

可重构智能表面辅助的通感一体化系统波束成形设计综述



A Review on Beamforming Design for Reconfigurable Intelligent Surface-Aided Integrated Sensing and Communication Systems

廖勇/Liao Yong, 韦东卫/Wei Dongwei

(重庆大学, 中国 重庆 400044)

(Chongqing University, Chongqing 400044, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602010

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20241111.1644.002>

网络出版日期: 2024-11-12

收稿日期: 2024-09-25

摘要: 可重构智能表面 (RIS) 技术在通感一体化 (ISAC) 系统设计中具有重构无线信号传输环境和信号波形调控等优势。针对 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形的最新研究成果进行系统综述, 从无源 RIS、有源 RIS、混合 RIS 3 个方面, 归纳分析现有波束成形设计的典型优化算法及应用效果, 同时分析 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形设计面临的技术挑战。最后从智能化波束成形、安全隐私优化、能量效率优化、近场传播波束成形设计 4 个方面, 对该领域的未来研究趋势进行展望, 为相关后续优化设计提供参考。

关键词: 可重构智能表面; 通感一体化; 波束成形; 反射相移; 权衡优化; 6G

Abstract: Reconfigurable intelligent surface (RIS) technology offers distinct advantages in the design of integrated sensing and communication (ISAC) systems, such as reshaping the wireless signal propagation environment and regulating signal waveforms. This paper systematically reviews the latest research advances in beamforming design for RIS-assisted ISAC systems. Typical optimization algorithms and corresponding application performance of existing beamforming schemes are summarized and analyzed from three perspectives: passive RIS, active RIS, and hybrid RIS. Meanwhile, the technical challenges confronted in beamforming design for RIS-assisted ISAC systems are dissected. Finally, future research trends in this field are prospected from four aspects: intelligent beamforming, security and privacy optimization, energy efficiency optimization, and near-field propagation beamforming design, so as to provide references for relevant subsequent optimization design.

Keywords: reconfigurable intelligent surface; integrated sensing and communications; beamforming design; reflection phase shift; trade-off optimization; 6G

引用格式: 廖勇, 韦东卫. 可重构智能表面辅助的通感一体化系统波束成形设计综述 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 63-72. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602010

Citation: Liao Y, Wei D W. A review on beamforming design for reconfigurable intelligent surface-aided integrated sensing and communication systems [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 63-72. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602010

随着经济社会的不断发展, 为了满足新的业务需求, 6G 移动通信技术应运而生。6G 具备太比特每秒级吞吐量和亚毫秒级延迟的优势, 在远程医疗、无人机、无人驾驶等应用场景中能发挥更大的作用^[1-3]。

通感一体化 (ISAC) 被认为是 6G 的关键候选技术之一。过去雷达传感和无线通信独立发展^[4]。虽然雷达传感和无线通信对信号处理的方式有所区别, 但是随着毫米波和太赫兹

通信技术在下一代蜂窝网络中的应用^[5], 无线通信系统频段将与雷达系统频段重叠, 并且两者都朝着天线阵列规模化和设备小型化方向发展^[6], 通信与感知将集成在一个系统中。这样可以减小设备尺寸, 解决收发机拥堵问题^[7]。ISAC 具有更低的部署成本、更广的感知范围, 可以同时提供通信和定位服务, 在智慧低空、智慧交通、智慧生活等场景中有广泛的应用前景^[8-10]。

可重构智能表面 (RIS) 是 6G 中的一项关键技术。毫米波和太赫兹是未来 6G 的备选频段, 但高频信号仍面临路径

基金项目: 重庆市自然科学基金项目 (CSTB2023NSCQ-MSX0025)

损耗高、盲区大、设备维护成本高等问题。RIS可以智能地重构无线传播环境，构建非视距链路，规避障碍物带来的穿透损耗，提高网络容量，扩大覆盖范围，减少盲区并降低系统维护成本^[11-13]。RIS可分为无源RIS和有源RIS，其上部署的反射元件（RE）能够通过可调的反射系数对入射射频信号进行反射。两种RIS的主要区别在于：有源RIS上部署了大量有源RE，能够将入射信号放大后反射^[14]。混合RIS同时部署了无源RE和有源RE，其对系统性能的提升效果会随无源与有源RE的数量及比例不同而存在差异。目前，学界中已经有大量研究证实，RIS能够被有效应用于无线通信领域，并且展现出显著优势^[15-19]。与此同时，移动通信运营商和设备厂商也纷纷投入到RIS的研发中，通过仿真验证与原型系统实验，进一步证明了RIS在提高覆盖率、网络容量和通信服务质量（QoS）等方面的优势^[20-21]。

同时，RIS在ISAC领域中也发挥着巨大作用。部署RIS能够提高ISAC系统的通信和感知性能。RIS通过非视距环境中建立虚拟视距路径提高雷达对被遮挡目标的探测性能，并且有源RIS还能有效补偿路径损耗，提高信干噪比（SINR），进而提高目标检测精度^[22-24]。文献[25]通过仿真分析，证明了在双功能雷达通信系统（DFRC）中部署RIS，能够提高回波信号的信噪比，降低杂波干扰。目前，针对RIS辅助ISAC系统设计的研究日益增多^[26-27]，Marco等^[28]对RIS进行了全面介绍，但该综述对RIS在ISAC系统中的应用分析略显不足，并未深入探讨RIS在此类应用中的具体优势和挑战。朱政宇等^[29]结合RIS的特点分析了RIS在ISAC系统中的优化设计，探讨了RIS辅助的ISAC系统中波束成形设计的问题。然而，该工作在原理分析和优化方法介绍方面仍存在不足。值得注意的是，波束成形与反射移相矩阵优化设计对RIS辅助ISAC系统的构建十分重要，关系到系统通信性能和感知性能的权衡。目前学界主要通过设计不同的优化算法，来对RIS辅助的ISAC系统进行波束成形优化。如何设计出一个鲁棒性更强、复杂度更低的优化算法，使得设计的波束在系统中发挥出更优性能，进而提高ISAC系统的通信和感知性能，已成为当前研究的热点和难点问题。

为此，本文对RIS辅助的ISAC系统中的波束成形设计进行了系统综述。本文主要工作和贡献如下：首先，描述无源RIS、有源RIS和混合RIS辅助ISAC系统的波束成形设计的基本原理和数学模型。其次，从无源RIS、有源RIS和混合RIS 3个角度，分别对波束成形的研究现状进行归纳、对比与分析。最后，指出亟待解决的问题和挑战，并对未来的研究趋势进行展望。

1 系统模型

本节将描述无源RIS、有源RIS、混合RIS辅助的ISAC系统的数学模型，包括复合信号公式、系统加权和速率（WSR）和探测功率等，给出RIS辅助的ISAC系统中通信与感知的性能指标，指出其中的波束成形优化问题。

1) 无源RIS辅助的ISAC系统模型

常见的无源RIS辅助的ISAC系统模型如图1所示。系统由配备了M根发射天线和M根接收天线的基站（BS）以及含有N个RE的RIS组成。在RIS的辅助下，该系统可同时服务K个单天线用户并且能够对单个目标进行感知。RIS将下行信号的主要波束对准用户。

