边界 $\partial^+ \mathcal{R}$ 。

2. 协作场景下的 MIMO ISAC 性能边界分析

本研究点针对高频传输场景，构建多基站协作通信感知融合网络的 Pareto 性能边界，为后续研究提供方向指引。本研究点首先建立高频多基站协作通信感知融合网络的通用信号模型，然后分别探究通信和感知系统的性能指标，接着构建刻画 Pareto 性能边界的优化问题模型，最后求解该优化问题。具体研究路线如下：

第一步：建立高频多基站协作通信感知融合网络的通用信号模型

多基站协作通信感知融合场景中包含多个基站和用户，需要同时完成通信和感知功能，本步骤首先建立该场景下的普适信号模型。

系统模型如图 \figure{} 所示，假设系统中包含 M 个基站，1 个目标监控终端。

每个基站配置 N_t 根发送天线， $2K$ 条射频链路，服务 K 个单天线通信用户，第 m 个基站服务的通信用户集合设为 \mathcal{N}_m 。所有基站协作感知一个包含 I 个散射体的拓展目标，所有反射信号由目标监控终端接收。假设一个系统时间周期内包含 L 个时隙。

第 m 个基站的发送数据设为 $\mathbf{S}_m = [\mathbf{s}_{m,1}, \mathbf{s}_{m,2}, \dots, \mathbf{s}_{m,K}, \mathbf{s}_{m,K+1}, \dots, \mathbf{s}_{m,K+S}]^T$,

其中 $\mathbf{s}_{m,k}$ 表示第 m 个基站发送给 \mathcal{N}_m 中的第 k 个用户的 L 维通信数据， $\mathbf{s}_{m,K+S}$ 表示第 m 个基站的第 s 个 L 维感知专用信号。第 m 个基站的发送数字预编码矩阵设为 $\mathbf{W}_{\text{BB},m} = [\mathbf{w}_{\text{BB},m,1}, \mathbf{w}_{\text{BB},m,2}, \dots, \mathbf{w}_{\text{BB},m,K}, \mathbf{w}_{\text{BB},m,K+1}, \dots, \mathbf{w}_{\text{BB},m,K+S}]$ ，其中 $\mathbf{w}_{\text{BB},m,k}$ 表示第 m 个基站上关于 \mathcal{N}_m 中第 k 个用户数据的数字预编码向量， $\mathbf{w}_{\text{BB},m,K+S}$ 表示第 m 个基站上的第 s 个感知专用数字预编码向量。第 m 个基站上的模拟预编码矩阵设为 $\mathbf{W}_{\text{RF},m}$ ，其中的每个元素都要求满足恒模约束。因此，第 m 个基站的发送信号可以表示为：

$$\mathbf{X}_m = \mathbf{W}_{\text{RF},m} \mathbf{W}_{\text{BB},m} \mathbf{S}_m$$

当 L 足够大时， \mathbf{X}_m 满足 $\frac{1}{L} \mathbb{E}\{\mathbf{X}_m \mathbf{X}_m^H\} = \mathbf{I}_{N_t}$ ，其中 \mathbf{I}_{N_t} 表示 N_t 维的单位矩阵。将基站的发送信号平均总功率限制为 P_t ，假设 \mathbf{S}_m 每一列的每个元素都是相互独立的零均值单位方差高斯随机变量，那么有：

$$\|\mathbf{W}_{\text{RF},m} \mathbf{W}_{\text{BB},m}\|^2 \leq P_t, \forall m$$

首先考虑通信信号模型。 \mathcal{N}_m 集合中的第 k 个用户接收到的信号可以表示为：

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{m,k}^T &= \mathbf{h}_{m,k,m}^H \mathbf{W}_{\text{RF},m} \mathbf{w}_{\text{BB},m,k} \mathbf{s}_{m,k}^T + \sum_{i=1, i \neq k}^{K+S} \mathbf{h}_{m,k,m}^H \mathbf{W}_{\text{RF},m} \mathbf{w}_{\text{BB},m,i} \mathbf{s}_{m,i}^T \\ &\quad + \sum_{j=1, j \neq m}^M \mathbf{h}_{m,k,j}^H \mathbf{W}_{\text{RF},j} \mathbf{W}_{\text{BB},j} \mathbf{S}_j + \mathbf{n}_{m,k}^T, k \in [1, K] \end{aligned}$$

