



## 智能反射面辅助通信感知一体化系统联合资源分配方法

赵琳, 崔闻, 程建华

引用本文:

赵琳, 崔闻, 程建华. 智能反射面辅助通信感知一体化系统联合资源分配方法[J]. 智能系统学报, 2026, 21(5): 1300-1312.

ZHAO Lin, CUI Wen, CHENG Jianhua. Joint resource allocation method for IRS-assisted integrated sensing and communication system[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2026, 21(5): 1300-1312.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202601028>

## 您可能感兴趣的其他文章

### 面向动用计划的车辆装备备件预测研究

Vehicle maintenance spare-part prediction for equipment use plan

智能系统学报. 2021, 16(6): 1064-1072 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202012026>

### 融合分区和局部搜索的多模态多目标优化

Multimodal multi-objective optimization combining zoning and local search

智能系统学报. 2021, 16(4): 774-784 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202010026>

### 目标空间映射策略的高维多目标粒子群优化算法

Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on an objective space papping strategy

智能系统学报. 2021, 16(2): 362-370 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202006042>

### 面向环境探测的多智能体自组织目标搜索算法

Self-organizing target search algorithm of multi-agent system for envi-ronment detection

智能系统学报. 2020, 15(2): 289-295 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201908023>

### 改进萤火虫优化算法的Renyi熵油污图像分割

Renyi entropy based on improved firefly optimization algorithm for image segmentation of waste oil

智能系统学报. 2020, 15(2): 367-373 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201809002>

### 基于GABP-KF的WSN数据漂移盲校准算法

GABP-KF-based blind calibration algorithm of data drift in wireless sensor networks

智能系统学报. 2019, 14(2): 254-262 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201712003>

DOI: 10.11992/tis.202601028

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1538.TP.20260707.0937.004>

# 智能反射面辅助通信感知一体化系统 联合资源分配方法

赵琳, 崔闻, 程建华

(哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 在通信感知一体化 (integrated sensing and communication, ISAC) 系统中, 研究人员一直希望能够同时实现高频谱效率和低能量消耗。对于 ISAC 系统, 为了提高能量效率, 本文引入智能反射面 (intelligent reflecting surface, IRS) 技术。为了平衡 IRS 辅助 ISAC 系统的传输速率和能量消耗, 通过联合优化 ISAC 基站处发射波束成形和 IRS 处反射波束成形, 本文提出一种 IRS 辅助 ISAC 系统联合资源分配方法。本文提出全新的膜量子蛭螂优化算法 (membrane-inspired quantum dung beetle optimizer algorithm, MQDBO), 以获取最优联合资源分配方法。为了对本文所提出的全新方法进行评估, 通过仿真实验有效验证了该方法在平衡传输速率和能量消耗方面的优越性和有效性。对于 IRS 辅助 ISAC 系统, 这种全新方法显著提高了总速率和能量效率。针对不同仿真场景, 本文提出的基于 MQDBO 的联合资源分配方法可以实现最优的总速率和能量效率, 在无线通信领域中具有广阔应用前景。

**关键词:** 通信感知一体化系统; 智能反射面; 总速率; 能量效率; 膜量子蛭螂优化算法; 量子计算; 膜计算; 波束成形  
**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2026)05-1300-13

中文引用格式: 赵琳, 崔闻, 程建华. 智能反射面辅助通信感知一体化系统联合资源分配方法 [J]. 智能系统学报, 2026, 21(5): 1300-1312.

英文引用格式: ZHAO Lin, CUI Wen, CHENG Jianhua. Joint resource allocation method for IRS-assisted integrated sensing and communication system[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2026, 21(5): 1300-1312.

## Joint resource allocation method for IRS-assisted integrated sensing and communication system

ZHAO Lin, CUI Wen, CHENG Jianhua

(College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In integrated sensing and communication (ISAC) system, there are conflicting requirements that are low energy consumption and high spectral efficiency (SE). For ISAC system, aiming at improving energy efficiency (EE), we have introduced intelligent reflecting surface (IRS) in this paper. Balancing the transmission rate and energy consumption for IRS-assisted ISAC system, when reflect beamforming at IRS and transmit beamforming at ISAC base station are jointly designed, we have proposed a joint resource allocation method for IRS-assisted ISAC system. In this paper, a novel membrane-inspired quantum dung beetle optimizer algorithm (MQDBO) has been proposed to obtain optimal joint resource allocation method. To evaluate our newly proposed scheme, superiority and effectiveness in balancing transmission rate and energy consumption are effectively verified through simulation results. For IRS-assisted ISAC system, this novel scheme significantly improves sum-rate and energy efficiency. For different simulation scenarios, the proposed joint resource allocation method based on MQDBO can achieve the highest sum-rate and energy efficiency and has application prospects in the domain of wireless communication.

**Keywords:** integrated sensing and communication system; intelligent reflecting surface; sum-rate; energy efficiency; membrane-inspired quantum dung beetle optimizer algorithm; quantum computing; membrane computing; beamforming

收稿日期: 2026-01-22. 网络出版日期: 2026-07-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62073093).

通信作者: 赵琳. E-mail: [zhaolin@hrbeu.edu.cn](mailto:zhaolin@hrbeu.edu.cn).

随着第六代 (6G) 移动通信技术的蓬勃发展, 许多创新应用, 如人机交互、数字孪生、虚拟现实

和增强现实应运而生<sup>[1]</sup>。为了支持这些创新应用, 需要环境感知和无线通信之间密切合作, 环境感知和无线通信在罕见的协调和互惠互利中同时发展<sup>[2-3]</sup>。最近, 由于二者在系统架构和信号处理方法上的共性, 这两个独立功能系统的深入融合引起了研究人员的广泛关注, 从而产生了通信感知一体化 (integrated sensing and communication, ISAC) 系统<sup>[4]</sup>。在 ISAC 系统中, 通信子系统与雷达子系统共享频谱, 以解决频谱日益稀缺的问题<sup>[5]</sup>。

目前无线通信研究界已经开始广泛关注智能反射面 (intelligent reflecting surface, IRS) 技术。IRS 可以建立类似于协作中继系统的额外无线链路, 目前具有有源射频组件的主动智能反射面蓬勃发展<sup>[6]</sup>。在 IRS 的最新研究成果中, 为了通过丰富的无线传感应用和协同低成本 IRS 来经济有效地提高无线传感器性能, 研究人员提出了一种全新的 IRS 辅助传感范式<sup>[7]</sup>。为了提供替代通信路径来辅助车辆通信, 研究人员引入 IRS, 通过动态调整 IRS 相移, 可以显著提高车辆边缘计算系统性能<sup>[8]</sup>。对于接收器, 研究人员提出一种全新的盲波束成形策略, 该策略使用没有信道状态信息的 IRS, 旨在提高信噪比<sup>[9]</sup>。研究人员提出了一种新型 IRS 辅助无人机通信框架, 其中配备 IRS 的无人机灵活地为多个用户提供服务, 以确保在多用户接入场景中有效利用频谱资源并保证通信安全<sup>[10]</sup>。

支持 ISAC 的物联网设备超越了传统无线传感器网络的局限性, 将物联网节点的信号处理方法与物理层技术紧密耦合, 然而, 目前 ISAC 系统仍然存在许多挑战。在存在窃听者的情况下, 多个 ISAC 发射机协作向多个通信用户发送机密信息, 并同时执行目标检测。窃听者的目的是拦截机密信息并窃取目标信息。在存在窃听者和机密信息的情况下, 研究人员提出一种全新策略来确保环境感知系统和无线通信系统安全<sup>[11]</sup>。在 6G 无线通信系统背景下, 无人机支持 ISAC 系统引起了研究人员的广泛关注, 其中无人机被用作空中无线平台, 以提供增强通信服务<sup>[12]</sup>。

ISAC 可以实现更高的能量效率、频谱效率和经济效益。同时, 由于能够以节能的方式智能地操控无线传输环境, IRS 技术被认为是一种有前景的无线通信技术。在无线通信系统中部署 IRS 的优势已经得到很好的证实, 但对雷达系统, 特别是 ISAC 系统, 部署 IRS 的研究刚刚开始。研究人员使用 IRS 来增强 ISAC 系统物理层安全性, 其中部署 IRS 不仅为目标检测创建一个虚拟

视线链路, 同时提升多用户下行链路通信性能<sup>[13]</sup>。此外, 研究人员还为 IRS 辅助 ISAC 系统提出一种全新的物理层安全框架, 在存在窃听者的情况下, 多天线基站为多用户提供通信服务<sup>[14]</sup>。研究人员提出一种新型 IRS 辅助 ISAC 系统框架, 该框架旨在提高传感精度并减少传感过程中的衰减, 其传感单元嵌入 IRS 中<sup>[15]</sup>。对于 ISAC 系统, 本文引入 IRS, 旨在平衡传输速率和能量消耗, ISAC 与 IRS 的有机融合对促进绿色通信的发展具有重要意义与价值。本文提出 ISAC 基站传输波束成形和 IRS 反射波束成形联合设计时总速率和能量效率优化问题, 然而, 由于优化变量的非凸性和耦合性, 上述优化问题很难解决。为了平衡 IRS 辅助 ISAC 系统的传输速率和能量消耗, 本文在联合设计 ISAC 基站传输波束成形和 IRS 反射波束成形的基础上提出了一种全新的基于膜量子蛭螂优化算法的联合资源分配方法。

本文贡献如下:

1) 针对 ISAC 系统, 本文引入 IRS 技术, 旨在提高总速率和能量效率。在 IRS 辅助 ISAC 系统中, 包含  $M$  根天线的 ISAC 基站为  $K$  个单天线用户提供服务, IRS 由  $N$  个反射单元组成。为了平衡传输速率和能量消耗, 本文对 ISAC 基站传输波束成形和 IRS 反射波束成形联合设计时总速率和能量效率优化问题进行研究。