在系统下行链路中，BS发射的信号可以表示为^[30]：

$$x = W_c s_c + W_r s_r = W_s \tag{1}$$

其中，我们定义 $W_c \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 为通信波形的波束成形矩阵， $W_r \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 为雷达波形的波束成形矩阵。 $s_c \in \mathbb{C}^K$ 和 $s_r \in \mathbb{C}^M$ 分别表示K个用户的通信符号矢量和M个雷达感知符号矢量，各自满足 $\mathbb{E}\{s_c s_c^H\} = I_K$ 和 $\mathbb{E}\{s_r s_r^H\} = I_M$ ，并且 $\mathbb{E}\{s_c s_r^H\} = 0$ 。定义系统发射符号矢量为 $s \triangleq [s_c^T, s_r^T]^T \in \mathbb{C}^{K+M}$ ，且 $s = [s_1, \dots, s_k, \dots, s_{K+M}]^T$ 。定义系统波束成形矩阵为 $W \triangleq [W_c, W_r] \in \mathbb{C}^{M \times (K+M)}$ 。系统中每个用户都能接收到BS-用户和BS-RIS-用户链路的复合信号，其中用户k接收到的复合信号为：

$$y_k = (h_k^H \Phi G + d_k^H) x + n_k \tag{2}$$

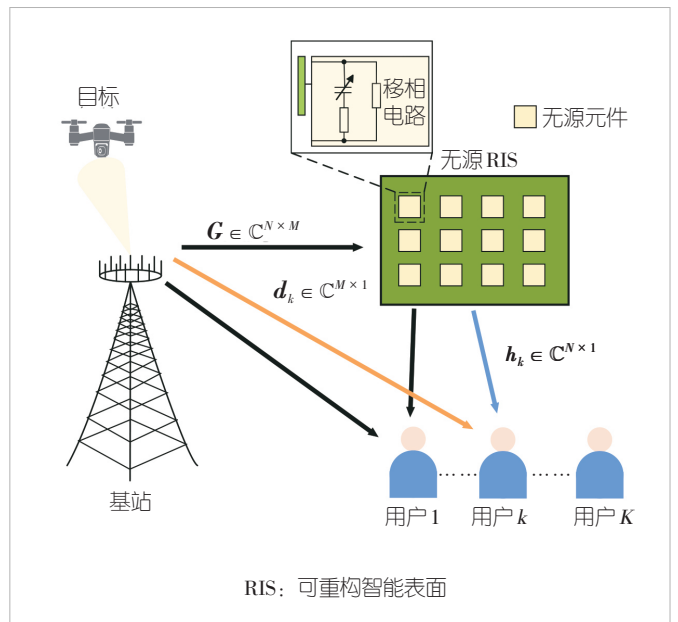


图1 无源RIS辅助的ISAC系统模型

其中, $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 、 $\mathbf{d}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 、 $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 分别表示 BS 与 RIS、BS 与用户、RIS 与用户间的信道。RIS 的反射系数矩阵定义为 $\Phi \triangleq \text{diag}(\boldsymbol{\varphi})$, 其中 $\boldsymbol{\varphi} \triangleq [\phi_1, \dots, \phi_N]^T$ 是满足 $|\phi_n| \leq 1, \forall n$ 的反射系数向量。 $n_k \sim \text{CN}(0, \sigma_k^2)$ 为用户 k 处的加性高斯白噪声 (AWGN)。用户 k 的 SINR 为:

$$\gamma_k = \frac{|(\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{d}_k^H) \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^{K+M} |(\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{d}_k^H) \mathbf{w}_j|^2 + \sigma_k^2} \quad (3),$$

其中 \mathbf{w}_j 是 \mathbf{W} 的第 j 列, 即 $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_j, \dots, \mathbf{w}_{K+M}]$ 。

2) 有源 RIS 辅助的 ISAC 系统模型

有源 RIS 辅助的 ISAC 系统, 如图 2 所示, 由于存在有源 RE, 可以对入射信号进行放大。然而, 这会引入额外的热噪声, 此时用户 k 接收到的复合信号为:

$$y_k = (\mathbf{h}_k^H \mathbf{P} \Phi \mathbf{G} + \mathbf{d}_k^H) \mathbf{x} + \mathbf{h}_k^H \mathbf{P} \mathbf{n}_v + n_k \quad (4),$$

其中, \mathbf{P} 表示有源 RIS 的放大倍率矩阵。有源元件产生的热噪声表示为 $n_v \sim \text{CN}(0, \sigma_v^2 \mathbf{I})$, 则用户 k 的 SINR 为:

$$\gamma_k = \frac{|(\mathbf{h}_k^H \mathbf{P} \Phi \mathbf{G} + \mathbf{d}_k^H) \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K |(\mathbf{h}_k^H \mathbf{P} \Phi \mathbf{G} + \mathbf{d}_k^H) \mathbf{w}_j|^2 + \|\mathbf{h}_k^H \mathbf{P} \Phi\|^2 \sigma_v^2 + \sigma^2} \quad (5).$$

3) 混合 RIS 辅助的 ISAC 系统模型

混合 RIS 辅助的 ISAC 系统如图 3 所示。混合 RIS 由 N 个排列为 $N_1 \times N_2$ 的矩形阵列 RE 组成, 其中含 A 个有源元件和 $N - A$ 个无源元件。定义 $\Psi = \mathbf{C} \Phi$ 为有源元件的反射系数矩阵

