



研究与开发

基于半正定规划的智能超表面的覆盖增强

杨祖源¹, 王宁¹, 申凌峰², 张千坤³, 陈任翔³, 贾少波¹

(1. 郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 河南大学软件学院, 河南 开封 475004;

3. 中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司, 河南 郑州 450007)

摘要: 可重构智能超表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 作为第六代移动通信系统的关键使能技术之一, 能够有效增强信号强度与通信质量, 从而提升系统整体性能。在实际应用中, 1-bit 离散相位方案因其硬件复杂度低而更具工程实用性, 但离散相位约束通常导致波束成形问题难以直接求解。为此, 提出一种融合雷达感知的优化方法。该方法首先利用雷达模块获取环境几何信息以构建信道模型。在此基础上, 以接收功率最大化为目标, 建立半正定规划问题。这一操作引入了秩一约束, 通过凸松弛技术将其转化成可以高效求解的凸优化形式, 并引入线性项将结果推向极值点, 从而满足 1-bit 离散相位需求。最后, 通过搭建 RIS 辅助通信系统实验平台, 验证了所提算法的可行性与有效性, 为未来大规模 RIS 系统的工程部署提供了理论与实验支撑。

关键词: 可重构智能超表面; 波束成形; 1-bit 离散相位; 半正定规划

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.DXKX250627

Coverage enhancement for reconfigurable intelligent surface based on semidefinite programming

Yang Zuyuan¹, Wang Ning¹, Shen Lingfeng², Zhang Qiankun³,

Chen Renxiang³, Jia Shaobo¹

1. The School of Electrical Engineering in Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

2. Henan University Software College, Kaifeng 475004, China

3. Zhengzhou Branch, China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450007, China

Abstract: The reconfigurable intelligent surface (RIS), as one of the key enabling technologies for the sixth-generation mobile communication systems, is employed to effectively enhance signal strength and communication quality, thereby improving the overall system performance. In practical applications, the 1-bit discrete phase-shift

收稿日期: 2025-10-27; 修回日期: 2026-01-15

通信作者: 王宁, ienwang@zzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (No.62301502)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China Youth Science Fund (No.62301502)



scheme is considered more suitable for engineering implementation due to its lower hardware complexity, however, the discrete-phase constraint typically makes the beamforming problem difficult to solve directly. To address this challenge, an optimization method incorporating radar sensing was proposed. Firstly, environmental geometric information acquired by a radar module was used to construct a channel model. On this basis, a semidefinite programming problem was formulated with the objective of maximizing the received power. This formulation introduced a rank-one constraint, which was then transformed into an efficiently solvable convex optimization form via convex relaxation. Moreover, a linear term was incorporated to push the solution toward extremal points, thereby satisfying the 1-bit discrete-phase requirement. Finally, an RIS-assisted communication system experimental platform was established, and the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm were verified, providing both theoretical and experimental support for the future engineering deployment of large-scale RIS systems.

Key words: reconfigurable intelligent surface, beamforming, 1-bit discrete phase, semidefinite programming

0 引言

为满足 6G 网络对超高密度连接、全域覆盖与绿色通信的核心需求,可重构智能超表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 凭借其低功耗、易部署及可编程等优势,成为一项能够重塑无线信道传播机制的革命性技术^[1]。RIS 由大量精密设计的电磁单元阵列构成,通过对单元可调元件施加控制电压,可动态调控电磁响应特性,实现对空间电磁波的幅度、相位、极化及频率等多维参数的智能编程^[2]。该技术将无线环境从被动适应转变为主动可控,构建了智能化的电磁空间^[3]。

相较于传统有源基站与接入点, RIS 不需要射频链路支持,兼具低成本与低功耗的优势。它可以灵活部署于墙体、天花板或路灯等设施表面,有效增强视距传输并支持近场通信。这些特性使 RIS 在 6G 网络中展现出巨大应用潜力。

RIS 的核心能力在于波束成形,即通过优化阵元的相位分布,精确调控信号传播方向并实现相干叠加,从而显著提升通信质量^[4]。相关研究已提出了多种优化方案:文献[5]以最大化系统信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR) 为目标,结合半正定松弛 (semidefinite relaxation, SDR) 与交替优化技术,设计了面向

RIS 码本的波束成形方案,其性能可逼近最优,但计算复杂度较高。文献[6]则聚焦于鲁棒性设计,在给定发射功率约束下,通过最优线性预编码策略最大化任意 RIS 相位配置下的最差用户信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR),适用于对公平性要求较高的场景。为降低实现复杂度,文献[7]提出一种低复杂度的 RIS 阵元分组策略,将大规模相位优化问题分解为若干子问题,在牺牲少量速率性能的前提下显著提升了算法效率。文献[8]进一步考虑了基站与 RIS 的协同设计,通过联合优化基站预编码矩阵与 RIS 反射相位,有效抑制了多用户干扰,使系统误码率明显下降。文献[9]则针对多用户公平性问题,引入分块坐标下降算法,迭代优化 RIS 相位与功率分配,以最大化所有用户的最小可达速率。然而,上述研究多是基于理想的信道状态信息 (channel state information, CSI),在构建的级联信道模型下进行联合优化,且通常假设 RIS 具备连续相移能力,与实际系统中存在的信道估计误差、量化相移约束等因素尚有差距。

鉴于成本和硬件实现方面的限制,实际系统中通常更倾向于采用离散波束成形设计。过去的研究往往先通过标准优化方法求解连续波束问题,再将所得解映射到离散集合中。例如,文献[10]提出了一种多项式时间算法,用于离散波束成形

设计。然而，此类近似策略在弱覆盖场景下存在显著局限，量化误差会导致波束增益严重下降。此外，上述研究多依赖于高开销的RIS级联信道估计，这对于不具备主动收发能力的RIS来说是非常困难的，且往往需要突破现有通信协议框架。盲波束成形技术能够有效克服这一问题：RIS无须参与通信协议中的调制、编码或信道反馈过程，而是通过调整自身的相位配置，使反射信号在目标用户处实现相干叠加，从而增强覆盖性能。