2) 为了获取上述非凸优化问题的最优解, 从膜结构和量子计算角度出发, 本文提出全新的膜量子蛭螂优化算法。该算法通过独特设计的量子旋转角更新量子位置, 从而实现更好的收敛性能。

3) 对于 IRS 辅助 ISAC 系统, 基于膜量子蛭螂优化算法, 本文提出联合资源分配方法, 从而解决了总速率和能量效率优化问题, 为解决工程应用中的非凸优化问题提供了初步尝试。通过实验数据, 可以看到本文所提出的联合资源分配方法在解决工程应用优化问题方面表现优异。通过充分运用联合资源分配方法在处理复杂工程应用问题方面的优势, 该方法可以应用在更广泛的工程实践环境中。

## 1 IRS 辅助 ISAC 系统模型

### 1.1 信道模型

本文介绍一种 IRS 辅助 ISAC 系统, 其中包含  $M$  根天线的 ISAC 基站为  $K$  个单天线用户提供服务, 并部署了一个具备  $N$  个反射单元的 IRS, 其中对角相移表示为  $\boldsymbol{\theta} = \text{diag}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N)$ 。IRS 辅助 ISAC 系统架构如图 1 所示。

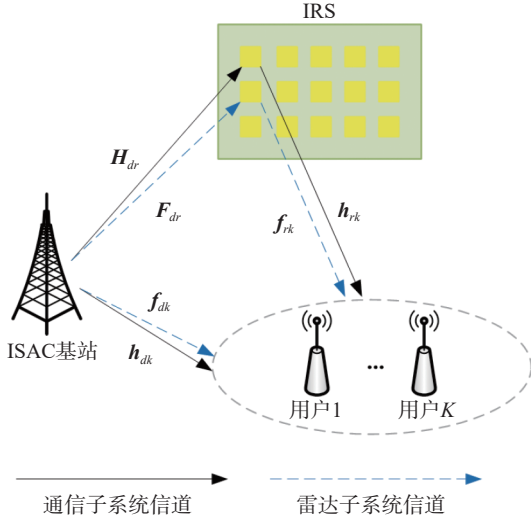


图 1 IRS 辅助 ISAC 系统架构

Fig. 1 Architecture of IRS-assisted ISAC system

第  $k$  个用户和通信子系统之间、第  $k$  个用户和 IRS 之间以及通信子系统和 IRS 之间，信道分别表示为  $\mathbf{h}_{dk} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 、 $\mathbf{h}_{rk} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  和  $\mathbf{H}_{dr} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ ，并将上述通道建模为

$$\mathbf{h}_{dk} = \sum_{\xi=0}^{N_p} v^{\xi} \chi_B^{\xi}(\theta_{dk}^{\xi})$$

$$\mathbf{h}_{rk} = \sum_{\xi=0}^{N_p} v^{\xi} \chi_{rk}^{\xi}(\theta_{rk}^{\xi})$$

$$\mathbf{H}_{dr} = \sum_{\xi=0}^{N_p} v^{\xi} \chi_l^{\xi}(\theta_l^{\xi}, \delta_l^{\xi}) \chi_B^{\xi}(\theta_B^{\xi})$$

式中： $v^{\xi}$  为第  $\xi$  个路径增益，并且  $\xi \in [0, N_p]$  中  $N_p$  为非视线路径数量， $\chi_B^{\xi}(\theta^{\xi})$  为 ISAC 基站阵列响应， $\chi_l^{\xi}(\theta^{\xi}, \delta^{\xi})$  和  $\chi_{rk}^{\xi}(\theta^{\xi})$  为 IRS 阵列响应， $\delta^{\xi}$  和  $\theta^{\xi}$  为仰角和方位角<sup>[16]</sup>。

第  $k$  个用户和雷达子系统之间、第  $k$  个用户和 IRS 之间以及雷达子系统和 IRS 之间，信道建模为

$$\mathbf{f}_{dk} = \sum_{\xi=0}^{N_p} v^{\xi} \chi_R^{\xi}(\theta_{dk}^{\xi})$$

$$\mathbf{f}_{rk} = \sum_{\xi=0}^{N_p} v^{\xi} \chi_{rk}^{\xi}(\theta_{rk}^{\xi})$$

$$\mathbf{F}_{dr} = \sum_{\xi=0}^{N_p} v^{\xi} \chi_l^{\xi}(\theta_l^{\xi}, \delta_l^{\xi}) \chi_R^{\xi}(\theta_R^{\xi})$$

其中  $\chi_R^{\xi}(\theta^{\xi})$  为雷达子系统的阵列响应。

本文中的通信子系统和雷达子系统是指同一基站上的不同功能模块，它们基于相同的物理信道，服务于不同目的。目前关于智能反射面的研究大多考虑每个反射单元处为连续相移，然而，

这在实践中实施成本高昂，由于硬件限制，实际中很难实现连续相移。采用离散相移，移相器位数越高，系统鲁棒性越好，可以更接近真实场景。但是随着移相器位数的增加，能量消耗、硬件成本将呈指数级别增长。当智能反射面因硬件限制采用离散相移时，离散相移与连续相移的性能损失与移相器的位数有关，移相器位数越高，性能损失越小，当移相器位数趋近于无穷时，离散相移无限趋近于连续相移，性能损失基本为零。

在无线信道中，一些信道分量，如阴影衰落、延迟扩展和方位扩展，在空间上是相关的，因此它们对两个相邻用户的值是相似的。 $h_x$  表示信道分量值， $\mu_x$  和  $\sigma_x$  为其均值和方差，得到具备零均值和单位方差的高斯随机变量

$$x = \frac{h_x - \mu_x}{\sigma_x}$$

通过高斯随机变量  $x$  量化空间相关性。 $x_C$  和  $x_R$  分别为 IRS 辅助 ISAC 系统中通信子系统和雷达子系统的空间相关性变量，它们之间的距离为  $d_{CR}$ 。 $x_C$  和  $x_R$  之间协方差为

$$\chi(d_{CR}) = e^{-\frac{d_{CR}}{d_r}}$$

式中  $d_r$  为参考距离。

## 1.2 总速率模型

本文使用多输入多输出 (multiple-input-multiple-output, MIMO) 雷达来实现传感目的。该 MIMO 雷达具有更高的波形分集和自由度，可发射多个检测信号<sup>[17]</sup>。空间波束模式通过雷达信号协方差矩阵表示

$$\mathbf{R} = \frac{1}{J} \sum_{t=1}^J \mathbf{r}_t \mathbf{r}_t^H$$

式中： $\mathbf{r}_t \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  为雷达信号第  $t$  个快拍向量， $J$  为快拍总数。下面定义阵列导向矢量

$$\boldsymbol{\rho}(\theta) = \left[ 1, e^{\frac{j2\pi\tau}{\kappa} \sin\theta}, \dots, e^{\frac{j2\pi\tau(M-1)}{\kappa} \sin\theta} \right]^H$$

式中： $\kappa$  为相邻天线单元之间的波长， $\tau$  为部署间距。发射波束成形<sup>[18]</sup> 定义为

$$P_t(\theta) = \boldsymbol{\rho}^H(\theta) \mathbf{R} \boldsymbol{\rho}(\theta)$$

对于第  $k$  个用户，接收信号为

$$x_k = (\mathbf{h}_{rk}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{dr} + \mathbf{h}_{dk}^H) \mathbf{w}_k s_k +$$

$$(\mathbf{h}_{rk}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{dr} + \mathbf{h}_{dk}^H) \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{w}_j s_j +$$

$$(\mathbf{f}_{rk}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{F}_{dr} + \mathbf{f}_{dk}^H) \mathbf{r}_t + n_k$$

式中： $s_k$  为传输符号， $\mathbf{w}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  为发射波束成形向量， $n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_k^2)$  为接收噪声。

第  $k$  个用户的信号与干扰加噪声比为

$$\gamma_k = \frac{|\bar{\mathbf{h}}_k \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K |\bar{\mathbf{h}}_k \mathbf{w}_j|^2 + |\bar{\mathbf{f}}_k \mathbf{r}_t|^2 + \sigma_k^2}$$

式中:  $\bar{\mathbf{h}}_k = \mathbf{h}_{rk}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{dr} + \mathbf{h}_{dk}^H$ ,  $\bar{\mathbf{f}}_k = \mathbf{f}_{rk}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{F}_{dr} + \mathbf{f}_{dk}^H$ 。总速率为

$$R_b = \sum_{k=1}^K \log(1 + \gamma_k)$$

对于通信用户来说, 为了提高传输速率并抑制雷达系统对通信造成的干扰, 对于 ISAC 基站发射波束成形向量和 IRS 反射波束成形向量进行联合资源分配, 总速率优化问题归纳为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{w}_k, \boldsymbol{\Theta}} \sum_{k=1}^K \log(1 + \gamma_k) \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k \leq P_C \end{aligned}$$

$$|\delta_n| = 1, n = 1, 2, \dots, N$$

式中  $P_C$  为通信子系统基站发射功率预算。

### 1.3 能量效率模型

从整个系统层面考虑, 低能量消耗和高频谱效率是 IRS 辅助 ISAC 系统相互冲突的需求, 下面考虑如何提高 IRS 辅助 ISAC 系统的能量效率。对于整个系统, 总功耗为

$$P = \mu \|\mathbf{W}\|^2 + P_S + NP_P + KP_U$$

式中:  $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_K] \in \mathbb{C}^{M \times K}$ ,  $\mu$  为 ISAC 基站能量转换系数,  $P_S$  为静态硬件功耗,  $P_P$  为 IRS 相位调节器硬件功耗,  $P_U$  为用户静态硬件功耗。