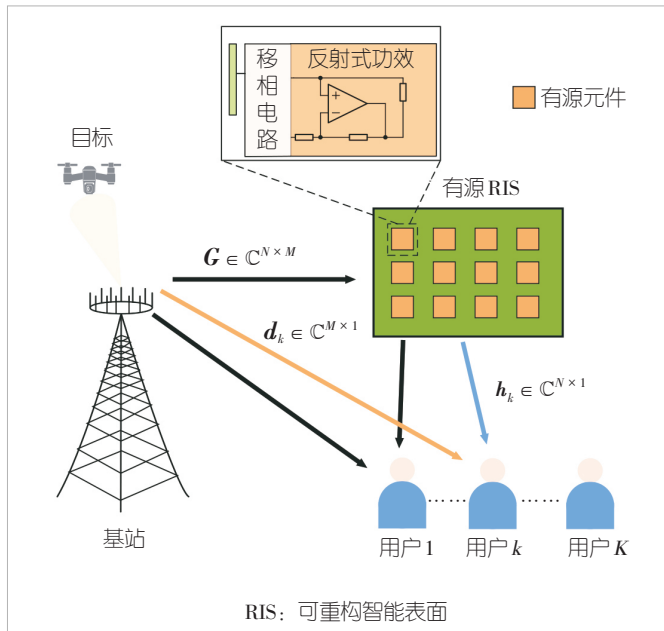


图2 有源RIS辅助的ISAC系统模型

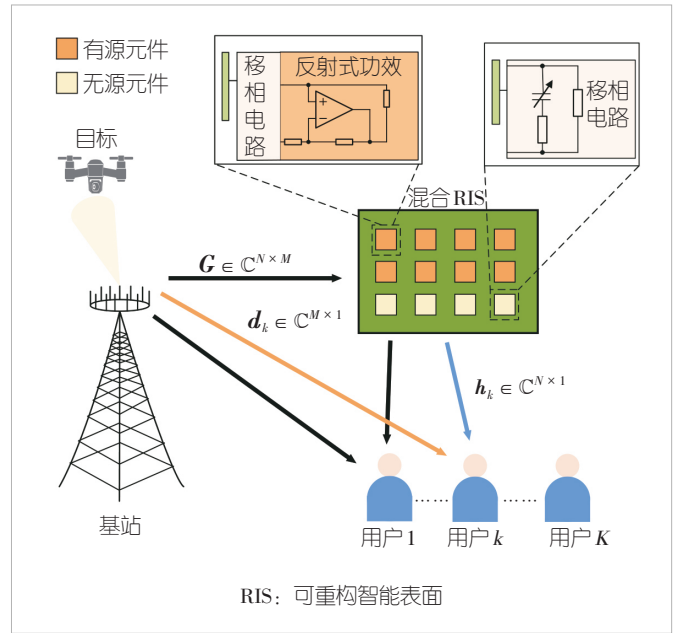


图3 混合RIS辅助的ISAC系统模型

阵, $\boldsymbol{\theta} = (\mathbf{I}_N - \mathbf{C}) \Phi$ 为无源元件的反射系数矩阵, 则混合 RIS 的反射相移矩阵为 $\Phi = \Psi + \boldsymbol{\theta}$ 。对角阵 \mathbf{C} 的前 A 行与 $N \times N$ 的单位矩阵相同, 则可以得到用户 k 的 SINR:

$$\gamma_k = \frac{|(\mathbf{h}_k^H \mathbf{P} \Phi \mathbf{G} + \mathbf{d}_k^H) \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K |(\mathbf{h}_k^H \mathbf{P} \Phi \mathbf{G} + \mathbf{d}_k^H) \mathbf{w}_j|^2 + \|\mathbf{h}_k^H \mathbf{P} \Psi\|^2 \sigma_v^2 + \sigma^2} \quad (6).$$

4) 优化问题

WSR 可以评估系统的总体吞吐量, 可作为评判系统通信性能的指标。WSR 可以表示为:

$$R = \sum_{k=1}^K \mu_k R_k \quad (7),$$

其中 μ_k 为用户 k 设置的权重, 由公平性和 QoS 要求决定。用户 k 的通信可实现速率 R_k 为:

$$R_k = \log_2(1 + \gamma_k) \quad (8).$$

雷达感知具有目标检测和参数估计的功能。为了保证系统能更好地接收目标回波信号、降低干扰信号, 可采用最大化目标方向信号功率同时最小化非目标方向信号功率的方法, 以此保证雷达感知性能。因此, 在 ISAC 系统中, 通常将雷达探测功率作为评估感知性能的指标。BS 在 θ_m 方向上发射信号的探测功率为:

$$P(\theta_m) = \mathbf{a}^H(\theta_m) \mathbf{W} \mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta_m) \quad (9).$$

若 BS 为均匀线阵, 则有导向矢量

$a(\theta_m) \triangleq \left[1, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin(\theta_m)}, \dots, e^{j2\pi(M-1) \frac{d}{\lambda} \sin(\theta_m)} \right]^T$, 其中 d 和 λ 分别表示天线间距与信号波长。

为了在系统总发射功率和 RIS 反射系数单位模量特性的约束下, 最大化系统的 WSR 和目标探测功率, 需要对系统波束成形矩阵 \mathbf{W} 和 RIS 的反射系数矩阵 Φ 进行设计优化。优化问题可以表达为^[31]:

$$\max_{\mathbf{W}, \varphi} \quad \varepsilon \sum_{k=1}^K \mu_k R_k + (1 - \varepsilon) P(\theta_m) \quad (10),$$

$$\text{s.t.} \quad \|\mathbf{W}\|_F^2 \leq P_t \quad (10a),$$

$$|\phi_n| \leq 1, \forall n \quad (10b),$$

其中, 为了使 WSR 和目标探测功率均能实现最大化, 在公式 (10) 中引入了正则化参数 ε 。 P_{BS}^{\max} 表示 BS 最大发射功率。

约束条件不同, 优化问题的表达形式也会不同。该优化问题为多目标优化问题, 且目标函数复杂度较高, 属于非凸问题, 因此需要寻找合适的优化算法来进行问题求解。

2 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形设计

第 1 节描述了 RIS 辅助 ISAC 波束成形的数学模型, 本节将针对该模型给出现有的波束成形设计。根据应用场景的不同, 我们将其分为无源 RIS、有源 RIS 和混合 RIS 3 种场景, 并归纳、对比和分析目前代表性的 ISAC 系统波束成形方法。

2.1 无源 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形

在 RIS 辅助 ISAC 系统中, 雷达感知性能和通信性能主要由雷达的探测功率和通信可实现总和速率衡量, 在系统中波束成形的优化设计问题对于权衡 ISAC 系统的通信性能和

雷达感知性能尤为重要。

针对这一优化问题, 学界已提出多种优化设计方法。陶启慧等^[32]提出了基于加权最小均方误差 (WMMSE) 和分数规划 (FP) 的交替优化 (AO) 算法来解决这一优化问题, 相关算法流程如图 4 所示。交替优化波束成形矩阵 \mathbf{W} 和反射相移系数 φ , 如公式 (10) 所述, 使得加权和速率 \mathbf{R} 和目标探测功率 $P(\theta_m)$ 最大化。

Liu 等^[33]提出了基于 FP、最大化-最小化 (MM)、交替方向乘法 (ADMM) 和一些复杂变换算法, 来联合求解 BS 发射/接收波束成形和 RIS 反射相移系数。Zhong 等^[34]提出了一种块坐标下降 (BCD) 的算法, 来最大限度地提高雷达的 SINR, 降低多用户通信的干扰。此外, 他们还提出了一种 Dinkelbatch-ECF 算法。陆睿等^[35]利用流形优化求解非凸问题的优势, 提出了一种基于流形优化的交替算法 (MO-AA) 对所提出的优化问题进行求解, 提高了系统通信服务质量与通信和速率。

段雪虎等^[31]提出了主动波束成形的连续凸逼近 (SCA) 双层迭代算法与被动波束成形的 FP 算法, 并通过在瑞利信道和莱斯信道中的仿真进行验证。结果表明, 该方法在提升主波束增益的同时, 也会导致侧波束增益升高。王宇哲等^[36]针对系统获取瞬时信道状态信息开销过大问题, 提出了一种统计信道状态信息 (CSI) 的联合波形设计方案, 并提出了一种交替优化算法来求解最优的基站发送协方差矩阵与 RIS 的对角相移矩阵。Xing 等^[37]在最小检测概率约束下最大化用户信噪比, 对通信和传感波束成形器、接收组合向量和 RIS 相移进行了交替优化与更新。Mai 等^[38]针对雷达干扰、多用户干扰和自由度低等问题, 通过引入替代优化算法, 使用黎曼共轭梯度 (RCG) 和黎曼最速下降 (RSD) 算法优化波束, 从而降低总干扰。Liu 等^[39]开发了一种高效迭代算法, 在最坏情况雷达信噪比限制、发射功率预算和反射系数的单