针对盲波束成形，学术界已提出了多种实现策略。文献[11]设计了一种基于统计学习的盲波束成形策略，通过最大化接收信号功率的条件样本均值来迭代调整RIS相位，在不需要CSI的条件下实现了可观的SNR增益，但该方法的有效性依赖于存在较强的直传链路。为提升算法效率，文献[12]从理论层面揭示了经典信道统计匹配方法本质上是强化学习中贪婪策略的一种特例，并进一步引入梯度估计机制以加速收敛。在此基础上，文献[13]提出一种自适应盲波束成形方案，通过将部分反射路径固定作为等效直传通道，并对剩余可调单元进行优化，从而有效缓解了传统统计信道匹配(channel-statistics matching, CSM)方法对物理直传链路的强依赖。此外，亦有研究从黑盒优化视角切入，如Ghaya等^[14]结合贝叶斯优化与信息论准则，在完全未知信道环境下搜索近似最优的相移配置。尽管上述工作为低开销RIS部署提供了有益探索，但其解通常局限于局部最优，且研究主要集中在单波束场景下的优化^[15]，与真实通信环境中多用户、多波束的实际需求之间存在明显差距，限制了相关方法在实际系统中的应用价值。

在前期研究中，本团队基于固定码本架构的可重构智能表面系统开展了覆盖增强性能的实证研究。通过在典型目标区域部署具有预设码本配置的RIS单元阵列，实现了参考信号接收功率

(reference signal received power, RSRP)的显著提升。该实验在室内热点场景下，系统验证了RIS技术对无线传播环境的动态调控能力与性能增益，为其在6G网络中实现精准空间覆盖增强的应用提供了关键实验依据。此阶段工作已从实测角度初步验证了RIS对电磁波的高效智能重构能力，为后续的理论创新与工程实践奠定了坚实可靠的双重基础。

基于此，本文提出一种面向1-bit离散相移的RIS多波束成形方法。利用雷达模块感知的用户位置作为先验信息，结合已知的发射机位置，构建几何信道模型并建立优化问题，动态设计RIS的反射相位，以实现为目标用户的高增益定向波束成形。在算法设计层面，将原始非凸优化问题转化为半正定规划(semidefinite programming, SDP)问题^[16]，通过引入线性约束条件将相移严格限制在1-bit离散集合内。优化目标设定为最大化所有目标波束的总接收增益，同时为每个波束施加增益下限约束，使算法天然适配多波束应用场景。仿真验证与实测结果表明，所提方案有效平衡了离散相移约束与系统性能需求，具备良好的工程实用性。

1 系统模型

在sub-6GHz频段下，RIS辅助通信系统如图1所示。当用户终端与基站之间的直达路径被障碍物遮挡时，用户接收信号质量会严重恶化。该系统通过部署RIS，能够在基站与处于信号覆盖盲区的用户之间构建虚拟视距通信链路^[17]。受遮挡影响，本文假设发射机与接收机之间的直达链路可忽略不计。该RIS采用均匀矩形阵列结构，共包含 N 个反射单元。在硬件实现方面，本文重点考虑1-bit二进制相位量化约束，即每个RIS单元只能在两个离散相位值 $\{0, \pi\}$ 中进行选择。

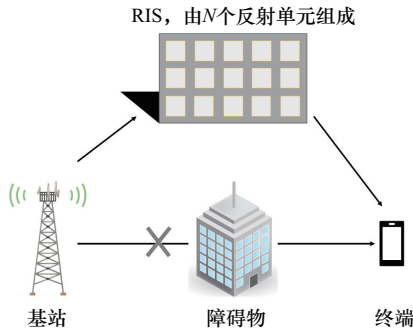


图1 RIS辅助通信系统

在该系统中，RIS单元 k 的接收信号 y_k 可表示为：

$$y_k = x \cdot \frac{\lambda}{4\pi d_k} e^{\frac{j2\pi d_k}{\lambda}} \sqrt{G_t} \sqrt{G} \sqrt{S_k} \sqrt{F_k} \quad (1)$$

其中， x 为发射信号； λ 为波长； d_k 为发射端到RIS单元 k 的距离； G_t 为发射机增益； $S_k = 10^{X_\sigma/10}$ 为信号从基站到RIS单元 k 的阴影衰落， $X_\sigma \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ ， σ 为阴影标准差； $G = 4\pi d_x d_y / (\lambda^2)$ 为RIS单元孔径增益， d_x 、 d_y 分别为RIS单元的长和宽； F_k 为信号到达RIS单元 k 的归一化辐射系数。

在本文的实验环境中，由于信号直达链路被严重遮挡，且信号覆盖增强区域内的信号强度较弱，因此可以认为接收机的主要接收信号来自RIS的反射。根据文献[18]从电磁场理论推导的RIS通用损耗模型，用户 i 的接收功率为：

$$|y_i|^2 = \frac{x^2 \lambda^2 G_t G_r G d_x d_y}{64\pi^3} \times \left| \sum_{k=1}^N \frac{e^{\frac{j2\pi(d_k+d_{k,i})}{\lambda}} e^{j\varphi_k} \sqrt{F_k F_{k,i}} \sqrt{S_k} \sqrt{S_{k,i}} A}{d_k d_{k,i}} \right|^2 \quad (2)$$

其中， $d_{k,i}$ 为RIS单元 k 到用户 i 的距离； G_r 为接收机增益； φ_k 为RIS单元 k 的相位； N 为RIS单元个数； $S_{k,i}$ 为用户 i 经过RIS单元 k 时信号的阴影衰落； $F_{k,i}$ 为信号到达用户 i 的归一化辐射系数； A 为RIS的反射系数幅值，根据能量守恒原则，

有 $A \leq 1$ ，实际上受金属损耗、介质吸收等因素影响，其典型取值为 $A = 0.8 \sim 0.9$ 。

2 RIS的波束成形算法与仿真

由式(2)可知，影响用户接收功率的关键因素是发射机、接收机相对于RIS的方位和RIS的相位配置。本节将围绕这两个关键因素，分别解决位置信息的获取问题与RIS相位配置的优化问题。

2.1 位置信息的获取

为满足自适应波束成形对终端空间位置信息的高精度、低延迟需求，系统采用德州仪器的商用毫米波雷达芯片IWR6843作为无线环境感知的核心组件。该芯片工作于76~81 GHz频段，支持调频连续波体制，集成了射频前端、模数转换器与硬件加速器，可实现亚米级测距与高精度角度分辨，且已在工业传感与智能交通中获得广泛应用。雷达通过发射线性调频信号并接收来自用户的反射回波，解析信号传播路径中的时延与相位差，从而实现对用户位置的估计。设发射信号 $s_t(t)$ 为：

$$s_t(t) = A_t \cos \left(2\pi \left(f_0 t + \frac{1}{2} K t^2 \right) + \phi_0 \right) \quad (3)$$

其中， A_t 为发射信号幅度， f_0 为起始频率， K 为调频斜率（ $K = B/T_c$ ， B 为扫频带宽， T_c 为扫频周期）， ϕ_0 为初始相位。