系统能量效率<sup>[19]</sup>为

$$\eta = \frac{R_b}{P}$$

当 IRS 的反射波束成形和 ISAC 基站的发射波束成形联合设计时, 整个系统能量效率优化问题归纳如下

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{w}_k, \boldsymbol{\Theta}} \frac{R_b}{P} \\ & \text{s.t.} \quad P_S \leq P_S^{\max} \\ & \quad P_P \leq P_P^{\max} \\ & \quad P_U \leq P_U^{\max} \end{aligned}$$

$$|\delta_n| = 1, n = 1, 2, \dots, N$$

式中  $P_S^{\max}$ 、 $P_P^{\max}$  和  $P_U^{\max}$  为 ISAC 基站、IRS 和用户的最大硬件功耗。本文所用到的符号及其相应的描述如表 1 所示。

表 1 符号与描述

Table 1 Notations and descriptions

| 符号                    | 描述                   |
|-----------------------|----------------------|
| $\mathbf{w}_k$        | 发射波束成形向量             |
| $\boldsymbol{\Theta}$ | 对角相移                 |
| $P_C$                 | 通信子系统发射功率预算          |
| $P_S^{\max}$          | ISAC 基站最大硬件功耗        |
| $P_P^{\max}$          | IRS 最大硬件功耗           |
| $P_U^{\max}$          | 用户最大硬件功耗             |
| $\mathbf{h}_{dk}$     | 第 $k$ 个用户与通信子系统之间的信道 |
| $\mathbf{h}_{rk}$     | 第 $k$ 个用户与智能反射面之间的信道 |
| $\mathbf{H}_{dr}$     | 通信子系统与智能反射面之间的通道     |
| $\mathbf{f}_{dk}$     | 第 $k$ 个用户与雷达子系统之间的信道 |
| $\mathbf{f}_{rk}$     | 第 $k$ 个用户与智能反射面之间的信道 |
| $\mathbf{F}_{dr}$     | 雷达子系统与智能反射面之间的通道     |
| $\mathbf{R}$          | 雷达信号协方差矩阵            |
| $\mathbf{r}_t$        | 雷达信号第 $t$ 个快拍向量      |

## 2 基于膜量子蛭螂优化算法的联合资源分配方法

本文所提出 ISAC 基站传输波束成形和 IRS 反射波束成形联合设计时总速率和能量效率优化问题, 由于优化变量的非凸性, 该优化问题很难解决。IRS 辅助 ISAC 系统的波束成形问题具备两个自变量, 分别为发射波束成形向量  $\mathbf{w}_k$  和对角相移  $\boldsymbol{\Theta}$ , 上述两个自变量需协同优化以取得最优总速率和能量效率。本节基于膜结构和量子计算, 提出全新的膜量子蛭螂优化算法 (membrane-inspired quantum dung beetle optimizer algorithm, MQDBO) 来解决上述问题。采用膜量子蛭螂优化算法, 在每次演化迭代过程中同时优化  $\mathbf{w}_k$  和  $\boldsymbol{\Theta}$  两个自变量, 算法搜索效率高, 额外开销小。

量子计算本质特征是量子叠加和量子相干性。量子计算具有指数级计算能力、更好的优化和解决问题能力、并行计算等优势<sup>[20]</sup>。膜结构作为细胞启发系统框架, 膜计算具有离散性、分布性、模块化和可扩展等特点<sup>[21]</sup>。不同于已有量子启发式算法, 本文充分运用量子相干性, 运用量子旋转的方式更新量子位置, 从而产生全新的演化策略, 因此具有探索成本低、收敛速度快、收敛精度高、并行搜索和全局优化能力等优点。膜结构由多个细胞状膜组成, 其中符号或物体放置在膜内, 同一区域中符号之间的交互由该区域的一组演化规则定义, 物体可以进入或离开膜, 从而改变膜结构。本文充分运用膜结构特点, 使得个

体之间可以进行更深入的沟通交流,从而可以迅速跳出局部最优解。在每个膜中,每个个体充分运用量子相干性,运用量子旋转的方式更新量子位置,从而产生全新的演化策略。

## 2.1 膜量子蛭螂优化算法

受细胞结构启发,膜系统是一种分布式并行计算方法。 $[_0[_1[_3[_4[_4]_1[_2[_5[_5[_6]_6]_2[_7]_7]_0]$ 表示膜结构,如图2所示<sup>[22]</sup>。每个膜定义一定区域,如果内部没有膜,则该膜称为基础膜。对于膜结构,每个隔室由一个特定区域组成,该区域可能包含多组物体或其他膜,并具有一套通信和转换规则<sup>[23]</sup>。

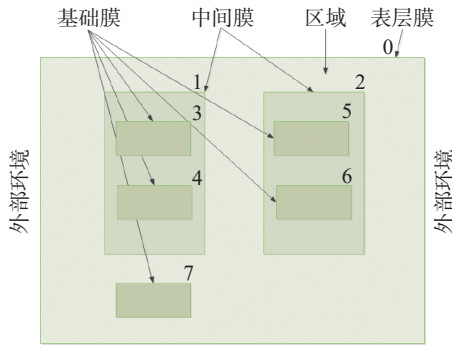


图2 膜结构示意图

Fig. 2 Schematic of membrane structure

本文提出了一种使用通信和转换规则的膜系统,对于膜系统,其构造表示为<sup>[24]</sup>

$$\Pi = (V, Q, u_0, u_1, \dots, u_m, T_0, T_1, \dots, T_m, i_0)$$

式中

1)  $(m+1)$  个膜包含在膜结构中,其中  $(m+1)$  为膜系统  $\Pi$  的度数;

2) 在膜结构的第  $z$  个区域,  $u_z$  表示包含对象的多重集,其中  $0 \leq z \leq m$ ;

3) 在膜结构的第  $z$  个区域,  $T_z$  表示进化规则的有限集,其中  $0 \leq z \leq m$ ;

4)  $V$  表示字母表,其元素由对象构成;

5)  $Q \subseteq V$  表示输出字母表;

6)  $i_0$  为膜系统  $\Pi$  的输出膜序号。

首先随机初始化膜量子蛭螂的量子位置

$$o_{id}^0 = L_b + r_{id}^0 \times (U_b - L_b)$$

式中  $U_b$  和  $L_b$  为最大和最小位置,  $d=1, 2, \dots, D, i=1, 2, \dots, L, r_{id}^0$  是  $[0, 1]$  中均匀分布的随机数。

首先采取全局探索策略,在  $[0, 1]$  域中随机产生  $r_b$ , 如果  $r_b < p_1$ , 更新第  $i$  只膜量子蛭螂的第  $d$  维量子旋转角

$$\vartheta_{id}^{\varepsilon+1} = \omega_1 \times g \times o_{id}^{\varepsilon-1} + \omega_2 \times (o_{id}^{\varepsilon} - o_{wd}^{\varepsilon})$$

式中  $o_i^{\varepsilon} = [o_{i1}^{\varepsilon}, o_{i2}^{\varepsilon}, \dots, o_{id}^{\varepsilon}]$  为第  $i$  只膜量子蛭螂的量子位置,  $o_w^{\varepsilon} = [o_{w1}^{\varepsilon}, o_{w2}^{\varepsilon}, \dots, o_{wD}^{\varepsilon}]$  为全局最差量子位置,  $\omega_1$  为自然系数,其值可能取 1 或 -1,  $\omega_2$  是 0 到

1 之间的常数值,  $g$  是  $(0, 0.2]$  中的常值,  $p_1$  是阈值,其取值在 0 到 1 之间。

对于第  $i$  只膜量子蛭螂,更新其第  $d$  维量子位置

$$o_{id}^{\varepsilon+1} = \left| o_{id}^{\varepsilon} \times \cos(\vartheta_{id}^{\varepsilon+1}) + \sqrt{1 - (o_{id}^{\varepsilon})^2} \times \sin(\vartheta_{id}^{\varepsilon+1}) \right| \quad (1)$$

如果  $r_b \geq p_1$ , 对于第  $i$  只膜量子蛭螂,量子旋转角更新为

$$\varphi_{id}^{\varepsilon+1} = \tan(\varsigma) |o_{id}^{\varepsilon} - o_{id}^{\varepsilon-1}|$$

式中  $\varsigma$  是偏转角度,取值在  $[0, \pi]$  之间。

对于第  $i$  只膜量子蛭螂,更新其第  $d$  维量子位置:

$$o_{id}^{\varepsilon+1} = \left| o_{id}^{\varepsilon} \times \cos(\varphi_{id}^{\varepsilon+1}) + \sqrt{1 - (o_{id}^{\varepsilon})^2} \times \sin(\varphi_{id}^{\varepsilon+1}) \right| \quad (2)$$

接下来采取全局开发策略,将第  $i$  只膜量子蛭螂的量子旋转角更新为

$$\psi_{id}^{\varepsilon+1} = \omega_3 \times (o_{id}^{\varepsilon} - \bar{L}_b) + \omega_4 \times (o_{id}^{\varepsilon} - \bar{U}_b)$$

式中  $\omega_3$  和  $\omega_4$  是随机值,  $\bar{U}_b$  和  $\bar{L}_b$  更新

$$\bar{U}_b = \min(o_{id}^{\varepsilon} \times (1 + S), U_b)$$

$$\bar{L}_b = \max(o_{id}^{\varepsilon} \times (1 - S), L_b)$$

式中局部最佳量子位置为  $o_i^{\varepsilon} = [o_{i1}^{\varepsilon}, o_{i2}^{\varepsilon}, \dots, o_{id}^{\varepsilon}]$ , 并且  $S = 1 - \frac{\varepsilon}{E}$ , 其中  $E$  为最大迭代次数。对于第  $i$  只膜量子蛭螂,更新其第  $d$  维量子位置

$$o_{id}^{\varepsilon+1} = \left| o_{id}^{\varepsilon} \times \cos(\psi_{id}^{\varepsilon+1}) + \sqrt{1 - (o_{id}^{\varepsilon})^2} \times \sin(\psi_{id}^{\varepsilon+1}) \right| \quad (3)$$