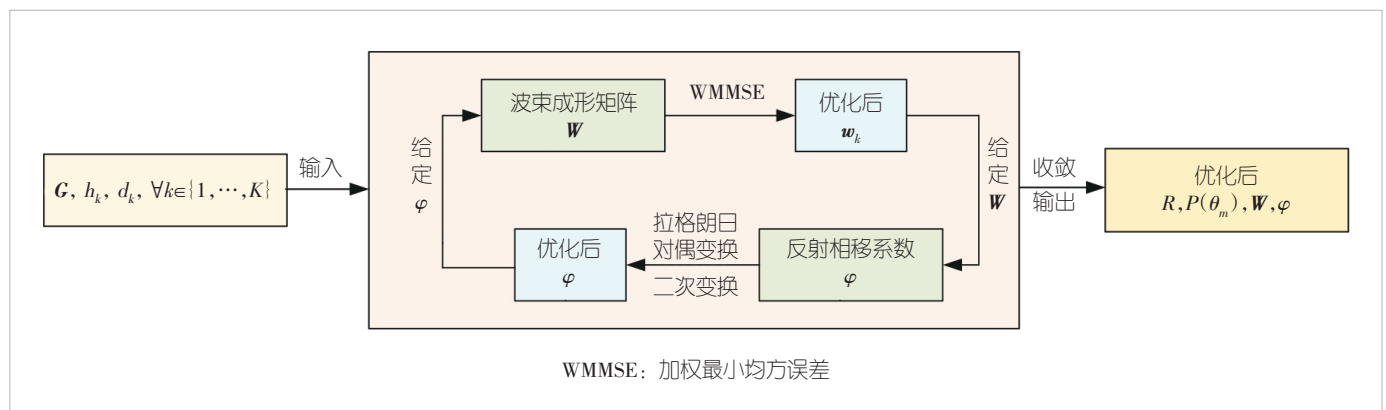


图 4 基于 WMMSE 和 FP 的联合波束成形设计算法流程图^[29]

位模数限制下，使多用户通信的和速率达到最大。

无源 RIS 辅助 ISAC 系统的波束成形设计算法如表 1 所示。

2.2 有源 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形

有源 RIS 上的有源器件虽然能够抑制乘法衰落效应，但是会增加系统的总功耗。与无源 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形设计一样，有源 RIS 辅助系统的设计也会面临多约束优化问题。

有源 RIS 辅助 ISAC 系统中速率最大化的优化问题，除了存在基站最大发射功率的约束外，还存在有源 RIS 自身的功率放大器最大功率 P_A^{\max} 的约束。有源 RIS 的反射功率 P_A 由所需信号功率和放大的噪声功率组成，可表示为：

$$P_A = \sum_{k=1}^K \|\mathbf{P}\Phi\mathbf{G}w_k\|^2 + \|\mathbf{P}\Phi\|^2\sigma_v^2 \quad (11),$$

其中 \mathbf{P} 为有源 RIS 的放大倍率矩阵。基于公式 (11)，有源 RIS 的输出总功耗约束条件如下^[40]：

$$\sum_{k=1}^K \|\mathbf{P}\Phi\mathbf{G}w_k\|^2 + \|\mathbf{P}\Phi\|^2\sigma_v^2 \leq P_A^{\max} \quad (12).$$

常见的基于 AO 与 FP 的有源 RIS 和速率最大化问题及联合波束成形与反射相移优化设计流程如图 5 所示，其中系统输入为信道 \mathbf{G} 、 h_k 和 d_k ，待优化变量为波束成形矩阵 \mathbf{W} 和反

射矩阵 Φ ，以及通过 FP 方法引入的辅助变量 ρ 和 α 。结合公式 (6) 和公式 (8)，通过交替优化 4 个变量首先得到最优解，随后再不断更新迭代，直至总和速率 R 收敛。

Yu 等^[41]提出了一种四跳传感链路的有源 RIS 辅助 ISAC 系统，通过 MM 算法处理非凸的雷达 SINR 目标函数，并开发了基于半正定松弛 (SDR) 的方法来解决由此产生的四元问题。Rihan 等^[42]在满足用户信噪比和雷达信噪比的 QoS 要求的前提下，考虑了与发射功率和 RIS 配置有关的通信系统 EE 最大化问题。为解决所考虑的优化问题，他们开发了一种基于 AO 算法的迭代程序。EE 受 RIS 元件数量、RIS 位置、最低频谱效率系统要求和信道状态信息准确性的影响。在给定条件下已证明，有源 RIS 性能普遍优于无源 RIS。

Zhu 等^[43]基于 BCD、Dinkelbach 算法和 MM 算法开发了一种高效的联合优化算法，并验证了在 ISAC 系统中部署主动 RIS 的优势。为了最大限度地提高雷达输出信噪比并满足通信用户的 QoS 要求，需要联合设计发射波束成形器、有源 RIS 反射系数和雷达接收滤波器。为了在保证通信质量的同时最大限度地提高目标检测功率，Hao 等^[44]在 BS 中引入了延迟对齐调制 (DAM) 技术来补偿多路径延迟，首先利用替代优化方法将非凸问题解耦为两个子问题，再通过二次约束二次方程程序和 SDR 方法将每个子问题转化为凸问题。此外，为了降低 SDR 方法的复杂度，他们还提出了一种基于 MM 算法的迭代算法。

表 1 基于无源 RIS 辅助 ISAC 系统的波束成形设计算法

文献	优化算法	基准算法	算法效果
[32]	基于 AO、WMMSE、FP 算法	基于 WMMSE 的随机优化算法、无 RIS 辅助模型	仿真结果证明，与基准方案相比，目标路径上探测功率和 WSR 都有提升
[33]	基于 FP、MM、ADMM 的联合求解算法	所提系统仅通信模型、所提系统仅感知模型和通信波束和感知波束分别优化模型	展示了在资源有限的情况下通信与雷达传感之间的性能权衡
[34]	BCD、Dinkelbachs-ECF 算法	无 RIS 辅助的 ISAC 和基于感知的 RIS 模型	所提方法在 SINR 和可实现总速率方面都有更好的性能
[35]	基于流形优化的交替算法	ADMM	所提算法在收敛性能与 ADMM 相近的情况下有更好的系统性能
[31]	SCA、FP	无 RIS 辅助的 ISAC 模型	在 Rician 信道下可实现和速率与感知功率都能得到有效改善
[36]	基于统计 CSI 的联合波束成形设计方案	所提交替优化算法模型	大系统近似结果与由蒙特卡洛平均实现的系统遍历速率保持高度一致，证明了所得近似结果的准确性
[37]	一种基于分段式搜索算法	随机 RIS 相移模型、无检测概率约束模型、定向相移模型	信噪比和回波功率均优于基准模型
[38]	基于 RCG-RSD 交替优化算法	RSD-Norm-SVD 交替算法、无 RIS 的 ZF 波束成形设计模型	所提设计能有效降低雷达和多用户总干扰，权衡通信和传感性能
[39]	基于 FP、MM、ADMM 的高效迭代算法	随机反射系数的 RIS 和无 RIS 的 ISAC 系统	总和速率和雷达信噪比均优于基准方案