目标反射的回波信号 $s_r(t)$ 相对于发射信号存在一个时间延迟 $\tau = \frac{2d}{c}$ ，其表达式为：

$$s_r(t) = A_r \cos \left(2\pi \left(f_0 (t - \tau) + \frac{1}{2} K (t - \tau)^2 \right) + \phi_0 \right) \quad (4)$$

将发射信号 $s_t(t)$ 与接收信号 $s_r(t)$ 进行混频，并低通滤波后，差频 $f \approx K\tau$ 可用于解算目标距离：

$$d = \frac{c \cdot f}{2K} = \frac{c \cdot T_c \cdot f}{2B} \quad (5)$$

其中， d 为目标距离， c 为光速。

基于IWR6843的3发4收MIMO阵列结构，系统还可通过数字波束成形估计目标方位角，典型角度分辨率达 2° ；结合测距结果，最终输出用

户在全局坐标系下的位置估计 \hat{p} 。

相较于依赖通信反馈的定位方法（如基于CSI的到达角或接收信号强度指示），雷达感知完全独立于终端-网络协议栈，且无须信令交互，因而具备更高的时空分辨率，并能实现连续、无感、全天候的探测。同时，与视觉方案相比，毫米波雷达不受光照、遮挡或隐私合规限制，更适合室内/城市场景。

在本文框架中，发射机与接收机位置作为先验信息，用于构建RIS至用户的信道模型，从而驱动SDP波束优化。需说明的是，本文聚焦于RIS覆盖增强算法设计，雷达模块以黑箱的形式作为高精度、低延迟的位置先验源，其底层信号处理细节不再展开。

2.2 单波束场景下的RIS波束成形

在已知用户位置信息的前提下，可将单波束场景下的RIS相位优化问题简化为单一变量的优化问题。针对此单变量优化问题，可采用基于几何的相位对齐算法或相关优化算法进行求解。

2.2.1 基于几何的相位对齐算法

基于几何的相位对齐算法的主要原理是：通过为每个RIS单元配置特定的附加相位，补偿信号从发射机经不同RIS单元到达用户终端的传播路径相位差，使得所有路径的信号在用户位置实现同相叠加，从而最大化接收功率^[19]。其相位配置可表示为：

$$V_k = 2\pi - \text{mod}\left(\frac{2\pi(d_k + d_{k,i})}{\lambda}, 2\pi\right) \quad (6)$$

其中， V_k 表示第 k 个RIS单元量化后的相位配置。

该算法的计算复杂度为 $\mathcal{O}(N)$ 。

2.2.2 相关优化算法

由式（6）可知，基于几何的相位对齐算法虽然高效，但其对连续相位进行1-bit量化的过程不可避免地引入显著的相位失真，导致波束成形增益大幅下降，难以逼近全局最优解。相

比之下，采用优化算法则能有效克服这一局限性。

针对1-bit RIS相移仅可二值切换的约束，采用贪婪算法是一种可行的优化策略。该算法依次遍历每个反射单元。在每一步迭代中，通过评估当前单元不同离散相位配置对接收信号功率的影响，以贪婪策略选取使接收功率最大化的局部最优相位。该方法每一步均进行局部最优决策，具有较低的计算复杂度和良好的可操作性。考虑RIS单元 t 对用户 i 的接收功率影响：

$$y_i = \sum_{k=1}^{t-1} y_k \times \frac{\lambda}{4\pi d_{k,i}} e^{\frac{j2\pi d_{k,i}}{\lambda}} e^{j\varphi_k} \sqrt{G_r} \sqrt{G} \sqrt{F_{k,i}} A + y_k \times \frac{\lambda}{4\pi d_{t,i}} e^{\frac{j2\pi d_{t,i}}{\lambda}} e^{j\varphi_t} \sqrt{G_r} \sqrt{G} \sqrt{F_{t,i}} A \quad (7)$$

若 $\varphi_t=0$ 时的 $|y_i|^2$ 更大，则 $V_t=0$ ；反之， $V_t=\pi$ 。

该算法的计算复杂度为： $\mathcal{O}(N)$ 。

基于贪婪策略的方法因逐单元进行局部优化，无法规避过早收敛问题，且难以推广至多波束场景，具有明显局限性^[20]。为克服上述缺陷，在1-bit离散相位约束下实现逼近最佳的波束成形性能，并构建可扩展至多用户联合优化的方法，需要引入一种具备全局优化视角与完备求解框架的算法。基于此，本文提出一种基于半正定规划的优化方法，通过引入凸松弛技术和线性项，在全局范围内求解高性能的近似最优解。

在本文的系统模型中，用户 i 接收到的RIS单元 k 的反射信号可以表示为：

$$r_{k,i} = x \times \frac{\lambda}{4\pi d_k} e^{\frac{j2\pi d_k}{\lambda}} \sqrt{G_t} \sqrt{G} \sqrt{S_k} \sqrt{F_k} \frac{\lambda}{4\pi d_{k,i}} e^{\frac{j2\pi d_{k,i}}{\lambda}} \sqrt{G_r} \sqrt{G} \sqrt{S_{k,i}} \sqrt{F_{k,i}} A e^{j\varphi_k} = q_{k,i} e^{j\varphi_k} \quad (8)$$

令 $Q_i = [q_{1,i}, q_{2,i}, \dots, q_{N,i}]^T$ ， $w = [e^{j\varphi_1}, e^{j\varphi_2}, \dots, e^{j\varphi_N}]^T$ 则接收信号 y_i 可以写为：



$$|y_i|^2 = w^H Q_i Q_i^H w \quad (9)$$

记 $R_i = Q_i Q_i^H$ ，式 (9) 可以表示为：

$$|y_i|^2 = w^H R_i w \quad (10)$$

优化的目标就是使用户的接收功率 $|y_i|^2$ 最大化，因此该优化问题可以写为：

$$\max_w w^H R w \quad (11)$$

$$\text{s.t. } |w_i| = 1, \forall i = 1, \dots, N \quad (12)$$

显然 $w^H R w$ 是一个标量，迹等于本身，即 $w^H R w = \text{tr}(w^H R w)$ 。根据迹的性质，有 $\text{tr}(AB) = \text{tr}(BA)$ ，即 $\text{tr}(w^H R w) = \text{tr}(R w w^H) = \text{tr}(R W)$ ，其中 $W = w w^H$ 。目标问题可以表示为：