接下来采取局部搜索策略,对于第  $i$  只膜量子蛭螂,更新其量子旋转角

$$\zeta_{id}^{\varepsilon+1} = \omega_5 \times (o_{id}^{\varepsilon} - \hat{L}_b) + \omega_6 \times (o_{id}^{\varepsilon} - \hat{U}_b)$$

式中  $\omega_5$  是服从正态分布的随机数,  $\omega_6$  是分布在 0 到 1 之间的随机值,  $\hat{U}_b$  和  $\hat{L}_b$  更新

$$\hat{U}_b = \min(o_{bd}^{\varepsilon} \times (1 + S), U_b)$$

$$\hat{L}_b = \max(o_{bd}^{\varepsilon} \times (1 - S), L_b)$$

其中  $o_b^{\varepsilon} = [o_{b1}^{\varepsilon}, o_{b2}^{\varepsilon}, \dots, o_{bD}^{\varepsilon}]$  为全局最佳量子位置。

更新其第  $d$  维量子位置

$$o_{id}^{\varepsilon+1} = \left| o_{id}^{\varepsilon} \times \cos(\zeta_{id}^{\varepsilon+1}) + \sqrt{1 - (o_{id}^{\varepsilon})^2} \times \sin(\zeta_{id}^{\varepsilon+1}) \right| \quad (4)$$

最后采取局部开发策略,对于第  $i$  只膜量子蛭螂,更新其第  $d$  维量子位置:

$$o_{id}^{\varepsilon+1} = o_{bd}^{\varepsilon} + \varpi \times v \times (|o_{id}^{\varepsilon} - o_{id}^{\varepsilon}| + |o_{id}^{\varepsilon} - o_{bd}^{\varepsilon}|) \quad (5)$$

式中:  $\varpi$  是常数值,  $v$  是遵循正态分布的随机数。

膜量子蛭螂优化算法能够解决复杂高维工程优化问题,可以用于解决 IRS 辅助 ISAC 系统总速率和能量效率优化问题。

## 2.2 膜量子蛭螂优化算法收敛性能分析

$X \subset \mathbf{R}^D$  表示对于  $X$ , 实数集合  $\mathbf{R}^D$  成其元素。 $f$  表示连续优化问题的目标函数,  $\max f: X \subset \mathbf{R}^D$  表示上述优化问题。收敛性能分析前先决条件如下:

1) 在可行域内,  $f$  的最大值为  $f^*$ , 全局最优值为定值;

2)  $\ell(\cdot)$  为勒贝格测度, 其满足  $\ell(X) > 0$ ;

3)  $I(\iota) = \{\mathbf{o} \in X, f(\mathbf{o}) \geq f^* - \iota\}$ , 对于  $\forall \iota > 0$ , 满足  $\ell(I(\iota)) > 0$ ;

4)  $f$  的最小和最大值分别为  $f_{\min}$  和  $f_{\max}$ , 对于  $\forall \mathbf{o} \in X, 0 < f_{\min} \leq f(\mathbf{o}) < f_{\max} < \infty$ 。

**定理 1** 对于  $\forall \iota > 0$ , 将概率表示为

$$P(\mathbf{o}^\varepsilon \in I(\iota)) \geq \partial(\varepsilon) > 0$$

式中  $P(\cdot)$  为  $(\cdot)$  发生的概率; 如果  $\sum_{\varepsilon=1}^{\infty} \partial(\varepsilon)$  发散, 则算法的解收敛到全局最优解, 其中  $\partial(\varepsilon)$  取值与迭代次数  $\varepsilon$  对应。

**证明** 当第  $\varepsilon$  代生成的量子位置在  $I(\iota)$  外部时, 其概率为

$$P_n(\varepsilon) = \prod_{\bar{\varepsilon}=1}^{\varepsilon} P_n^{\bar{\varepsilon}}(\mathbf{o}^{\bar{\varepsilon}} \notin I(\iota)) \leq \prod_{\bar{\varepsilon}=1}^{\varepsilon} (1 - \partial(\bar{\varepsilon}))$$

由于已经选取最佳量子位置, 通过精英保留策略, 量子位置可能会进入  $I(\iota)$  内部。对于  $\forall \iota > 0$

$$P(f^* - f_{\max}^\varepsilon > \iota) \leq P_n(\varepsilon)$$

其中对于目标函数,  $f_{\max}^\varepsilon$  为第  $\varepsilon$  代最大值。当  $\varepsilon$  趋近无穷大时, 可以得到

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} P_n(\varepsilon) = \prod_{\varepsilon=1}^{\infty} (1 - \partial(\varepsilon)) = 0$$

根据统计学理论, 如果  $\prod_{\varepsilon=1}^{\infty} (1 - \partial(\varepsilon)) = 0$ , 则  $\prod_{\varepsilon=1}^{\infty} (1 - \partial(\varepsilon)) = 0$  发散, 进而得到

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} P(f^* - f_{\max}^\varepsilon > \iota) = 0$$

并且  $\sum_{\varepsilon=1}^{\infty} \partial(\varepsilon)$  发散。

为了解决优化问题, MQDBO 算法更新膜量子蛭螂的量子位置。根据线性映射规则, 新生成的量子位置服从均匀分布  $U(o_d^{\min}, o_d^{\max})$ , 其概率密度为

$$f_u(\mathbf{o}) = \begin{cases} \frac{1}{\prod_{d=1}^D (o_d^{\max} - o_d^{\min})}, & \mathbf{o} \in X \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

通过更新量子旋转角, 量子位置逐步逼近并最终移动到最佳量子位置。当量子位置在  $I(\iota)$  内部时, 概率表示为

$$P(\{\mathbf{o} \in I(\iota)\}) \geq \int_{I(\iota)} f_u(\mathbf{o}) d\mathbf{o} = \frac{\ell(I(\iota))}{\prod_{d=1}^D (o_d^{\max} - o_d^{\min})} > 0$$

MQDBO 算法在经过足够数量的迭代次数后收敛到全局最优解。综上所述, 根据定理 1, 膜量子蛭螂优化算法收敛。

## 2.3 基于膜量子蛭螂优化算法的联合资源分配方法

当联合设计 ISAC 基站处发射波束成形和 IRS 处反射波束成形时, 基于 MQDBO 算法的联合资源分配方法可以最大限度地提高总速率和能量效率。

对于第  $i$  只膜量子蛭螂, 在第  $\varepsilon$  次迭代中, 总速率最大化问题的适应度函数为

$$f(\mathbf{o}_i^\varepsilon) = \begin{cases} \sum_{k=1}^K \log(1 + \gamma_k), & \text{满足约束条件} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

对于第  $i$  只膜量子蛭螂, 在第  $\varepsilon$  次迭代中, 能量效率最大化问题的适应度函数为

$$f(\mathbf{o}_i^\varepsilon) = \begin{cases} \frac{R_b}{P}, & \text{满足约束条件} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

具体的基于膜量子蛭螂优化算法的联合资源分配方法如算法 1 所示。

**算法 1** 基于膜量子蛭螂优化算法的联合资源分配方法

**输入** 智能反射面辅助通信感知一体化系统参数及膜量子蛭螂优化算法初始参数

**输出** 智能反射面辅助通信感知一体化系统联合资源分配方案

**初始化** 膜量子蛭螂种群规模  $L$ , 迭代次数  $\varepsilon = 1$

1) **while**  $\varepsilon < E$  ( $E$  为最大迭代次数)

2) **if** 采取全局探索策略

3) 在  $[0, 1]$  域中随机产生  $r_b$ , **if**  $r_b < p_1$ , 根据更新量子位置; 否则, 根据式 (2) 更新量子位置;

4) **elseif** 采取全局开发策略

5) 根据式 (3) 更新量子位置;

6) **elseif** 采取局部搜索策略

7) 根据式 (4) 更新量子位置;

8) **elseif** 采取局部开发策略

9) 根据式 (5) 更新量子位置;

10) **endif**

11) 对更新后的所有膜量子蛭螂的量子位置进行评估并得到全局最优解

12) 令  $\varepsilon = \varepsilon + 1$ ;

13) **endwhile**

14) 获取全局最优解, 得到智能反射面辅助通信感知一体化系统联合资源分配方案。

### 3 实验结果及分析

与传统优化方法相比,基于 MQDBO 的联合资源分配方法具有更优的收敛性能,对各种应用场景表现出显著适应性,从而可以解决复杂的工程优化问题。本节采用数学计算软件对 IRS 辅助 ISAC 系统波束成形优化问题在空间相关信道中的表现进行仿真实验,以验证所提方法的有效性。仿真实验所使用计算机配置如下: Intel(R) Core(TM) i7-14700 (2.10 GHz), 16 GB RAM, Microsoft Windows 11 操作系统。通信系统仿真参数如表 2 所示。

表 2 通信系统仿真参数  
Table 2 Parameters of communication system

| 参数              | 参数值 |
|-----------------|-----|
| 载波频率/GHz        | 5.8 |
| 莱斯 $K$ 因子/dB    | 10  |
| 路径损耗/dB         | 90  |
| 通信子系统发射功率预算/dBm | 30  |
| 噪声方差/dBm        | -60 |