ADMM: 交替方向乘子法
AO: 交替优化
BCD: 块坐标下降
CSI: 信道状态信息

ECF: 逐元素闭式
FP: 分数规划
ISAC: 通感一体化
MM: 最大化-最小化

RCG: 黎曼共轭梯度
RIS: 可重构智能表面
RSD: 黎曼最速下降
SCA: 连续凸逼近

SINR: 信干噪比
SVD: 奇异值分解
WMMSE: 加权最小均方误差
WSR: 加权和速率

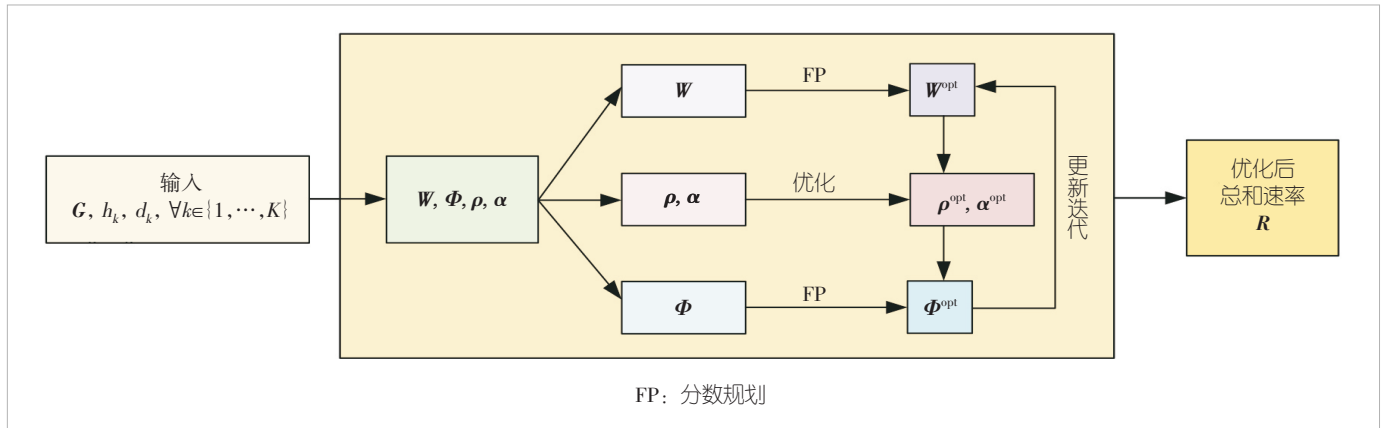


图5 有源RIS和速率最大化问题及联合波束成形与反射相移优化设计流程图^[40]

大多数 RIS 只能反射入射信号，这就要求发射器和接收器部署在 RIS 的同侧，而实际部署时会受到地理因素的限制。可同时发射与反射的可重构智能表面（STAR-RIS）不仅可以入射信号反射到同侧空间，还能透射到相反空间，并且反射信号和透射信号分别由反射系数和透射系数独立控制，从而实现全空间覆盖，提高了自由度和网络部署的灵活性^[45-46]。Liu 等^[47]提出了一种基于 STAR-RIS 辅助 ISAC 系统，引用了半无限松弛法、MM 和顺序秩一约束松弛（SROCR）法，开发了一种高效的整体迭代算法对非凸问题进行优化。

有源 RIS 辅助 ISAC 系统的波束成形设计算法如表 2 所示。

2.3 混合 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形

混合 RIS 中既有无源器件也有有源器件，能够缓解乘法衰落效应。相比于单纯的有源 RIS，混合 RIS 能够在尽可能保证系统性能的同时降低系统功耗。

在混合 RIS 系统中，存在无源 RIS 器件和有源 RIS 器件，系统总功耗变为：

$$P = \frac{1}{a} (\|W_c\|^2 + \|W_r\|^2) + \frac{1}{b} P_{RIS} + P_c + P_r \quad (13)$$

混合 RIS 功耗为：

$$P_{RIS} = \|\psi G(W_c + W_r)\|_F^2 + \|\psi\|_F^2 \sigma_c^2 \quad (14)$$

公式（13）中， a 、 b 分别表示 BS 和 RIS 的放大器效率，总功耗公式中第一项表示 BS 发射功率， P_c 表示用户和 BS 消耗的硬件功率， P_r 是 RIS 消耗的电路功率。

褚宏云等^[48]在满足 BS 发射功率、波束增益、混合 RIS 功率和反射系数幅值约束的条件下，联合优化基站端的波束成形和混合 RIS 的相移，并基于级联深度学习网络构建了相移网络和波束成形两阶段优化网络，如图 6 所示。第一阶段优化可得到相移矩阵 Φ 和有效信道 H ，将其输入第二阶段网络后可进一步得到优化后的波束成形矩阵 W 。相比于经典的交替优化算法，该方法复杂度更低，系统性能更优。

Liao 等^[49]提出了一种基于 AO 的设计方案，以低复杂度的方式交替优化 BS 的发射波束成形设计和混合 RIS 的系数矩阵。仿真结果表明，增加有源 RIS 器件数量会比增加无源

表2 基于有源RIS辅助的ISAC系统波束成形设计算法

文献	优化算法	基准算法	算法效果
[41]	基于MM算法和SDR的优化算法	无源RIS辅助的系统	相比无源RIS系统,具有更高的鲁棒性,主动RIS的实施可显著减轻四跳传感链路中的乘法衰落影响
[42]	基于AO、FP算法	通过改变RIS类型和器件、部署位置进行对比	EE受RIS元件数量、RIS位置、系统最低频谱效率要求和信道状态信息准确性的影响
[43]	基于BCD、Dinkelbach、MM的优化算法	无源RIS辅助ISAC模型、主动RIS辅助雷达模型	与被动RIS辅助ISAC系统比,主动RIS可实现高达32 dB的雷达信噪比提升
[44]	基于SDR算法和基于MM的AO算法	有无DAM技术系统模型	在太赫兹系统上,具有DAM的有源RIS在通信和传感性能方面优于其他方案
[47]	半无限松弛法、MM、SROCR	传统RIS、随机STAR-RIS和无STAR-RIS辅助的ISAC系统	与传统RIS相比,STAR-RIS可以有效权衡通信与感知性能

AO: 交替优化 DAM: 延迟对齐调制 ISAC: 通感一体化 RIS: 可重构智能表面 SROCR: 顺序秩一约束松弛
 BCD: 块坐标下降 FP: 分数规划 MM: 最大化-最小化 SDR: 半正定松弛 STAR: 同时发射与反射

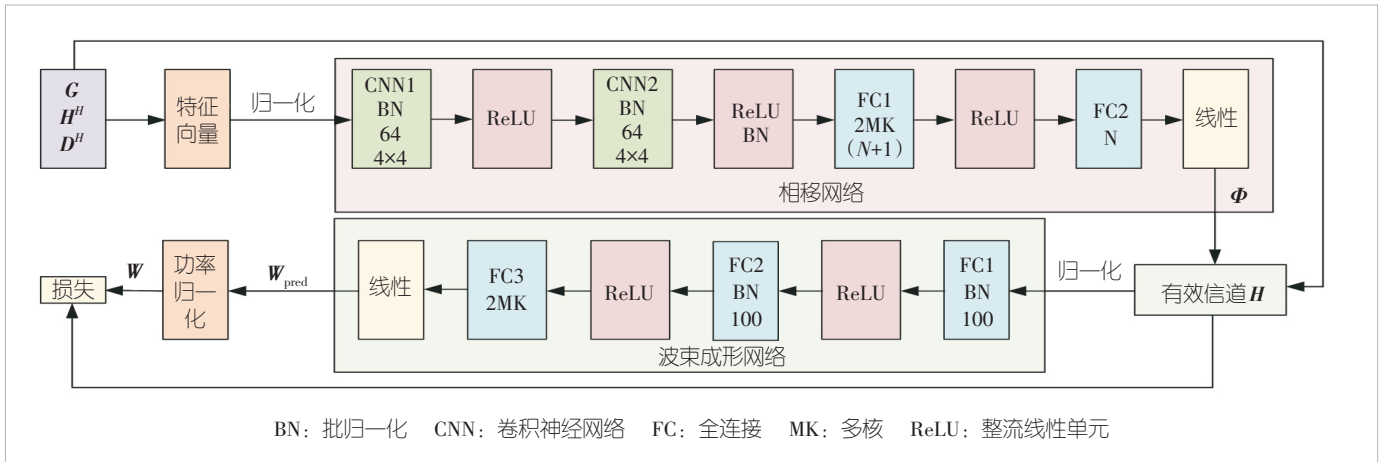


图6 两阶段波束成形网络结构图^[48]