$$\max_W \text{tr}(R W) \quad (13)$$

$$\text{s.t. } W \geq 0, \text{rank}(W) = 1, |W_{ii}| = 1 \quad (14)$$

由于秩一约束具有非凸性，该问题难以直接高效求解。标准的半正定松弛方法通过移除秩一约束，将原问题转化为凸优化问题，但其解通常不满足 $\text{rank}(W) = 1$ ，且在 1-bit RIS 场景下，单纯依赖主特征向量的恢复方法往往性能有限。为显式引导解趋向离散极值，本文采用增广半正定规划策略。具体而言，构造增广向量 $\tilde{w} = [w^T, 1]^T \in \mathbb{R}^{N+1}$ ，并定义 $\tilde{W} = \tilde{w} \tilde{w}^T = \begin{bmatrix} w w^T & w \\ w^T & 1 \end{bmatrix}$ ，原目标函数可以扩展为 $w^T R w + 2 Q_i^T w = \text{tr} \left(\begin{bmatrix} R & Q_i \\ Q_i^T & 0 \end{bmatrix} \tilde{W} \right)$ ；该目标函数的最优解与原目标函数的解近似等价。因此，构造如下优化问题：

$$\max_W \text{tr}(C \tilde{W}) \quad (15)$$

$$\text{s.t. } \tilde{W} \geq 0, \tilde{W}_{nn} = 1, \forall n = 1, \dots, N+1 \quad (16)$$

其中， $C = \begin{bmatrix} R & Q_i \\ Q_i^T & 0 \end{bmatrix}$ ，为新的矩阵。

该问题通过显式移除原始问题中的秩一约束实现凸松弛。目标函数中的线性项 $2Q_i^T w$ 直接鼓励 w 与信道向量 Q_i 同号，同时在 $|w_n| \leq 1$ （由 $\tilde{W} \geq 0$

和 $\tilde{W}_{nn} = 1$ 保证）的约束下，推动 $w_n \rightarrow \pm 1$ 。式 (15) 是标准 SDP 问题，可采用 CVX (convex optimization problems) 等工具高效求解。求得最优解 W^* 后，最终的 1-bit RIS 相位配置直接取 W^* 最后一列的前 N 个元素的符号，不需要额外随机化或特征分解，计算简单且能有效逼近离散最优解。该算法的复杂度为： $\mathcal{O}(N^6)$ 。第 2.4.2 节也将该法拓展到多波束场景。

2.3 单波束场景的 RIS 波束成形仿真

本文仿真工作均在 MATLAB 平台完成。为与后续实测验证保持一致，数值仿真时所使用的 RIS 参数均取自第 3 节实验部分所使用的实际硬件与实验环境。实验所用的 RIS 可调节单元是 PIN 二极管。仿真中默认雷达模块可以准确地获取用户的位置信息。具体系统参数见表 1，如无特别说明，本文仿真均沿用该组参数配置。

表 1 系统参数

参数	取值
RIS 规模	16×16
RIS 反射系数幅值	0.8
量化级数/ bit	1
RIS 单元尺寸/ cm	3×3
中心载频/ GHz	3.5
发射天线增益/ dBi	6
接收天线增益/ dBi	3
发射功率/ dBm	10

单波束系统的仿真场景设置（俯视图）如图 2 所示。其中，基站与 RIS 的方位夹角为 45°，间距为 10 m；用户位于相对 RIS 方位角 60° 的方向上，与 RIS 相距 4 m。由于墙体遮挡，用户与基站之间的直达链路处于非视距 (non-line-of-sight, NLoS) 状态。由于 RIS 的辐射特性与贴片天线类似，当入射角、反射角相对于 RIS 法线的偏移过大时，单元反射幅度会显著下降，因此一般约束入射角、反射角与 RIS 法线的偏移角度均不超过 60°。

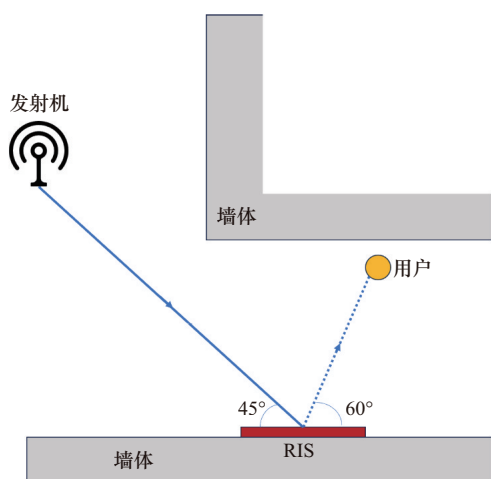


图2 单波束系统的仿真场景设置(俯视图)

在单波束场景下，接收机在距离 RIS 4 m 处各方位角上，目标方向为 60°（已在图3中用黑色纵向细线标出），分别采用不同波束成形方法生成的 RIS 相位配置所对应的接受功率，其对比如图3所示。仿真结果表明，在目标方向上，本文提出的半正定规划法使接收机接收功率分别比相位补偿法和贪婪算法高出 1.401 6 dBm 和 0.997 0 dBm。尽管该方法具有更高的计算复杂度，但仍适用于对波束成形性能要求高的场景。

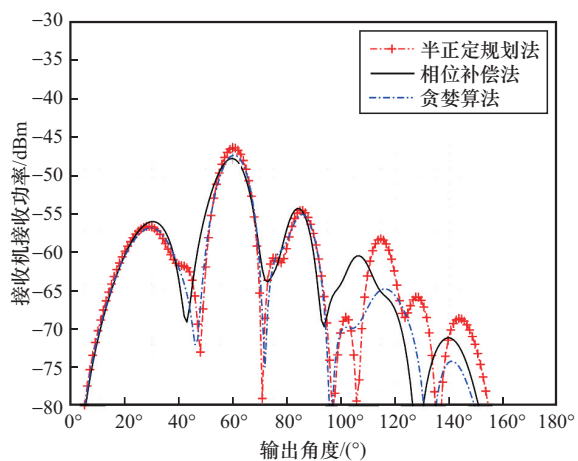


图3 单波束场景下不同方法的接收机接收功率对比

接收功率随 RIS 阵元数量的变化如图4所示。由图4可以看出，在所对比的3种波束成形算法下，接收功率差异不大，且整体均随阵元数增加

而提升。理论上，接收功率与阵元数量的平方近似成正比。然而，当阵元规模超过一定阈值后，边际增益显著下降，硬件成本、校准复杂度及部署难度却大量增长。综合考虑性能增益与工程实现成本，256 单元的 RIS 在覆盖增强与实用性之间取得了良好平衡，展现出较强的工程应用潜力。