对于全部参与对比的算法,种群规模设置为 50。仿真过程中,每个实验运行 100 次,仿真结果是 100 次的平均值。对于膜量子蛭螂优化算法和蛭螂优化算法,参数设置为  $g = 0.1$ ,  $\omega_2 = 0.3$ ,  $\varpi = 0.5$ ,  $p_1 = 0.9$ [25]。在量子粒子群算法中,两个加速度系数为 2,惯性权重从 0.9 线性减小到 0.4[26]。对于量子遗传算法,选择概率、突变概率和交叉概率分别设置为 50%、1% 和 70%[27]。在量子差分算法中,突变参数为 0.5,交叉参数为 0.3[28]。在海鸥优化算法中,控制参数从 2 变化到 0,  $f_c$  设置为 2[29]。上述算法参数与敏感度实验取得的最优结果相对应。

#### 3.1 总速率仿真性能分析

本小节将基于 MQDBO 的联合资源分配方法(仿真实验中记为 JRA-MQDBO)与其他优化框架进行比较,这些优化框架包括交替优化算法[30]、投影梯度和流形优化算法[31]、加权最小均方误差法[32]、半定松弛法[33]、量子粒子群优化算法[26]、量子遗传算法[27]、量子差分进化算法[28]、海鸥优化算法[29]和蛭螂优化算法[25],上述优化框架分别记作 JRA-QPSO、JRA-QGA、JRA-QDE、JRA-SOA 和 JRA-DBO,交替优化算法、投影梯度和流形优化算法、加权最小均方误差法和半定松弛法分别记作 AO、PGMO、WMMSE 和 SDR。

在本小节中,当  $M=4$ ,  $N=20$  时,对 IRS 辅助 ISAC 系统总速率模型进行仿真实验。在仿真过

程中,仿真实验运行 100 次,实验结果为 100 次实验取平均值的结果,仿真实验结果如图 3 所示。

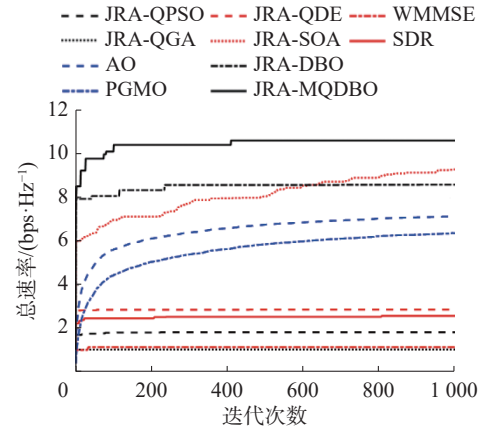


图 3 当  $M=4$ ,  $N=20$  时总速率随迭代次数变化仿真结果  
Fig. 3 Simulation result of sum-rate versus iteration number when  $M=4$ ,  $N=20$

当  $M$  从 3 变化到 10,  $N=20$  时, ISAC 基站天线数量对总速率的影响仿真结果如图 4 所示。当  $M$  从 3 变化到 10,  $N=40$  时,图 5 进一步给出了 ISAC 基站天线数量对总速率的影响。

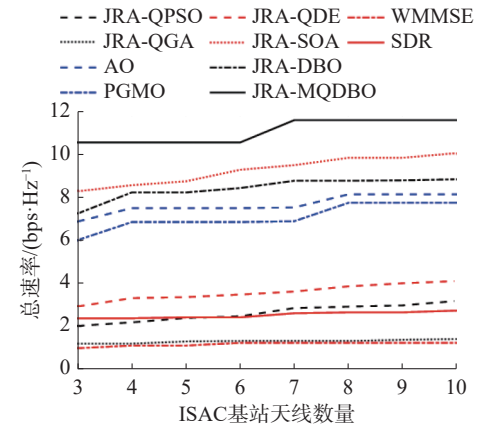


图 4 当  $M$  从 3 变化到 10,  $N=20$  时总速率优化仿真结果  
Fig. 4 Simulation result of sum-rate optimization when  $M=3$  to 10,  $N=20$

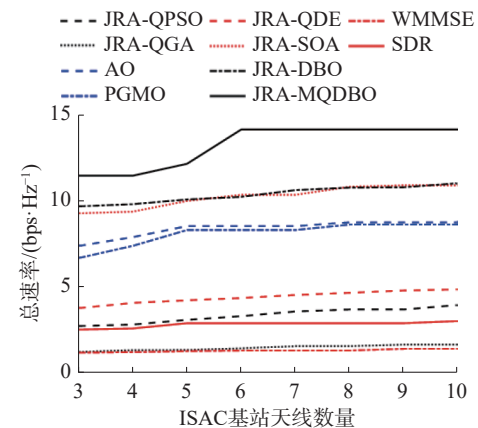


图 5 当  $M$  从 3 变化到 10,  $N=40$  时总速率优化仿真结果  
Fig. 5 Simulation result of sum-rate optimization when  $M=3$  to 10,  $N=40$

图 4 和图 5 仿真实验结果表明, 随着天线数量的增加, IRS 辅助 ISAC 系统总速率随之增加。经广泛验证, 多天线技术的使用已被证实可以提高数据传输总速率。对于 ISAC 基站, 通过采用适当的波束成形策略, 随着天线数量的增加, 总速率得到提高。

当  $M=4$ ,  $N$  从 10 变化到 80 时, 图 6 给出了 IRS 反射单元数量对总速率的影响。在图 7 中, 当  $M=8$ ,  $N$  从 10 变化到 80 时, 进一步探讨了另一场景中 IRS 反射单元数量对总速率的影响。

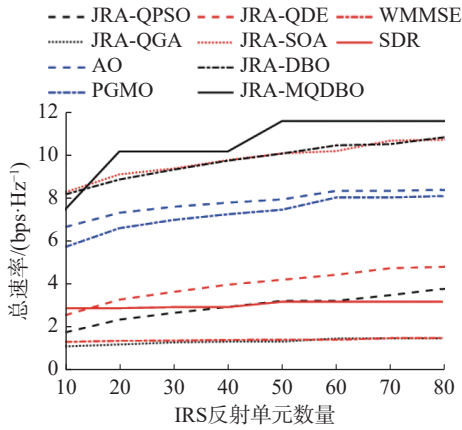


图 6 当  $M=4$ ,  $N$  从 10 变化到 80 时总速率优化仿真结果  
Fig. 6 Simulation result of sum-rate optimization when  $M=4$ ,  $N=10$  to 80

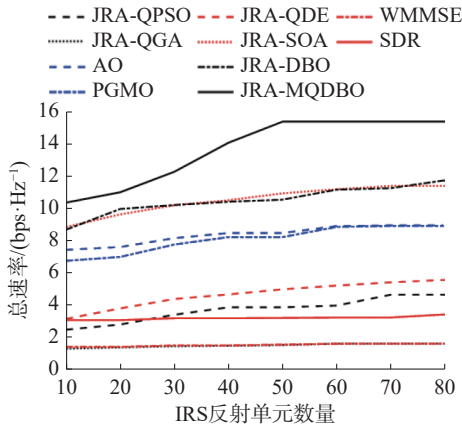


图 7 当  $M=8$ ,  $N$  从 10 变化到 80 时总速率优化仿真结果  
Fig. 7 Simulation result of sum-rate optimization when  $M=8$ ,  $N=10$  to 80

据观察, 随着 IRS 反射单元数量的增加, 总速率随之增加。原因是 ISAC 基站的发射波束成形和 IRS 的反射波束成形是联合设计的, 波束成形和信道可以更好地相互匹配。随着 IRS 反射单元数量的增加, 总速率随之增加, 这是因为通过引入具有更多数量反射单元的 IRS, 经智能反射面的反射信号得到增强, 从而增强信号接收。

接下来, 探讨  $M=4$ ,  $N=20$ ,  $P_c$  从 5 变化到 40 dBm

时, 总速率与通信子系统基站发射功率预算之间的关系, 仿真实验结果如图 8 所示。

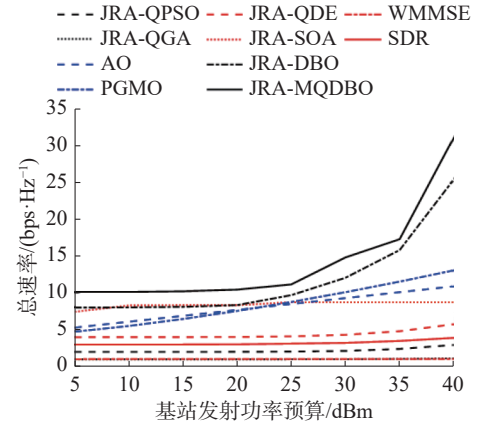


图 8 当  $M=4$ ,  $N=20$ ,  $P_c$  从 5 变化到 40 dBm 时总速率优化仿真结果  
Fig. 8 Simulation result of sum-rate optimization when  $M=4$ ,  $N=20$ ,  $P_c=5$  to 40 dBm

观察到随着通信子系统基站发射功率预算的增加, 总速率随之增加。通过优化智能反射面反射单元的相移, 提供了新的自由度来提高总速率, 因为智能反射面的直接信号和反射信号可以相长相加。

### 3.2 能量效率仿真性能分析

本小节将 JRA-MQDBO 优化框架与其他能量效率优化框架进行比较, 这些框架包括分别记作 JRA-QPSO、JRA-QGA、JRA-QDE、JRA-SOA、JRA-DBO、加权最小均方误差法、半定松弛法、梯度下降搜索算法<sup>[34]</sup>和顺序分数规划算法<sup>[34]</sup>, 其中梯度下降搜索算法和顺序分数规划算法分别记作 GDS 和 SFP。