其中 $\mathbf{h}_{m,k,j}$ 表示集合 \mathcal{N}_m 中的第 k 个用户与第 j 个基站之间的高频信道， $\mathbf{n}_{m,k}$ 表示集合 \mathcal{N}_m 中的第 k 个用户接收到的高斯随机噪声。在高频传输场景下，假设信道中只存在一条路径，那么 $\mathbf{h}_{m,k,j}$ 可以表示为：

$$\mathbf{h}_{m,k,j} = \beta_{m,k,j} \mathbf{a}_t(\theta_{m,k,j})$$

其中 $\beta_{m,k,j}$ 表示 \mathcal{N}_m 中的第 k 个用户与第 j 个基站之间的信道增益， $\theta_{m,k,j}$ 表示

第 j 个基站到 \mathcal{N}_m 中的第 k 个用户的信号离开角， $\mathbf{a}_t(\cdot)$ 表示阵列响应函数。

下面考虑感知信号模型。在高频信道场景下，假设感知信号在传输路径上也只有一条路径，那么目标监控终端的接收信号可以表示为：

$$\mathbf{Y}_j = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \alpha_i \mathbf{a}_r(\phi_i) \mathbf{a}_t^T(\varphi_{i,m}) \mathbf{X}_m + \mathbf{N}_s$$

其中 $\varphi_{i,m}$ 表示第 m 个基站到感知目标第 i 个散射体的信号离开角， ϕ_i 表示感知目标第 i 个散射体到目标监控终端的信号到达角， α_i 表示经过感知目标第 i 个散射体的信号复增益。 \mathbf{N}_s 表示高斯随机噪声， $\mathbf{a}_r(\cdot)$ 和 $\mathbf{a}_t(\cdot)$ 分别表示接收端和发送端的阵列响应函数。当 $I = 1$ 时，拓展目标退化为点目标。

第二步：探究通信和感知的性能指标

基于上述多基站协作通信感知融合网络系统模型，本步骤分别分析通信和感知的性能指标。

通信系统的性能与接收信号的信号干扰噪声比成正相关， \mathcal{N}_m 集合中的第 k 个用户接收信号的信号干扰噪声比为：

$$SINR_{m,k} = \frac{|\mathbf{h}_{m,k,m}^H \mathbf{W}_{RF,m} \mathbf{w}_{BB,m,k}|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^{K+S} |\mathbf{h}_{m,k,m}^H \mathbf{W}_{RF,m} \mathbf{w}_{BB,m,i}|^2 + \sum_{j=1, j \neq m}^M \|\mathbf{h}_{m,k,j}^H \mathbf{W}_{RF,j} \mathbf{w}_{BB,j}\|^2 + \sigma_n^2}$$

其中 σ_n^2 表示通信噪声方差。选择最差的信号干扰噪声比作为通信系统的性能指标，即：

$$g^{\text{comm}} = \min_{m,k} SINR_{m,k}$$

下面分析感知系统的性能指标。感知性能与接收到的目标反射信号的信噪比成正相关，目标监控终端接收到的信号的信噪比为：

$$SNR = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \|\alpha_i \mathbf{a}_r(\phi_{i,j}) \mathbf{a}_t^T(\varphi_{i,m}) \mathbf{W}_{RF,m} \mathbf{w}_{BB,m}\|^2}{N_r \sigma_s^2}$$