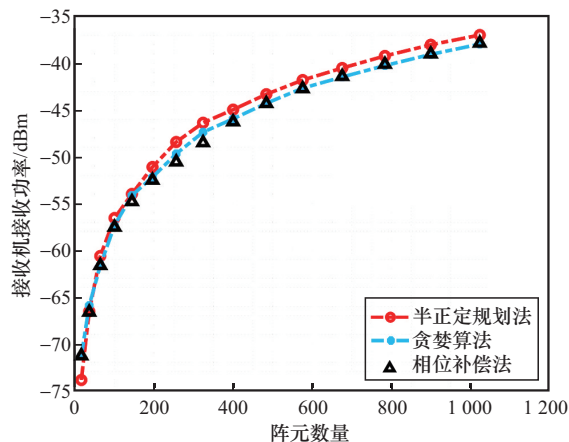


图4 接收功率随RIS阵元数量的变化

2.4 多波束场景的 RIS 波束成形

在实际通信系统中，多用户并发访问场景更为普遍。为提升 RIS 在密集用户环境下的覆盖与容量，本节将单波束成形算法系统性地扩展至多波束协同优化框架，重点解决多用户波束空间功率分配的设计问题。

2.4.1 基于几何映射的启发式多波束成形方法

多波束场景下的几何映射法主要有两种实现策略：子阵分块法和相位线性叠加法。

子阵分块法：将 RIS 阵列分割为 M 个独立子表面（ K 为用户数），每个子表面对应服务一个用户。子阵划分方案及其波束成形策略可根据情况灵活选择。该算法的计算复杂度为 $\mathcal{O}(N)$ 。

相位线性叠加法的计算过程如下：（1）分别计算单用户场景下每个用户的相位配置；（2）将所得相位配置映射到复数域并进行线性叠加；（3）对叠加结果进行归一化处理，并进行 1-bit 相位量化以生成最终码本。该算法的计算复杂度



为 $\mathcal{O}(MN)$ 。

2.4.2 基于SOP的RIS多波束码本设计方法

上述几何映射法存在明显不足：子阵分块法的有效辐射孔径会随分块数量增加而锐减，由于波束增益与相干辐射单元数的平方成正比，分块操作将导致严重的阵列增益损失^[21]。相位线性叠加法则难以同时满足不同用户的最优相位需求，容易引起波束主瓣畸变和旁瓣泄漏。与此同时，1-bit量化会进一步引入相位失真。为解决上述增益损失与相位离散问题，本节将第2.2.2节中的单用户SDP框架推广至多波束场景，建立相应的优化方法。

在多波束场景下，所有用户的总接受功率可表示为 $\sum_{i=1}^n |y_i|^2$ 。令 $R = R_1 + \dots + R_n$ ，则总功率可以写为：

$$\sum_{i=1}^n |y_i|^2 = w^H R w \quad (17)$$

以每个用户的接收功率不低于阈值 D 为约束，该优化问题可表述为：

$$\max_w w^H R w \quad (18)$$

$$\text{s.t. } |w_i| = 1, \forall i = 1, \dots, N \quad (19)$$

$$w^H R_i w \geq T, \forall i = 1, \dots, n \quad (20)$$

延续单用户系统中半正定规划的设计思路，将优化问题重构为如下形式：

$$\max_W \text{tr}(RW) \quad (21)$$

$$\text{s.t. } W \succeq 0, \text{rank}(W) = 1, |W_{ii}| = 1. \quad (22)$$

$$\text{tr}(R_i W) \geq T, \forall i = 1, \dots, n \quad (23)$$

通过秩一约束，将原问题转化为一个SDP问题，从而利用凸优化方法高效求解。此外，还可以通过为不同用户的接收功率矩阵引入系数，灵活调控功率的分配。该算法的复杂度为： $\mathcal{O}(N^6)$ 。

该场景下的优化问题也可建模为一类max-min公平性优化问题。可以引入一种基于最大化最小值的序列二次规划法（sequential quadratic programming, SQP）进行求解^[22]。该方法虽可

通过调用现有函数方便实现，但其直接求解仅适用于连续变量，需要对最终结果进行额外的量化处理。具体算法细节本文不再赘述。该算法的复杂度为： $\mathcal{O}(DN^3)$ ，其中 N 为RIS单元数量， D 为迭代次数。

2.5 多波束场景的RIS波束成形仿真

多波束系统的仿真场景设置如图5所示。其中，基站与RIS的方位夹角为 90° ，间距为 10 m ；用户分别位于相对于RIS方位角 30° 、 60° 、 120° 和 150° 的方向上（已在图6中用黑色纵向细线标出），且与RIS的距离均为 3 m 。由于墙体遮挡，所有用户与基站之间的直连链路均处于NLoS状态。

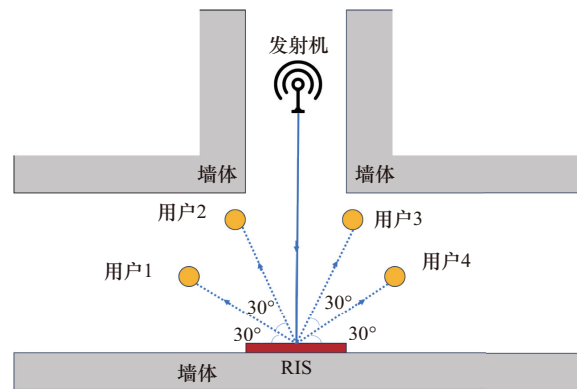


图5 多波束系统的仿真场景设置(俯视图)

多波束场景下，不同波束成形方法生成的RIS码本在接收机距离RIS 3 m 处各个方位角上的接收功率分布对比，结果如图6所示。从图6可以看出，在预设的 30° 、 60° 、 120° 和 150° 目标方向上，本文提出的SDP方法获得的平均接收功率比二次规划法、RIS分块法和线性叠加法分别高出 $1.609\ 4\text{ dBm}$ 、 $5.188\ 8\text{ dBm}$ 、 $1.621\ 1\text{ dBm}$ 。此外，还可以观察到，SDP方法在4个方向上的接收功率几乎相等，说明其能够实现较为均衡的功率分配。运算复杂度方面，SDP方法和二次规划法高于RIS分块和线性叠加法。综上，本文所提SDP方法适用于对波束成形与功率分配要求较高的场景，而线性叠加法适用于对实时性要求