RIS 器件更能有效改善系统整体性能。Sankar 等^[50]提出了一种基于交替优化的求解算法，用于设计发射波束成形器和 RIS 系数。相关数值模拟证明了所提出的混合 RIS 辅助 ISAC 系统的性能明显优于无源 RIS 辅助 ISAC 系统和无 RIS 的 ISAC 系统。Hao 等^[51]研究了一种借助混合可重构智能面的毫米波 ISAC 系统，采用了混合预编码结构。通过二次约束二次规划 (QCQP) 和 SDR 技术将波束成形优化子问题转化为凸问题，再通过 ADMM 进行求解。

Zhao 等^[52]研究了一种模式选择性混合 RIS，其每个元件都能在主动模式和被动模式之间切换，并提出了一种基于交替优化的方法，用于求解一类非凸优化问题，即在满足每个 CU 的通信要求、BS 的发射功率约束以及有源 RIS 单元约束的前提下，最大限度地提高雷达输出信噪比。最终得到的系统性能优于有源 RIS 或无源 RIS 辅助的方案。

混合 RIS 辅助的 ISAC 系统波束成形设计算法如表 3 所示。

3 技术挑战和研究趋势

3.1 技术挑战

尽管 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形的研究取得诸多研究成果，但是在以下几个方面仍存在一些技术挑战：

1) 算法复杂度

波束成形优化算法的复杂度随着 BS 天线数、用户数、RIS 反射单元数的增加而提高。未来接入网络的设备越来越多，算法的收敛速度也会随之降低，进而会影响通信的 WSR 和雷达的 SINR，最终影响系统性能。因此，如何设计低复杂度的优化算法来提高算法收敛速度是一个巨大挑战。

2) 通信环境

未来的 ISAC 系统要面对多种复杂的现实环境。例如，在车联网的 ISAC 系统中，时常要面对高速移动的场景，需要避免信号失真、增强信号回波，以保证系统的通信和感知性能。对此，可以借助正交时频空间 (OTFS) 调制技术来提高系统在动态环境中的性能，适应复杂环境^[53]。

表3 基于混合RIS辅助的ISAC系统波束成形设计算法

文献	优化算法	基准算法	算法效果
[48]	基于级联深度学习网络的求解算法	传统AO优化模型、无源RIS、有源RIS、无RIS模型	基于深度学习的方法的系统性能优于基于传统的AO算法的系统
[49]	AO、SDR	只进行信息传输的混合RIS辅助ISAC系统、RIS相位随机、无源RIS	降低优化问题的复杂度,相较于基准方案,提高了系统性能
[50]	AO	无源RIS、随机RIS、无RIS方案	研究证明少部分RIS处于激活状态,性能也优于基准方案
[51]	QCQP、SDR、ADMM	有源RIS和无源RIS分别结合全数字预编码和混合预编码	与全数字编码结构相比,所提出的系统具有更高的能效和更好的通信和感知性能
[52]	AO、MM、Dinkelbach、SDR、BCD	无源RIS、有源RIS	所提方案性能优于仅由主动或被动RIS辅助的同类方案

ADMM: 交替方向乘子法
AO: 交替优化

BCD: 块坐标下降
ISAC: 通感一体化

MM: 最大化-最小化
QCQP: 二次约束二次规划

RIS: 可重构智能表面
SDR: 半正定松弛

3) 能量效率与功耗

波束成形设计需要考虑系统的能量效率问题。当大规模部署 RIS 时, 系统功耗一定是不能忽略的问题。有源 RIS 和混合 RIS 都需要考虑部署面积和部署位置以平衡功耗和系统性能。在系统功耗恒定的情况下, 当增加有源 RIS 的发射功率超过一定限度时, 雷达 SINR 就会下降^[41, 43]。文献[48]讨论了 RIS 元件数目与能量效率的关系。绿色 RIS 辅助 ISAC 系统的波束成形设计也是一大挑战。

4) 近场传播

近场与远场通信的边界由瑞利距离确定。瑞利距离与阵列孔径的平方成正比, 与波长成反比。近场传播的典型特征包括球面波模型、空间非平稳性、宽带波束斜视效应等。原有的远场传播技术在近场传播时会造成严重的性能损失^[54]。在 RIS 辅助 ISAC 系统中, RIS 的超大阵列孔径与高频段通信特性, 使得其更适合工作在近场传播环境中。若仍使用远场通信技术, 将会对系统性能造成严重影响。

3.2 研究趋势

未来 RIS 辅助 ISAC 系统的波束成形研究将主要集中在智能化、安全性以及能量效益方面:

1) 智能化波束成形

未来 RIS 辅助 ISAC 系统的波束成形设计将更加智能化, 通过机器学习、深度学习 (DL) 等技术实现自适应波束成形。Sheen 等^[55]构建了一种 DL 模型, 在无需 CSI 的情况下, 通过捕获动态环境和通信网络之间的相互作用与特征, 预测出 RIS 的最佳相移。Taha 等^[56]基于 DL 方法, 提出了一种混合 RIS 辅助无线通信系统的波束成形设计方案, 有效降低了系统开销。深度强化学习 (DRL) 具有更强的决策能力和学习效率。Feng 和 Huang 等^[57-58]将 DRL 技术结合到 RIS 联合波束成形和反射相移的设计中, 使得系统能够在环境中学习, 逐步得到最优的发射波束和相移矩阵, 具有良好的鲁棒性和更快的收敛速度。

2) 安全隐私优化

未来 RIS 辅助 ISAC 系统设计在兼顾系统性能的同时要关注安全性问题。朱政宇等^[59]针对存在窃听者的 ISAC 系统安全性低的问题, 提出一种安全资源分配算法。该算法在满足基站和干扰机最大发射功率、雷达 SINR 约束条件下, 对发射波束成形和反射相移进行联合优化, 在最大化系统保密率的同时, 保证了通信与感知性能。

3) 能量效率优化

未来 RIS 辅助 ISAC 系统的波束成形设计将注重能量效率优化, 通过优化波束形状和传输路径, 减少能量损耗, 提

高系统的能效性能。Li 等^[60]开发了一套优化传输方案, 来平衡能效和频谱效率, 与采用相等功率分配或固定 RIS 相移器相比, 显著提高了频谱效率。对于含有有源 RIS 的 ISAC 系统, 不仅要关注 BS 发射功率, 还要考虑 RIS 模块中有源器件的功耗, 权衡雷达 SINR 与通信总和速率, 以保证系统的通信和感知性能, 实现高能效波束成形设计。