当  $M=4$ ,  $N=20$  时, 保持与前一小节相同的仿真参数, 对 IRS 辅助 ISAC 系统能量效率模型仿真, 仿真实验结果如图 9 所示。

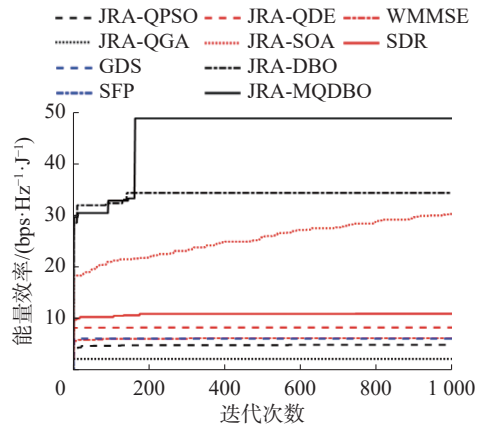


图 9 当  $M=4$ ,  $N=20$  时能量效率随迭代次数变化仿真结果  
Fig. 9 Simulation result of energy efficiency versus iteration number when  $M=4$ ,  $N=20$

图 10 给出了当  $M$  从 3 变化到 10,  $N=20$  时, 能量效率与 ISAC 系统基站天线数量的关系。进一步地, 当  $M$  从 3 变化到 10,  $N=40$  时, 对本文所提出能量效率模型进行仿真实验, 结果如图 11 所示。从仿真实验结果可以看出, 对于 IRS 辅助 ISAC 系统, 随着天线数量的增加, 能量效率随之增加。

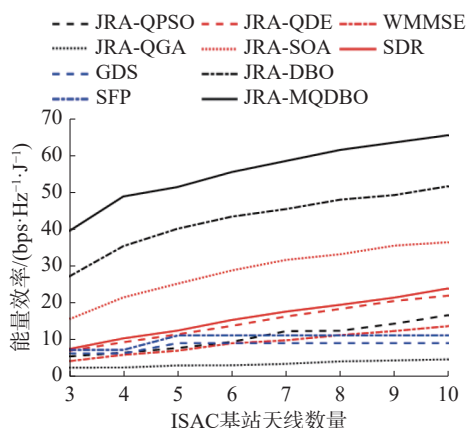


图 10 当  $M$  从 3 变化到 10,  $N=20$  时能量效率优化仿真结果

Fig. 10 Simulation result of energy efficiency optimization when  $M=3$  to 10,  $N=20$

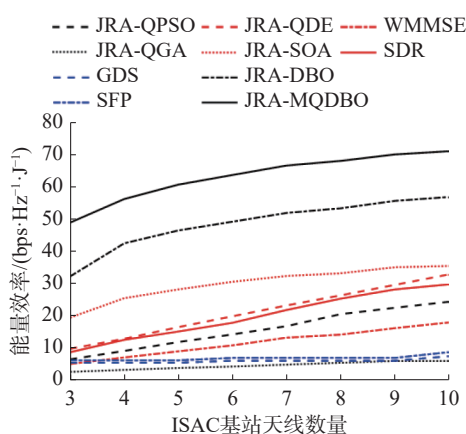


图 11 当  $M$  从 3 变化到 10,  $N=40$  时能量效率优化仿真结果

Fig. 11 Simulation result of energy efficiency optimization when  $M=3$  to 10,  $N=40$

对于 IRS 辅助 ISAC 系统, 可以看出, 随着 ISAC 系统天线数量的增加, 能量效率也会提高。经广泛验证, 已经证实使用多天线技术可以提高系统通信性能。对于 ISAC 基站, 通过采用适当的波束成形策略, 随着天线数量的增加, 通信性能得到显著提高, 能量效率得到提升。

当  $M=4$ ,  $N$  从 10 变化到 80 时, 探索 IRS 反射单元数量对能量效率的影响, 仿真实验结果如图 12 所示。在图 13 中, 进一步探讨另一种场景下当  $M=8$ ,  $N$  从 10 变化到 80 时, IRS 反射单元数量对能量效率的影响。

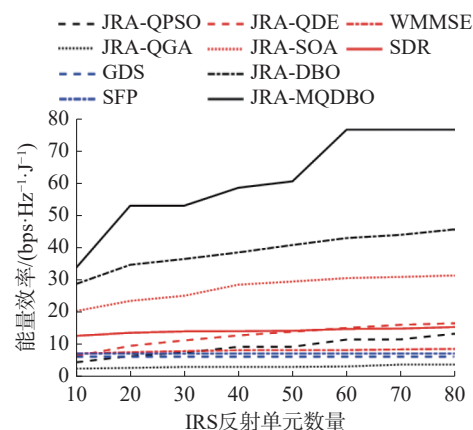


图 12 当  $M=4$ ,  $N$  从 10 变化到 80 时能量效率优化仿真结果

Fig. 12 Simulation result of energy efficiency optimization when  $M=4$ ,  $N=10$  to 80

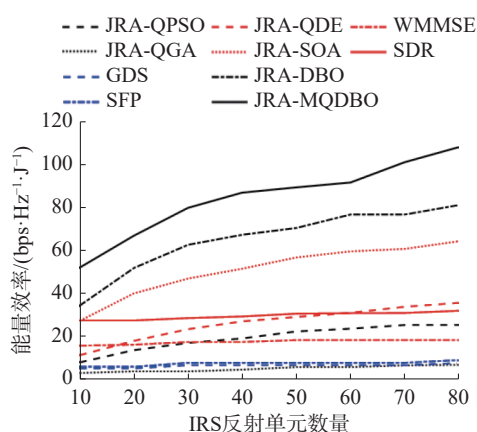


图 13 当  $M=8$ ,  $N$  从 10 变化到 80 时能量效率优化仿真结果

Fig. 13 Simulation result of energy efficiency optimization when  $M=8$ ,  $N=10$  to 80

据观察, 随着 IRS 反射单元数量的增加, 能量效率随之增加。这是因为随着 IRS 反射单元数量的增加, IRS 通过使用更多的反射单元, 可以从 ISAC 基站接收更多能量, 从而增强用户所需信号。

对于本文全新提出的算法, IRS 辅助 ISAC 系统中能量效率优于其他解决方案, 表明该算法可以有效利用资源。对于智能反射面辅助通信感知一体化系统, 基于本文提出的联合资源分配方法, 得到总速率和能量效率优化方法。

最后, 探究当  $M=4$ ,  $N=20$ ,  $P_c$  从 5 变化到 40 dBm 时, 能量效率与通信子系统基站发射功率预算之间的关系, 仿真结果如图 14 所示。

观察到随着通信子系统发射功率预算的增加, 能量效率显著增加。由于优化了智能反射面反射单元相移, 智能反射面的直接信号和反射信号可以相长相加, 从而提供了新的自由度来提高能量效率。

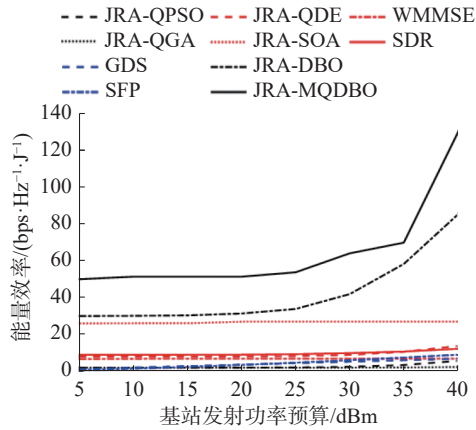


图 14 当  $M=4, N=20$ ,  $P_C$  从 5 变化到 40 dBm 时能量效率优化仿真结果

Fig. 14 Simulation result of energy efficiency optimization when  $M=4, N=20, P_C=5$  to 40 dBm

3.3 计算复杂度仿真分析

针对 IRS 辅助 ISAC 系统波束成形优化问题, 参与比较的对比算法计算时间仿真如表 3 和表 4 所示, 所有仿真参数与上节相同。其中场景 1 对应当  $M$  从 3 变化到 10,  $N=20$  时的仿真场景, 场景 2 对应当  $M=4, N$  从 10 变化到 80 时的仿真场景。

表 3 总速率对比算法计算时间仿真

Table 3 Computational time of comparative algorithms of sum-rate

| 算法    | 场景1                   | 场景2                   |
|-------|-----------------------|-----------------------|
| QPSO  | $4.37 \times 10^0$    | $6.21 \times 10^0$    |
| QGA   | $1.32 \times 10^1$    | $1.43 \times 10^1$    |
| QDE   | $2.59 \times 10^1$    | $3.34 \times 10^1$    |
| SOA   | $1.57 \times 10^0$    | $3.08 \times 10^0$    |
| SDR   | $1.37 \times 10^{-2}$ | $2.23 \times 10^{-2}$ |
| WMMSE | $1.59 \times 10^{-2}$ | $2.74 \times 10^{-2}$ |
| AO    | $1.12 \times 10^{-2}$ | $2.17 \times 10^{-2}$ |
| PGMO  | $8.73 \times 10^{-3}$ | $1.54 \times 10^{-2}$ |
| DBO   | $9.01 \times 10^{-1}$ | $1.92 \times 10^0$    |
| MQDBO | $9.78 \times 10^{-1}$ | $2.31 \times 10^0$    |

表 4 能量效率对比算法计算时间仿真

Table 4 Computational time of comparative algorithms of energy efficiency

| 算法    | 场景1                   | 场景2                   |
|-------|-----------------------|-----------------------|
| QPSO  | $3.29 \times 10^0$    | $5.13 \times 10^0$    |
| QGA   | $9.89 \times 10^0$    | $1.27 \times 10^1$    |
| QDE   | $1.36 \times 10^1$    | $2.23 \times 10^1$    |
| SOA   | $9.94 \times 10^{-1}$ | $1.89 \times 10^0$    |
| SDR   | $8.93 \times 10^{-3}$ | $1.07 \times 10^{-2}$ |
| WMMSE | $9.34 \times 10^{-3}$ | $1.42 \times 10^{-2}$ |
| GDS   | $9.02 \times 10^{-3}$ | $1.09 \times 10^{-2}$ |