较高的场景。

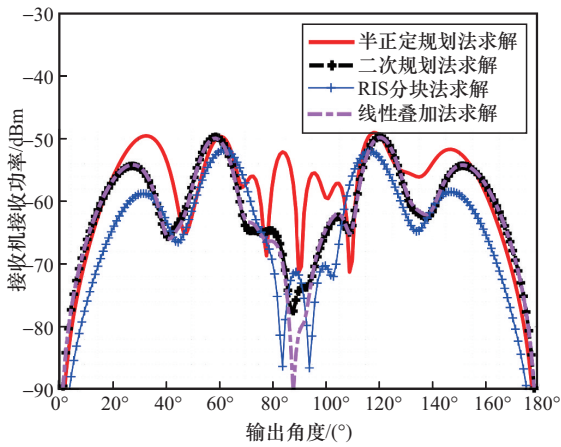


图6 多波束场景下不同方法的接收机接收功率对比

3 覆盖增强仿真与实验分析

为验证 RIS 对目标区域的覆盖增强性能，分别以独立小基站和现网环境为信源构造 L 形墙体遮挡进行覆盖增强测试。其中墙体的材质均是钢筋混凝土。经前期研究测试发现，在该场景下 RIS 的反射径占据主导地位，可以忽略较弱的多径。

3.1 基于独立小基站环境的仿真与实验分析

基于小基站的覆盖增强仿真与实验场景如图 7 所示。在 L 形墙体测试场景中，基站部署于墙体一侧，为其周边区域提供无线覆盖。然而，因墙体遮挡，信号在目标区域内形成非视距传输条件，通信质量显著下降。为此，在适当位置部

署 RIS，构建一条可控的反射链路，以补充原有传输路径，从而增强目标区域内的信号覆盖质量与通信可靠性。

仿真设置中，发射机、接收机与 RIS 均位于同一水平面内，且收发天线均对准 RIS 面板中心。发射信号以固定入射角 60° 照射 RIS，发射端与 RIS 间的距离为 2.6 m，基站发射功率为 10 dBm，阴影衰落为 10 dB。在测试区域内沿直线等间距选取 4 个点位，相邻点位间隔 1 m。移动接收机至每个点位进行仿真和实验，以 RSRP 作为性能指标，每个点位的仿真结果均为 100 次独立仿真的平均值。

基于独立小基站的测试步骤如下。

步骤 1 确定小基站的信源天线高度、频率等参数，并明确待优化区域。

步骤 2 在手机安装测试白卡，进行部署前测试，确认当前占用基站，完成覆盖质量测试。

步骤 3 根据现场几何位置，将 RIS 放置在目标覆盖路段的路口，根据信号源天线位置调整 RIS 反射角度为 105°，并记录 RIS 入射角和反射角。

步骤 4 使用雷达模块感知用户位置，并上传至上位机进行码本计算并配置 RIS。

步骤 5 进行部署后测试，对待优化区域进行打点测试，记录 RSRP 指标。

步骤 6 将反射角度依次调整为 120°、135° 和 150°，重复步骤 4 至步骤 5。

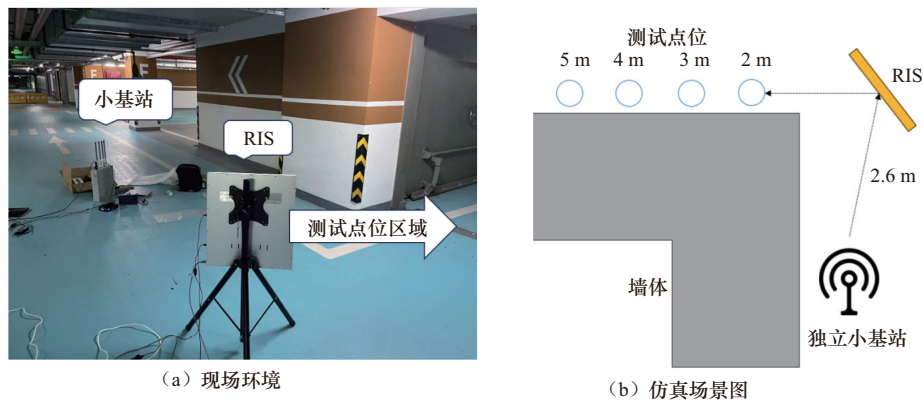
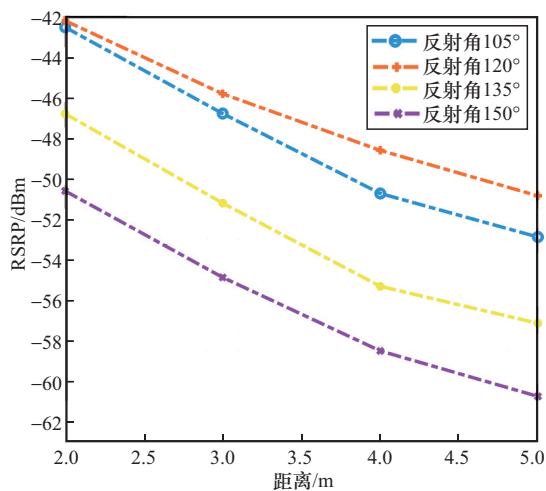


图7 基于小基站的覆盖增强仿真与实验场景图

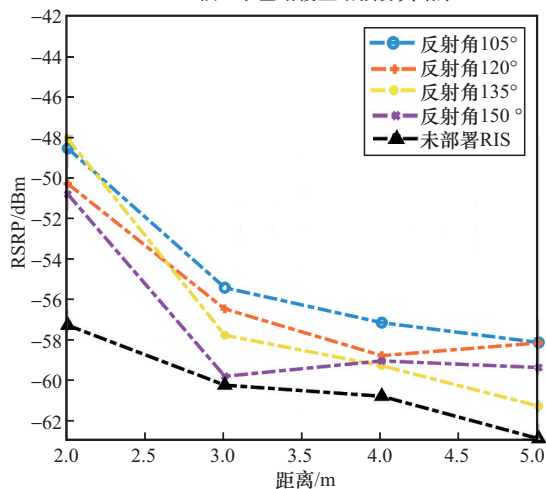


基于小基站的覆盖增强仿真与测试结果如图8所示。图8(a)展示了在该场景下,入射角为 60° 时,不同反射角与传输距离对应的接收信号功率仿真结果。在该仿真中,基站部署于RIS前方2.6 m处,用户与RIS间距离由2 m变化至5 m。由仿真结果可见,在反射角为 105° 与 120° 时,接收功率显著较高,显示出明显的波束成形效果。