4) RIS 近场传播环境波束成形

RIS 具有超大阵列孔径、低成本、易部署、低功耗等优点, 有望在未来用于构建近场传播环境。在 RIS 辅助的 ISAC 系统中, 基于 RIS 创造的近场传播环境, 能够提高 ISAC 系统的通信和感知性能。首先, 相比于远场通信, 近场通信具有提升信道容量、提供更高空间自由度的优势。其次, 近场特有的空间非平稳性和宽带波束斜视效应, 能加速系统感知定位并提高定位精度^[61]。未来, 由 RIS 构建的近场传播环境也将成为 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形设计中不可忽视的条件。

4 结束语

本文首先描述了 RIS 辅助 ISAC 系统的通用信号模型, 包括无源 RIS、有源 RIS 和混合 RIS 3 种应用场景, 并给出波束成形优化问题建模。其次, 按无源 RIS、有源 RIS、混合 RIS 3 类场景, 对 ISAC 系统中波束成形设计和优化算法进行系统分析、归纳与对比。最后, 探讨了 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形设计的技术挑战, 并展望了其未来研究趋势。其中, 如何降低优化算法的复杂度、权衡通信与雷达感知性能, 是当前面临的重要挑战; 而开发新的优化算法、引入人工智能等新技术, 将成为未来推进 RIS-ISAC 系统波束成形发展的关键突破口。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Kak A, Nie S. 6G and beyond: the future of wireless communications systems [J]. IEEE access, 2020, 8: 133995-134030. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3010896
- [2] Saad W, Bennis M, Chen M Z. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems [J]. IEEE network, 2020, 34(3): 134-142. DOI: 10.1109/MNET.001.1900287
- [3] Zhang Z Q, Xiao Y, Ma Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2019, 14(3): 28-41. DOI: 10.1109/MVT.2019.2921208
- [4] Zhang J A, Liu F, Masouros C, et al. An overview of signal processing techniques for joint communication and radar sensing [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2021, 15(6): 1295-1315. DOI: 10.1109/JSTSP.2021.3113120
- [5] Rappaport T S, Xing Y C, Kanhere O, et al. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities

- and challenges for 6G and beyond [J]. IEEE access, 2019, 7: 78729–78757. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2921522
- [6] Liu F, Cui Y H, Masouros C, et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(6): 1728–1767. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3156632
- [7] Liu F, Masouros C, Petropulu A P, et al. Joint radar and communication design: applications, state-of-the-art, and the road ahead [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(6): 3834–3862. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.2973976
- [8] 李萍, 郭晓江. 通感一体化关键技术与应用 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(2): 72–78. DOI: 10.12142/ZTETJ.202302014
- [9] Yuan J H, Fei Z S, Wei Z Q. Integrated sensing and communication (ISAC) technologies for future wireless communication [J]. ZTE communications, 2024, 22(3): 1–3. DOI: 10.12142/ZTECOM.202403001
- [10] 胡文豪, 何振耀, 徐甜甜, 等. 通感赋能低空覆盖网络技术 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 6–12. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501003
- [11] 马红兵, 张平, 杨帆, 等. 智能超表面技术展望与思考 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(3): 70–77. DOI: 10.12142/ZTETJ.202203012
- [12] Zhu Y T, Xu Z Y, Zhang H T. Cooperative distributed beamforming design for multi-RIS aided cell-free systems [J]. ZTE communications, 2024, 22(2): 99–106. DOI: 10.12142/ZTECOM.202402013
- [13] 李萍, 叶峥峥, 龔建武. 智能超表面自动化部署解决方案 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(6): 70–74. DOI: 10.12142/ZTETJ.202506010
- [14] Long R Z, Liang Y C, Pei Y Y, et al. Active reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(8): 4962–4975. DOI: 10.1109/TWC.2021.3064024
- [15] Wu Q Q, Zhang R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(11): 5394–5409. DOI: 10.1109/TWC.2019.2936025
- [16] Pan C H, Zhou G, Zhi K D, et al. An overview of signal processing techniques for RIS/IRS-aided wireless systems [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2022, 16(5): 883–917. DOI: 10.1109/JSTSP.2022.3195671
- [17] Huang C W, Zappone A, Alexandropoulos G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(8): 4157–4170. DOI: 10.1109/TWC.2019.2922609
- [18] Dai L L, Wang B C, Wang M, et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: antenna design, prototyping, and experimental results [J]. IEEE access, 2020, 8: 45913–45923. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2977772
- [19] Basar E, Di Renzo M, De Rosny J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE access, 2019, 7: 116753–116773. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2935192
- [20] Yuan Y F, Gu Q, Wang A N, et al. Recent progress in research and development of reconfigurable intelligent surface [J]. ZTE communications, 2022, 20(1): 3–13
- [21] Hou X L, Li X, Wang X, et al. Some observations and thoughts about reconfigurable intelligent surface application for 5G evolution and 6G [J]. ZTE communications, 2022, 20(1): 14–20. DOI: 10.12142/ZTECOM.202201003
- [22] Rihan M, Grossi E, Venturino L, et al. Spatial diversity in radar detection via active reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE signal processing letters, 2022, 29: 1242–1246. DOI: 10.1109/LSP.2022.3175417
- [23] Zhang H B, Zhang H L, Di B Y, et al. MetaRadar: multi-target detection for reconfigurable intelligent surface aided radar systems [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(9): 6994–7010. DOI: 10.1109/TWC.2022.3153792
- [24] Wang F Z, Li H B, Fang J. Joint active and passive beamforming for IRS-assisted radar [J]. IEEE signal processing letters, 2022, 29: 349–353. DOI: 10.1109/LSP.2021.3134899
- [25] 刘让, 罗泓昊, 李明. 智能超表面在通信感知一体化系统中的应用 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(3): 53–57, 69. DOI: 10.12142/ZTETJ.202203009
- [26] Prasobh Sankar R S, Deepak B, Chepuri S P. Joint communication and radar sensing with reconfigurable intelligent surfaces [C]//Proceedings of IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2021: 471–475. DOI: 10.1109/spawc51858.2021.9593143
- [27] Di B Y, Zhang H L, Song L Y, et al. Hybrid beamforming for reconfigurable intelligent surface based multi-user communications: achievable rates with limited discrete phase shifts [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(8): 1809–1822. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3000813
- [28] Di Renzo M, Zappone A, Debbah M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(11): 2450–2525. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3007211
- [29] 宋政宇, 宁梦珂, 孙钢灿, 等. 智能超表面辅助通信感知一体化系统研究综述 [J]. 移动通信, 2023, 47(11): 51–58
- [30] Liu X, Huang T Y, Shlezinger N, et al. Joint transmit beamforming for multiuser MIMO communications and MIMO radar [J]. IEEE transactions on signal processing, 2020, 68: 3929–3944. DOI: 10.1109/TSP.2020.3004739
- [31] 段雪虎, 陈立伟, 王桐. RIS辅助的通信感知一体化波束成形设计 [J]. 应用科技, 2024, 51(5): 182–189. DOI: 10.11991/yykj.202310012
- [32] 陶启慧, 粟欣, 刘蓓, 等. RIS辅助通感一体化: 波束成形和反射相移的联合设计 [J]. 移动通信, 2024, 48(3): 61–65
- [33] Liu R, Li M, Liu Q, et al. SNR/CRB-constrained joint beamforming and reflection designs for RIS-ISAC systems [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(7): 7456–7470. DOI: 10.1109/TWC.2023.3341429
- [34] Zhong K, Hu J F, Pan C H, et al. Joint waveform and beamforming design for RIS-aided ISAC systems [J]. IEEE signal processing letters, 2023, 30: 165–169. DOI: 10.1109/LSP.2023.3242554
- [35] 陆馨, 刘陈, 宋云超, 等. 基于流形优化的RIS辅助通感一体化系统传输方案设计 [J]. 无线电通信技术, 2024, 50(3): 555–563
- [36] 王宇哲, 刘一龙, 张军. 基于统计CSI的RIS辅助通感一体化波束成形设计 [J]. 无线电通信技术, 2024, 50(2): 328–333
- [37] Xing Z, Wang R, Yuan X J. Joint active and passive beamforming design for reconfigurable intelligent surface enabled integrated sensing and communication [J]. IEEE transactions on communications, 2023, 71(4): 2457–2474. DOI: 10.1109/TCOMM.2023.3244246
- [38] Mai Y Y, Du H Q. Joint beamforming and phase shift design for RIS-aided ISAC system [C]//Proceedings of IEEE 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE, 2022: 155–160. DOI: 10.1109/ICCC56324.2022.10065868
- [39] Liu R, Li M, Swindlehurst A L. Joint beamforming and reflection design for RIS-assisted ISAC systems [C]//Proceedings of 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). IEEE, 2022: 997–1001. DOI: 10.23919/EUSIPCO55093.2022.9909807
- [40] Zhang Z J, Dai L L, Chen X B, et al. Active RIS vs. passive RIS: which will prevail in 6G [J]. IEEE transactions on