续表 4

| 算法    | 场景1                   | 场景2                   |
|-------|-----------------------|-----------------------|
| SFP   | $7.56 \times 10^{-3}$ | $9.92 \times 10^{-3}$ |
| DBO   | $7.98 \times 10^{-1}$ | $9.01 \times 10^{-1}$ |
| MQDBO | $8.83 \times 10^{-1}$ | $1.22 \times 10^0$    |

从表 3 和表 4 的仿真结果可以看出, 膜量子蛭螂优化算法的运行时间比蛭螂优化算法长, 但比其他群智能算法运行时间短。在相同的种群规模下, 与蛭螂优化算法相比, 膜量子蛭螂优化算法引入了膜结构和量子进化策略, 这样势必会增加算法的计算复杂度。然而, 由于其较高的收敛精度, 膜量子蛭螂优化算法仍然具有重要意义与价值, 因此更长的计算时间并不是膜量子蛭螂优化算法的缺点。尽管加权最小均方误差法、半定松弛法和交替优化算法等传统优化方法需要较少的计算时间, 但它们只能获得局部最优解。

3.4 算法收敛一致性仿真分析

为了验证本章所提出算法的收敛一致性, 本节对 IRS 辅助 ISAC 系统总速率和能量效率的标准差进行仿真分析, 仿真实验结果如表 5 和表 6 所示。

表 5 总速率收敛一致性仿真分析

Table 5 Sum-rate convergence consistency simulation analysis

| 算法    | 场景1                    | 场景2                    |
|-------|------------------------|------------------------|
| QPSO  | $2.98 \times 10^{-4}$  | $4.31 \times 10^{-6}$  |
| QGA   | $7.65 \times 10^{-6}$  | $3.23 \times 10^{-4}$  |
| QDE   | $5.42 \times 10^{-5}$  | $7.61 \times 10^{-5}$  |
| SOA   | $3.45 \times 10^{-14}$ | $5.41 \times 10^{-12}$ |
| SDR   | $3.24 \times 10^{-2}$  | $5.41 \times 10^{-2}$  |
| WMMSE | $4.65 \times 10^{-3}$  | $6.89 \times 10^{-2}$  |
| AO    | $6.41 \times 10^{-2}$  | $4.31 \times 10^{-2}$  |
| PGMO  | $7.92 \times 10^{-3}$  | $9.56 \times 10^{-2}$  |
| DBO   | $5.68 \times 10^{-15}$ | $4.87 \times 10^{-15}$ |
| MQDBO | $4.13 \times 10^{-15}$ | $3.98 \times 10^{-15}$ |

表 6 能量效率收敛一致性仿真分析

Table 6 Energy efficiency convergence consistency simulation analysis

| 算法    | 场景1                   | 场景2                   |
|-------|-----------------------|-----------------------|
| QPSO  | $6.51 \times 10^{-6}$ | $5.42 \times 10^{-7}$ |
| QGA   | $1.26 \times 10^{-5}$ | $3.14 \times 10^{-5}$ |
| QDE   | $8.64 \times 10^{-4}$ | $7.63 \times 10^{-6}$ |
| SOA   | $1.97 \times 10^{-7}$ | $5.63 \times 10^{-6}$ |
| SDR   | $5.78 \times 10^{-8}$ | $7.86 \times 10^{-7}$ |
| WMMSE | $5.82 \times 10^{-6}$ | $9.02 \times 10^{-9}$ |

续表 6

| 算法    | 场景1                    | 场景2                    |
|-------|------------------------|------------------------|
| GDS   | $4.32 \times 10^{-8}$  | $2.76 \times 10^{-7}$  |
| SFP   | $7.32 \times 10^{-6}$  | $5.24 \times 10^{-9}$  |
| DBO   | $4.78 \times 10^{-10}$ | $6.86 \times 10^{-11}$ |
| MQDBO | $2.08 \times 10^{-10}$ | $3.15 \times 10^{-11}$ |

与上节相同, 场景 1 对应当  $M$  从 3 变化到 10,  $N=20$  时的仿真场景, 场景 2 对应当  $M=4$ ,  $N$  从 10 变化到 80 时的仿真场景。通过仿真实验可以看出, 膜量子蛭螂优化算法具有优异的稳定性和鲁棒性。在膜量子蛭螂优化算法中, 膜量子蛭螂结合量子搜索机制, 在膜结构和量子旋转门的帮助下改善优化行为。膜量子蛭螂优化算法源于其特有的启发式原理, 具有与众不同的关键演化算子, 所形成的全新量子位置更新策略赋予膜量子蛭螂优化算法更高的收敛精度和快速逃离局部最优解的能力。一些传统优化方法由于使用过往的启发式原理, 总是很难突破收敛限制, 容易陷入局部最优。膜量子蛭螂优化算法在收敛速度、收敛精度、稳定性和寻求全局最优解的能力方面都得到显著提高, 它具有收敛速度快、收敛精度高和并行搜索等优点。因此, 与其他算法相比, 膜量子蛭螂优化算法可以以更少迭代次数实现与其他算法相同的收敛精度。综上所述, 与其他群智能算法和传统优化方法相比, 膜量子蛭螂优化算法具有更强的稳定性、鲁棒性和更好的全局寻优能力。

### 3.5 参数敏感性分析

膜量子蛭螂优化算法的一些参数对其性能具有明显影响, 下面对其进行敏感性分析。利用表 7 和表 8 分析  $g$ 、 $\omega_2$ 、 $\varpi$  这 3 个参数对性能的影响。

表 7 MQDBO 参数在总速率仿真中的敏感性分析  
Table 7 Sensitivity analysis of MQDBO parameters for sum-rate simulation under different conditions

| 序号 | 参数值 |            |          | 总速率仿真              |
|----|-----|------------|----------|--------------------|
|    | $g$ | $\omega_2$ | $\varpi$ | $M=4, N=20$ 的情况    |
| 1  | 0.1 | 0.3        | 0.5      | $1.63 \times 10^1$ |
| 2  | 0.1 | 0.3        | 1.5      | $1.52 \times 10^1$ |
| 3  | 0.1 | 0.7        | 1.5      | $1.59 \times 10^1$ |
| 4  | 0.1 | 0.7        | 0.5      | $1.61 \times 10^1$ |
| 5  | 0.2 | 0.3        | 0.5      | $1.57 \times 10^1$ |
| 6  | 0.2 | 0.3        | 1.5      | $1.59 \times 10^1$ |
| 7  | 0.2 | 0.7        | 1.5      | $1.58 \times 10^1$ |
| 8  | 0.2 | 0.7        | 0.5      | $1.60 \times 10^1$ |

基于上述实验, 本文选定  $g = 0.1$ ,  $\omega_2 = 0.3$ ,  $\varpi = 0.5$  作为膜量子蛭螂优化算法的参数值。

表 8 MQDBO 参数在能量效率仿真中的敏感性分析

Table 8 Sensitivity analysis of MQDBO parameters for energy efficiency simulation under different conditions

| 序号 | 参数值 |            |          | 能量效率仿真             |
|----|-----|------------|----------|--------------------|
|    | $g$ | $\omega_2$ | $\varpi$ | $M=4, N=20$ 的情况    |
| 1  | 0.1 | 0.3        | 0.5      | $4.88 \times 10^1$ |
| 2  | 0.1 | 0.3        | 1.5      | $4.83 \times 10^1$ |
| 3  | 0.1 | 0.7        | 1.5      | $4.86 \times 10^1$ |
| 4  | 0.1 | 0.7        | 0.5      | $4.85 \times 10^1$ |
| 5  | 0.2 | 0.3        | 0.5      | $4.81 \times 10^1$ |
| 6  | 0.2 | 0.3        | 1.5      | $4.79 \times 10^1$ |
| 7  | 0.2 | 0.7        | 1.5      | $4.86 \times 10^1$ |
| 8  | 0.2 | 0.7        | 0.5      | $4.84 \times 10^1$ |

### 3.6 通信感知一体化系统感知侧性能评估

本节对通信感知一体化系统感知侧性能进行具体评估, 在 JRA-MQDBO 和 JRA-DBO 优化框架下对发射波束方向图进行仿真, 仿真实验结果如图 15 所示。

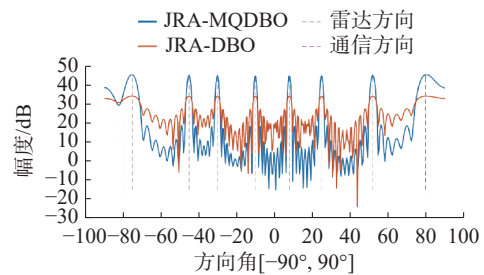


图 15 IRS 辅助 ISAC 系统发射波束方向图仿真

Fig. 15 Transmit beampattern simulation for IRS-assisted ISAC system

通信感知一体化系统中通信性能与感知性能之间的最优平衡是一个值得研究的课题, 通信与感知的性能平衡主要体现在对同一资源(时域、频域、空域、功率等)的竞争性需求上。通信信号通常随机且非平稳, 用于感知会引入高旁瓣和噪声基底, 降低检测概率和测距精度。感知回波会干扰通信接收机, 需要复杂的干扰消除算法, 增加计算开销。依据典型应用场景的差异, 如若为车联网等通信优先的使用场景, 优先保障数据传输速率, 感知只做粗略存在检测; 如若为雷达监控等感知优先的使用场景, 优先保证距离-速度分辨率, 通信速率极低; 如若为无人机中继等动态折中的使用场景, 根据任务需求动态调整波形和资源分配, 工作于帕累托边界上的不同点。