图8(b)呈现了基于小基站的覆盖增强测试结果。对比可知,仿真结果与测试数据吻合良好。在部署RIS并配置合适的码本后,系统可获得接近10 dB的增益,验证了所提方法在实际环境中的可行性与准确性,具备良好的工程应用潜力。



(a) 独立小基站覆盖增强仿真结果



(b) 独立小基站覆盖增强测试结果

图8 基于小基站的覆盖增强仿真与测试结果

3.2 基于现网环境的覆盖增强实验分析

为验证RIS在实际无线环境中的波束成形性能与覆盖增强效果,在某地下停车场开展了外场实验。实验区域经前期覆盖测试确认为信号弱覆盖区,适合构建NLoS传输场景,从而可用于部署RIS进行性能验证。

基于现网的覆盖增强实验场景如图9所示。前期测试发现,停车场右下角区域存在信号弱覆盖区域。为准确评估RIS的覆盖增强效果,实验首先对该弱覆盖区进行了详细测量与精确定位,明确了覆盖盲区的具体范围与信号强度分布。在此基础上,结合现场布局与信号传播特性,选取了合适的RIS部署位置,以对该区域进行定向信号增强。该部署策略旨在验证RIS在真实场景下对弱覆盖问题的改善能力。

基于现网环境的实验步骤如下。

步骤1 进行部署前测试,明确信号弱覆盖区域。

步骤2 根据现场几何位置,将RIS放置在目标覆盖路段的路口(如图9所示),根据信号源天线位置调整RIS反射角度为 105° ,并记录RIS入射角和反射角。

步骤3 使用雷达模块感知用户位置,上传至上位机进行码本计算并配置RIS。

步骤4 进行部署后测试,对待优化区域进行打点测试,记录RSRP指标。

步骤5 将反射角度调整为 120° 、 135° 和 150° ,重复步骤3和步骤4。

基于现网环境的覆盖增强实验结果如图10所示。直观来看,在反射角为 105° 和 120° 时,RIS实现了较为显著的覆盖增强效果。一般认为RSRP测量值 ≥ -95 dBm为优覆盖区; -105 dBm \leq RSRP测量值 < -95 dBm为良覆盖区; -110 dBm \leq RSRP测量值 < -105 dBm为弱覆盖区;RSRP测量值 < -110 dBm为极弱覆盖区。目标区域测试点位的覆盖质量分布见表2。

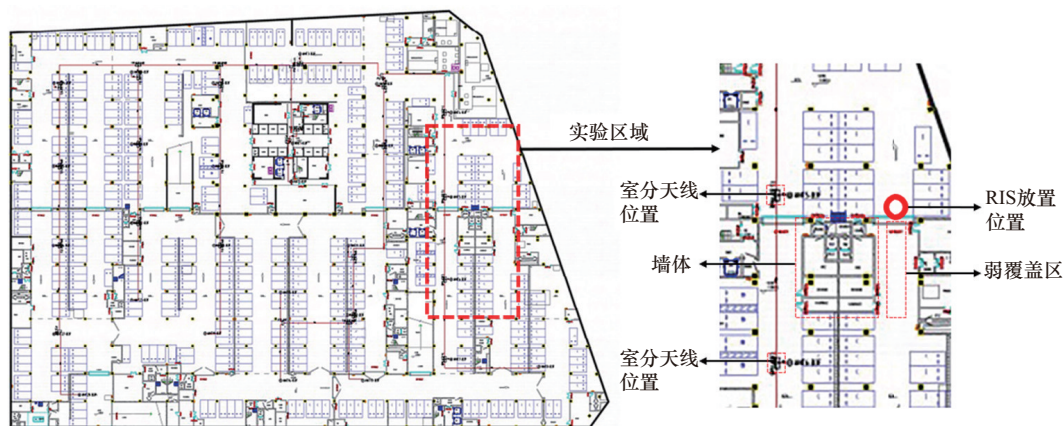


图9 基于现网的覆盖增强实验场景

表2 覆盖质量分布

RIS 部署情况	优覆盖区比例	良覆盖区比例	弱覆盖区比例	极弱覆盖区比例
未部署RIS	0	0	88.89%	11.11%
RIS反射角105°	44.44%	55.56%	0	0
RIS反射角120°	44.44%	55.56%	0	0
RIS反射角135°	11.11%	77.78%	11.11%	0
RIS反射角150°	0	77.78%	22.22%	0

3.3 实验结论

本节聚焦于RIS辅助的无线通信系统，通过构建仿真模型并开展实际场地测试，分析了收发节点间距与RIS波束成形角度对通信覆盖性能的影响。研究选取地下停车场作为典型场景，分别构建了基于独立小基站和室内分布系统的测试环境，系统评估了RIS的覆盖增强效果。测试中固定发射端与RIS部署位置，在覆盖区域内选择不同测试点移动接收端，并动态调整RIS的相位配置（即码本），以调整其反射波束指向。仿真与

实测结果均表明：经过优化的码本设计可使RIS有效提升覆盖性能10 dB以上，验证了其覆盖增强能力。在两种测试架构下，当RIS反射波束角度配置为105°与120°时，系统性能均能达到最优，目标区域内不存在弱覆盖区。实验结果表明，通过合理配置RIS的反射角度，可有效提升信号覆盖质量，验证了所提波束成形算法的有效性。

4 结束语

在现有研究中，RIS的相位配置多被假设为连续变化。然而，受实际硬件复杂度的制约，RIS通常仅支持离散相移。这一约束导致多数现有波束成形方案难以达到理论最优性能，且相关研究多集中于单波束场景，对多波束场景的研究尚不充分。对此，本文提出一种基于SDP的波束成形设计方法：通过松弛技术转化原问题的非凸