其中 σ_s^2 表示感知噪声方差。选择目标监控终端接收信号的信噪比作为感知系统的性能指标，即：

$$g^{\text{sens}} = SNR$$

第三步：构建刻画 Pareto 性能边界的优化问题模型

基于上述通信和感知性能指标，着眼于空口传输设计，本步骤构建混合预编码优化问题模型，采用加权的方式刻画多基站协作通信感知融合网络的 Pareto 性能边界。具体而言，优化问题模型可以写为：

$$\max_{\{\mathbf{W}_{RF,m}, \mathbf{w}_{BB,m}\}_{m=1}^M} \kappa g^{\text{comm}} + (1 - \kappa) g^{\text{sens}}$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \|\mathbf{W}_{\text{RF},m}\mathbf{W}_{\text{BB},m}\|^2 \leq P_t, \forall m \\ & \mathbf{W}_{\text{RF},m} \in \mathcal{M}^{N_t \times 2K}, \forall m \end{aligned}$$

其中 $\kappa \in (0,1)$ 表示权重因子， $\mathcal{M}^{M \times N} = \{\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{M \times N} \mid |\mathbf{X}_{i,j}| = 1, \forall i, j\}$ 。每一个不同取值的 κ 都对应 Pareto 性能边界上的一点，理论上，遍历所有的 κ ，即可刻画出多基站协作通信感知融合网络的 Pareto 性能边界。

第四步：求解刻画 Pareto 性能边界的优化问题

本步骤考虑步骤三中刻画 Pareto 性能边界的优化问题的求解方法。步骤三中的优化问题存在多基站之间的耦合、通信和感知的耦合、以及模拟与数字预编码的耦合，同时模拟预编码矩阵还要求满足恒模约束，因此该优化问题是一个强耦合的非凸优化问题，难以在多项式时间内获得全局最优解。为此，本研究点拟利用非凸优化，流形优化等理论工具，以较低的计算复杂度获得上述优化问题高质量的次优解。

下面简要介绍一些拟采用的技术方法。对于非凸恒模约束，拟采用黎曼流形优化的方法解决，黎曼流形优化的迭代过程如下：首先给定复圆流形空间中的上一个迭代点 \mathbf{x}_k ，然后求取该点的欧式梯度 $\nabla f(\mathbf{x}_k)$ ，接着将该欧式梯度反方向投影至复圆流形空间在 \mathbf{x}_k 点处的切空间 $T_{\mathbf{x}}\mathcal{M}$ 上得到相应的黎曼梯度 $-\text{grad } f(\mathbf{x}_k)$ ，最后通过黎曼梯度计算复圆流形空间中的下一个迭代点 \mathbf{x}_{k+1} ，循环上述过程直至收敛为止。黎曼流形优化的示意图如图\figure{}。此外，对于刻画多基站协作通信感知融合网络 Pareto 边界中遇到的多比值优化问题，可以使用二次转换技术。具体而言，考虑多比值优化问题：

$$\min_{\mathbf{x}} \sum_{m=1}^M \frac{f_m(\mathbf{x})}{g_m(\mathbf{x})}$$

其中 $f_m(\cdot), \forall m$ 是非负凸函数， $g_m(\cdot), \forall m$ 是正凹函数。使用二次转换技术，在第 n 次迭代中，可以将原问题转化为：

$$\min_{\mathbf{x}^{n+1}} \sum_{m=1}^M \{2y_m^n f_m(\mathbf{x}^{n+1}) - (y_m^n)^2 g_m(\mathbf{x}^{n+1})\}$$

其中 $y_m^n = \frac{\sqrt{f_m(\mathbf{x}^n)}}{g_m(\mathbf{x}^n)}, \forall m$ ，不断迭代上述过程，即可解决非凸的多比值优化问题。

最后，对于一般非凸目标函数或非凸约束，序贯凸近似可以构造近似凸目标函数或凸约束以替代原始的目标函数或约束，从而迭代求解一系列非凸问题。序贯凸近似方法示意图如图\figure{}所示。