通信与感知的最优平衡本质是信息承载效率与测量估计精度之间的矛盾。没有全优的“一体化”方案, 只有针对具体场景的最优平衡。实际系

统通常采用灵活帧结构、可配置波形和自适应资源调度来逼近理论折中边界。

## 4 结束语

本文设计出全新的 IRS 辅助 ISAC 系统, 以平衡传输速率和能量消耗。本文重点研究 IRS 辅助 ISAC 系统联合资源分配问题, 并针对相应非凸优化问题设计出膜量子蛭螂优化算法。所提出系统通过联合优化 ISAC 基站处发射波束成形和 IRS 处反射波束成形, 实现 IRS 辅助 ISAC 系统总速率和能量效率最大化。膜量子蛭螂优化算法充分运用量子计算和膜计算理论, 具有收敛精度高、收敛速度快、并行搜索、易于跳出局部最优解等优点, 通过仿真实验有效验证了该方法在平衡传输速率和能量消耗方面的有效性和优越性。下一步研究重点是将本文提出的基于膜量子蛭螂优化算法的联合资源分配方法与非正交多址接入、massive MIMO 等技术有机结合, 并考虑全新通信场景中的多目标优化问题, 进一步拓展该联合资源分配方法的适用范围与应用前景。

## 参考文献:

- [1] 张平, 陈岩, 吴超楠. 6G: 新一代移动通信技术发展态势及展望[J]. 中国工程科学, 2023, 25(6): 1–8.  
ZHANG Ping, CHEN Yan, WU Chaonan. Six-generation mobile communication: development trend and outlook[J]. Strategic study of CAE, 2023, 25(6): 1–8.
- [2] ZHANG J A, RAHMAN M L, WU Kai, et al. Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks: a survey[J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2022, 24(1): 306–345.
- [3] ZHANG J A, LIU Fan, MASOUIROS 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.
- [4] 曾勇, 杨定邦, 李鑫睿, 等. 6G 通感一体化: 从传统 MIMO 到稀疏 MIMO[J]. 中山大学学报 (自然科学版中英文), 2025, 64(4): 1–11.  
ZENG Yong, YANG Dingbang, LI Xinrui, et al. 6G integrated sensing and communications: from traditional MIMO to sparse MIMO[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2025, 64(4): 1–11.
- [5] LIU Fan, CUI Yuanhao, MASOUIROS 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.
- [6] 朱政宇, 王梓珉, 徐金雷, 等. 智能反射面辅助的未来无线通信: 现状与展望[J]. 航空学报, 2022, 43(2): 203–217.  
ZHU Zhengyu, WANG Zixuan, XU Jinlei, et al. Future wireless communication assisted by intelligent reflecting surface: State of art and prospects[J]. *Acta aeronautica et astronautica sinica*, 2022, 43(2): 203–217.
- [7] SHAO Xiaodan, YOU Changsheng, ZHANG Rui. Intelligent reflecting surface aided wireless sensing: applications and design issues[J]. *IEEE wireless communications*, 2024, 31(3): 383–389.
- [8] QI Kangwei, WU Qiong, FAN Pingyi, et al. Reconfigurable-intelligent-surface-aided vehicular edge computing: joint phase-shift optimization and multiuser power allocation[J]. *IEEE Internet of Things journal*, 2025, 12(1): 764–777.
- [9] XU Fan, YAO Jiawei, LAI Wenhui, et al. Blind beamforming for coverage enhancement with intelligent reflecting surface[J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2024, 23(11): 15736–15752.
- [10] WANG Dawei, LI Jiawei, LV Qinyi, et al. Integrating reconfigurable intelligent surface and AAV for enhanced secure transmissions in IoT-enabled RSMA networks[J]. *IEEE Internet of Things journal*, 2025, 12(8): 9405–9419.
- [11] REN Zixiang, XU Jie, QIU Ling, et al. Secure cell-free integrated sensing and communication in the presence of information and sensing eavesdroppers[J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2024, 42(11): 3217–3231.
- [12] MU Junsheng, ZHANG Ronghui, CUI Yuanhao, et al. UAV meets integrated sensing and communication: challenges and future directions[J]. *IEEE communications magazine*, 2023, 61(5): 62–67.
- [13] HUA Meng, WU Qingqing, CHEN Wen, et al. Secure intelligent reflecting surface-aided integrated sensing and communication[J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2024, 23(1): 575–591.
- [14] AMIRIARA H, MIRMOHSENI M, ELZANATY A, et al. A physical layer security framework for IRS-assisted integrated sensing and semantic communication systems[J]. *IEEE transactions on cognitive communications and networking*, 2025, 11(5): 2955–2969.
- [15] LI Heyi, WANG Hong, SHI Zheng. Sensing performance enhancement for reconfigurable intelligent surface empowered integrated sensing and communications[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2026, 75(1): 1085–1095.
- [16] AKDENIZ M R, LIU Yuanpeng, SAMIMI M K, et al. Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation[J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2014, 32(6): 1164–1179.

- [17] 何子述, 程子扬, 李军, 等. 集中式 MIMO 雷达研究综述[J]. 雷达学报, 2022, 11(5): 805–829.  
HE Zishu, CHENG Ziyang, LI Jun, et al. A survey of collocated MIMO radar[J]. *Journal of radars*, 2022, 11(5): 805–829.
- [18] LIU Huimin, LI Yong, CHENG Wei, et al. Sensing-efficient transmit beamforming for ISAC with MIMO radar and MU-MIMO communication[J]. *Remote sensing*, 2024, 16(16): 3028.
- [19] GOH C Y, LEOW C Y, NORDIN R. Energy efficiency of unmanned aerial vehicle with reconfigurable intelligent surfaces: a comparative study[J]. *Drones*, 2023, 7(2): 98.
- [20] 高洪元, 刁鸣. 量子群智能及其在通信技术中的应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 1–3.
- [21] 高洪元, 李晨琬. 膜量子蜂群优化的多目标频谱分配[J]. *物理学报*, 2014, 63(12): 460–469.  
GAO Hongyuan, LI Chenwan. Membrane-inspired quantum bee colony algorithm for multiobjective spectrum allocation[J]. *Acta physica sinica*, 2014, 63(12): 460–469.
- [22] MOHAMMADBEIGI A, MAROOSI A, HEMMATI M. Optimal chiller loading for energy conservation using a hybrid whale optimization algorithm based on population membrane systems[J]. *International journal of modelling and simulation*, 2022, 42(1): 101–116.
- [23] ZHANG Gexiang, GHEORGHE M, WU Chaozhong. A quantum-inspired evolutionary algorithm based on P systems for knapsack problem[J]. *Fundamenta informaticae*, 2008, 87(1): 93–116.
- [24] PĂUN G. Computing with membranes[J]. *Journal of computer and system sciences*, 2000, 61(1): 108–143.
- [25] XUE Jiankai, SHEN Bo. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization[J]. *The journal of supercomputing*, 2023, 79(7): 7305–7336.
- [26] GONG Chen, ZHOU Nanrun, XIA Shuhua, et al. Quantum particle swarm optimization algorithm based on diversity migration strategy[J]. *Future generation computer systems*, 2024, 157: 445–458.
- [27] BICHARA R M, ASADALLAH F A B, AWAD M, et al. Quantum genetic algorithm for the design of miniaturized and reconfigurable IoT antennas[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2023, 71(5): 3894–3904.
- [28] DEY A, BHATTACHARYYA S, DEY S, et al. A quantum inspired differential evolution algorithm for automatic clustering of real life datasets[J]. *Multimedia tools and applications*, 2024, 83(3): 8469–8498.
- [29] DHIMAN G, KUMAR V. Seagull optimization algorithm: Theory and its applications for large-scale industrial engineering problems[J]. *Knowledge-based systems*, 2019, 165: 169–196.
- [30] ZHANG Shuowen, ZHANG Rui. Capacity characterization for intelligent reflecting surface aided MIMO communication[J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2020, 38(8): 1823–1838.
- [31] MA Teng, XIAO Yue, LEI Xia, et al. Integrated sensing and communication with reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2024, 73(12): 19051–19064.
- [32] 马晓双, 沈焕锋, 杨杰, 等. 极化 SAR 相干斑抑制的非局部加权最小均方误差滤波算法[J]. *中国图象图形学报*, 2015, 20(1): 140–150.  
MA Xiaoshuang, SHEN Huanfeng, YANG Jie, et al. Polarimetric SAR speckle filtering using a nonlocal weighted minimum mean squared error filter[J]. *Journal of image and graphics*, 2015, 20(1): 140–150.
- [33] ELTVED A, DAHL J, ANDERSEN M S. On the robustness and scalability of semidefinite relaxation for optimal power flow problems[J]. *Optimization and engineering*, 2020, 21(2): 375–392.
- [34] HUANG Chongwen, 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.

### 作者简介:



赵琳, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为惯性导航系统、卫星导航和综合导航。主持国家自然科学基金重点项目 1 项、面上项目 3 项、研制项目近 30 项。获国家级奖 1 项、省部级奖 9 项; 获发明专利授权 10 余项; 发表学术论文 180 余篇; 出版学术著作 9 部。  
E-mail: zhaolin@hrbeu.edu.cn。



崔闻, 博士研究生, 主要研究方向为物联网通信、智能反射面、massive MIMO 技术和智能计算。E-mail: kid13@foxmail.com。



程建华, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为惯性导航系统、卫星导航和综合导航。主持国家自然科学基金项目、研制项目 20 余项, 获省部级科技奖项 7 项, 获发明专利授权 13 项。发表学术论文 100 余篇, 出版学术著作 7 部。E-mail: chengjianhua@hrbeu.edu.cn。