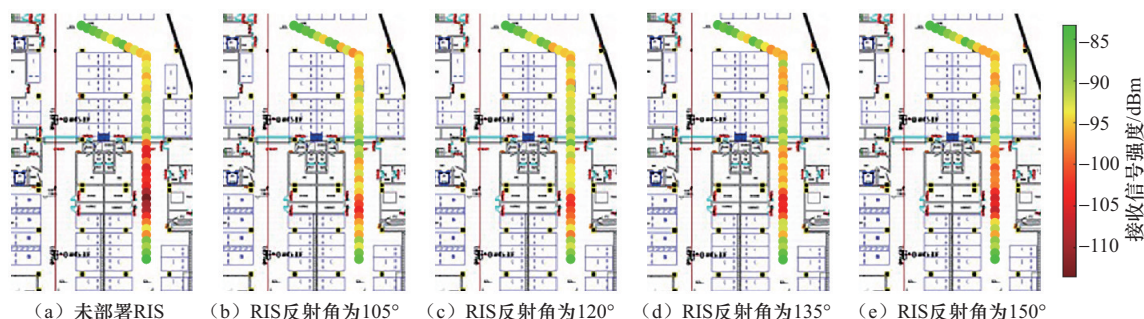


图10 基于现网环境的覆盖增强实验结果



约束, 并引入结构化线性约束促使解收敛至离散可行域。该方法不仅天然满足离散相位的需求, 还可便捷地拓展到多波束场景。在独立小基站和现网环境下, 本文分别部署 3.5 GHz 频段的 256 单元 1-bit RIS, 并开展覆盖增强实验。实验结果表明, 通过合理的部署和码本配置, RIS 可以使用户的 RSRP 获得接近 10 dBm 的提升, 验证了 RIS 的覆盖增强能力和所提算法的有效性。综上所述, 所提算法可有效适配硬件离散约束, 结合合理的 RIS 部署与相位优化, 能显著增强通信覆盖质量。

受限于研究聚焦范围与实验条件, 本文工作仍存在若干可拓展之处。首先, 算法仿真环境下假设雷达模块可以精准地获取用户位置, 该假设在实际中存在误差, 后续研究需要引入雷达测量误差分析, 以提升模型的实用性。其次, 所提出的 SDP 优化算法虽能有效逼近全局最优解, 但其计算复杂度较高, 难以满足超低时延通信等实时性要求严苛场景的需求。未来将探索基于深度学习或低复杂度启发式策略的替代方案, 实现性能与效率的更好平衡。

参考文献:

- [1] 王荣, 贾少波, 张迪, 等. 智能反射面辅助的物理层安全技术综述[J]. 移动通信, 2022, 46(6): 52-59.
Wang R, Jia S B, Zhang D, et al. A review on intelligent reflecting surface-assisted physical layer security technology[J]. *Mobile Communications*, 2022, 46(6): 52-59.
- [2] Mei W D, Zheng B X, You C S, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless networks: from single-reflection to multireflection design and optimization[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2022, 110(9): 1380-1400.
- [3] Renzo M D, 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.
- [4] Liu Y W, Liu X, Mu X D, et al. Reconfigurable intelligent surfaces: principles and opportunities[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(3): 1546-1577.
- [5] 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): 5395-5409.
- [6] Nadeem Q, Kammoun A, Chaaban A, et al. Asymptotic max-min SINR analysis of reconfigurable intelligent surface assisted MISO systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(12): 7748-7764.
- [7] Yang Y F, Zheng B X, Zhang S W, et al. Intelligent reflecting surface meets OFDM: protocol design and rate maximization[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(7): 4522-4535.
- [8] Ye J, Guo S S, Alouini M A. Joint reflecting and precoding designs for SER minimization in reconfigurable intelligent surfaces assisted MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(8): 5561-5574.
- [9] Zhang T C, Mao S W. Joint beamforming design in reconfigurable intelligent surface-assisted rate splitting networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(1): 263-275.
- [10] Ren S Y, Shen K M, Li X, et al. A linear time algorithm for the optimal discrete IRS beamforming[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(3): 496-500.
- [11] Ren S Y, Shen K M, Zhang Y W, et al. Configuring intelligent reflecting surface with performance guarantees: blind beamforming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(5): 3355-3370.
- [12] Lai W H, Shen K M. Blind beamforming for intelligent reflecting surface: a reinforcement learning approach[C]//*Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 8956-8960.
- [13] Wang W Y, Lai W H, Ren S Y, et al. Adaptive beamforming for non-line-of-sight IRS-assisted communications without CSI[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [14] ChêNe T, Othman G R B. Adaptive Bayesian method for RIS passive beamforming[C]//*Proceedings of the 2024 19th International Symposium on Wireless Communication Systems*

(ISWCS). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-6.

- [15] 周儒雅. 基于智能超表面的新型无线覆盖关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
Zhou R Y. Research on key technologies for novel wireless coverage based on intelligent reflecting surfaces [D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [16] 吴俊杰, 罗雷, 朱策, 等. 面向智能反射面辅助的无线视频软传输联合资源优化算法[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(8): 2630-2641.
Wu J J, Luo L, Zhu C, et al. Joint resource optimization algorithm for intelligent reflective surface assisted wireless soft video transmission[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2025, 47(8): 2630-2641.
- [17] Yildirim I, Uyrus A, Basar E. Modeling and analysis of reconfigurable intelligent surfaces for indoor and outdoor applications in future wireless networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(2): 1290-1301.
- [18] Tang W K, Chen M Z, Chen X Y, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: path loss modeling and experimental measurement[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(1): 421-439.
- [19] 费丹, 陈晨, 郑鹏, 等. 基于智能超表面的室内覆盖增强技术与实验验证[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(7): 2374-2381.
Fei D, Chen C, Zheng P, et al. Research and experimental verification of reconfigurable intelligent surface in indoor coverage enhancement[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(7): 2374-2381.
- [20] 何锦涛, 王灿, 王明超, 等. 基于改进双深度Q网络的微电网群能量管理策略[J]. 中国电力, 2025: 1-13.
He J T, Wang C, Wang M C, et al. Energy management strategy for microgrid clusters based on improved double deep Q-network[J]. China Electric Power, 2025: 1-13.
- [21] 李光辉. 智能超表面赋能的毫米波大规模MIMO系统分析与设计[D]. 大连: 大连海事大学, 2024.
Li G H. Analysis and design of intelligent reflecting surface empowered millimeter-wave massive MIMO systems [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2024.
- [22] 闫琛昕. MIMO携能传输信道中多用户的SINR公平性优化算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
Yan C X. Research on SINR fairness optimization algorithm for multi-user in MIMO SWIPT channels [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.

[作者简介]



杨祖源 (2002-), 男, 郑州大学电气与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为智能反射面和无线通信。



王宁 (1982-), 男, 郑州大学电气与信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信、信息安全、统计信号处理等。



申凌峰 (1992-), 男, 河南大学软件学院讲师, 主要研究方向为5G/6G通信、无人机通信、物联网、高精度定位等。



张千坤 (1992-), 男, 中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司工程师, 主要研究方向为信号处理、通信感知一体化、5G移动通信。



陈任翔 (1978-), 男, 中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司高级工程师, 主要研究方向为通信感知一体化、5G移动通信。



贾少波 (1988-), 男, 郑州大学电气与信息工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为物理层安全、反向散射通信、智能反射面辅助通信、水声探测与通信等。