- communications, 2023, 71(3): 1707–1725. DOI: 10.1109/TCOMM.2022.3231893
- [41] Yu Z Y, Ren H, Pan C H, et al. Active RIS-aided ISAC systems: beamforming design and performance analysis [J]. IEEE transactions on communications, 2024, 72(3): 1578–1595. DOI: 10.1109/TCOMM.2023.3332856
- [42] Rihan M, Zappone A, Buzzi S, et al. Power control and active RIS design for energy-efficient integrated sensing and communications [C]//Proceedings of 57th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. IEEE, 2023: 774–778. DOI: 10.1109/IEEECONF59524.2023.10476742
- [43] Zhu Q, Li M, Liu R, et al. Joint transceiver beamforming and reflecting design for active RIS-aided ISAC systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2023, 72(7): 9636–9640. DOI: 10.1109/TVT.2023.3249752
- [44] Hao W M, Shi H, Sun G C, et al. Joint beamforming design for active RIS-aided THz ISAC systems with delay alignment modulation [J]. IEEE wireless communications letters, 2023, 12(10): 1816–1820. DOI: 10.1109/LWC.2023.3295912
- [45] Mu X D, Liu Y W, Guo L, et al. Simultaneously transmitting and reflecting (STAR) RIS aided wireless communications [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(5): 3083–3098. DOI: 10.1109/TWC.2021.3118225
- [46] Xu J Q, Liu Y W, Mu X D, et al. STAR-RISs: simultaneous transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(9): 3134–3138. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3082214
- [47] Liu Z P, Li X, Ji H, et al. Toward STAR-RIS-empowered integrated sensing and communications: joint active and passive beamforming design [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2023, 72(12): 15991–16005. DOI: 10.1109/TVT.2023.3294338
- [48] 褚宏云, 杨梦瑶, 黄航, 等. 混合智能反射面辅助的通感感知一体化: 高能波束成形设计 [J]. 电子与信息学报, 2024, 46(6): 2462–2469
- [49] Liao C K, Wang F, Han G J, et al. Beamforming design for hybrid active-passive RIS assisted integrated sensing and communications [J]. IEEE communications letters, 2023, 27(11): 2938–2942. DOI: 10.1109/LCOMM.2023.3314609
- [50] Sankar R S P, Chepuri S P. Beamforming in hybrid RIS assisted integrated sensing and communication systems [C]//Proceedings of 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). IEEE, 2022: 1082–1086. DOI: 10.23919/EUSIPCO55093.2022.9909562
- [51] Hao W M, Qu Y C, Zhou S, et al. Joint beamforming design for hybrid RIS-assisted mmWave ISAC system relying on hybrid precoding structure [J]. IEEE Internet of Things journal, 2024, 11(18): 29455–29469. DOI: 10.1109/JIOT.2024.3390134
- [52] Zhao R, Hu X Y, Liu C W, et al. Joint beamforming and mode selection design for hybrid RIS assisted integrated sensing and communications [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2024: 1–6. DOI: 10.1109/WCNC57260.2024.10571105
- [53] Yuan W J, Wei Z Q, Li S Y, et al. Integrated sensing and communication-assisted orthogonal time frequency space transmission for vehicular networks [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2021, 15(6): 1515–1528. DOI: 10.1109/JSTSP.2021.3117404
- [54] Cui M Y, Wu Z D, Lu Y, et al. Near-field MIMO communications for 6G: fundamentals, challenges, potentials, and future directions [J]. IEEE communications magazine, 2023, 61(1): 40–46. DOI: 10.1109/MCOM.004.2200136
- [55] Sheen B, Yang J, Feng X L, et al. A deep learning based modeling of reconfigurable intelligent surface assisted wireless communications for phase shift configuration [J]. IEEE open journal of the communications society, 2021, 2: 262–272. DOI: 10.1109/OJCOMS.2021.3050119
- [56] Taha A, Alrabeiah M, Alkhateeb A. Enabling large intelligent surfaces with compressive sensing and deep learning [J]. IEEE access, 2021, 9: 44304–44321. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3064073
- [57] Feng K M, Wang Q S, Li X, et al. Deep reinforcement learning based intelligent reflecting surface optimization for MISO communication systems [J]. IEEE wireless communications letters, 2020, 9(5): 745–749. DOI: 10.1109/LWC.2020.2969167
- [58] Huang C W, Mo R H, Yuen C. Reconfigurable intelligent surface assisted multiuser MISO systems exploiting deep reinforcement learning [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(8): 1839–1850. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3000835
- [59] 朱政宇, 杨晨一, 李铮, 等. 智能反射面辅助通感一体化系统安全资源分配算法 [J]. 电子与信息学报, 2025, 47(1): 66–74. DOI: 10.11999/JEIT240083
- [60] You L, Xiong J Y, Ng D W K, et al. Energy efficiency and spectral efficiency tradeoff in RIS-aided multiuser MIMO uplink transmission [J]. IEEE transactions on signal processing, 2021, 69: 1407–1421. DOI: 10.1109/TSP.2020.3047474
- [61] 赵亚军. 基于智能超表面的6G近场网络构建 [J]. 移动通信, 2024, 48(4): 1–11

作者简介



廖勇, 重庆大学微电子与通信工程学院副研究员; 主要研究方向为智能信号与信息处理、数字技术及其应用; 主持国家级和省部级项目10余项; 发表论文150余篇。



韦东卫, 重庆大学微电子与通信工程学院在读本科生; 主要研究方向为智能信号与信息处理。