

智能超表面辅助无线供电通信网络的波束成型与资源分配方案

郭漪, 郭颖欣*, 刘刚*, 付少忠

西安电子科技大学空天地一体化综合业务网全国重点实验室, 西安 710071

* 通信作者. E-mail: gyingxin1126@163.com, liugang@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2024-12-25; 修回日期: 2025-03-10; 接受日期: 2025-05-13; 网络出版日期: 2026-01-06

国家自然科学基金(批准号: 62171354)和陕西省自然科学基金(批准号: 2024JC-YBMS-533)资助项目

摘要 针对未来物联网中众多无线传感设备面临的能量受限问题、服务质量 (quality of service, QoS) 需求方面存在差异, 以及无线供电通信网络 (wireless powered communication network, WPCN) 中普遍存在的“双远近”问题, 本文研究了一种智能超表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 辅助分离架构的 WPCN 系统模型, 通过联合优化有源波束成型、无源波束成型和资源分配, 旨在最大化设备的加权和能量效率. 针对优化问题, 提出了一种基于加速近端距离算法 (accelerated proximal distance algorithm, A-PDA) 的波束成型与资源分配方案. 该方案利用分式规划解耦优化问题, 交替优化各个子问题, 直至收敛得到最终解, 其中首次采用 A-PDA 得到 RIS 相移矢量的闭式解. 仿真结果表明, 相较于经典优化方案, 所提方案能够快速收敛, 有效降低了平均运行时间, 并且表现出优异的加权和能效性能, 尤其在小发射功率场景下的能效提升更为显著.

关键词 智能超表面, 无线供电通信网络, 波束成型, 资源分配, 近端距离算法

1 引言

5G 和物联网的迅速发展推动了万物互联和深度覆盖的实现, 然而由于设备数量的急剧增长、部署环境的复杂多变, 传统的电线或电池供电方案无法满足当前物联网设备的需求^[1,2]. 为实现广泛的通信连接和长期的能源供应, 无线供电通信网络 (wireless powered communication network, WPCN) 通过无线能量传输 (wireless energy transmission, WET) 有效缓解了设备能量受限的问题^[3]. WPCN 采用先采集后传输 (harvest-then-transmit, HTT) 协议, 能量受限设备先采集基站发射的能量, 随后利用收集到的能量进行无线信息传输 (wireless information transmission, WIT)^[4], 通过有效的时间分配, 既解决了传统无线通信网络供电困难的问题, 又保证了能量和信息的完整传输并优化系统性能, 从而延长设备的生命周期. 但是无线信道的损伤严重限制了 WPCN 的覆盖范围与通信性能, 甚至导致链路中断. 此外, 对于混合部署架构的 WPCN 系统, 即将能量发射站 (power station, PS) 和信息接收站 (receiving station, RS) 集成为一个混合接入点 (hybrid access point, HAP), 可能会产生严重的“双远近”(doubly near-far) 问题, 从而限制了系统性能, 甚至导致链路中断^[5], 具体地, “双远近”问题是指在混合部

引用格式: 郭漪, 郭颖欣, 刘刚, 等. 智能超表面辅助无线供电通信网络的波束成型与资源分配方案. 中国科学: 信息科学, 2026, 56: 203–215, doi: 10.1360/SSI-2024-0388

Guo Y, Guo Y X, Liu G, et al. Beamforming and resource allocation for reconfigurable intelligent surface assisted wireless powered communication network. Sci Sin Inform, 2026, 56: 203–215, doi: 10.1360/SSI-2024-0388

署架构的 WPCN 系统中, 无线设备距离 HAP 越远, 遭受的路径损耗越严重, 因此收集到的能量大幅减少, 与距离 HAP 近的设备相比, 却需要消耗更多的能量将信息传输到 HAP, 使得设备在维持运行方面更具挑战性. 为此, 文献 [6] 提出了部署专用的能量发射站, 这种将 PS 与 RS 分开部署的 WPCN 系统, 即分离部署架构的 WPCN, 从根本上解决了“双远近”问题, 实现了系统性能的优化^[7,8]. 考虑到未来通信网络的复杂性, 文献 [9] 针对多集群 WPCN, 以最大化所有用户的最小吞吐量为目标, 有效保障了用户间的公平性. 文献 [10] 研究了 5G/B5G 中毫米波 WPCN 系统, 提出了一种两阶段资源分配算法, 旨在提高能量收集效率的同时, 最大化上行链路的能量效率.

为进一步解决路径损耗与“双远近”问题, 智能超表面 (reconfigurable intelligence surface, RIS) 作为一种新兴的关键技术, 由大量低成本、可编程的无源反射单元组成, 通过控制入射信号的幅度和相位, 能够有效引导信号传输到期望的方向以增强通信性能^[11,12]. RIS 结构简单, 既不使用射频发射模块, 也不需要复杂的信号处理技术, 相较于基站与传统中继, 实现了更低的能量成本和硬件成本. 此外, RIS 能够灵活地部署在墙面、天花板等位置, 更加适应复杂的应用环境. 许多研究人员针对 RIS 辅助的通信系统展开了深入研究, 例如 RIS 辅助的单输入单输出 (single input single output, SISO) 系统^[13]、多输入单输出 (multiple input single output, MISO) 系统^[14,15]、非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 系统^[16,17]、无人机通信^[18]等, 通过仿真验证了 RIS 在提高通信系统的可靠性、增强信号覆盖, 以及优化网络性能等方面表现出明显优势. 文献 [13] 详细分析了 RIS 辅助 SISO 通信系统的性能, 推导出了遍历容量的闭式上限, 并获得了中断概率的精确近似值. 针对 RIS 辅助的 MISO 系统, 文献 [15] 提出了一种交替优化算法, 旨在最大化加权和速率. 文献 [17] 考虑到 5G 无线网络的广泛部署, 将 RIS 引入到具有更高频谱效率的 NOMA 系统, 并提出了一种基于逐次凸逼近 (successive convex approximation, SCA) 和松弛的低复杂度算法, 获得了比正交多址接入 (orthogonal multiple access, OMA) 方案更优越的能效性能. 为应对物联网设备数量激增所带来的挑战, 文献 [18] 将 RIS 部署在无人机上以辅助大范围通信, 并提出了一种旨在最大化系统能效的优化算法.

目前, 许多学者将 RIS 部署到 WPCN 系统中, 通过 RIS 智能的信号反射, 能够以极低的能量成本与硬件成本有效地重塑信道环境以增强通信性能, 从而它有望解决无线信道损伤带来的 WPCN 能量和信息传输效率低下的问题. 文献 [19] 通过联合优化时间和功率分配、RIS 相移矩阵, 以最小化 HAP 的传输能耗. 相较于时分多址 (time division multiple access, TDMA), NOMA 能够在相同的时频资源上服务更多的用户, 提升系统的多用户复用能力, 成为 6G 技术的关键候选方案之一^[20]. 文献 [21] 考虑到通信系统高效传输、广泛覆盖的要求, 研究了 RIS 辅助的 NOMA-WPCN 网络, 提出了一种基于半正定松弛 (semidefinite relaxation, SDR) 的方法, 通过联合优化 RIS 相移和资源分配最大化总吞吐量. 文献 [22] 针对多天线 HAP, 联合优化有源、无源波束成型以及资源分配, 提出了一种基于 SDR 和 SCA 的交替优化算法, 以最大化总传输容量. 以上基于 SDR 的方法还需要采用高斯 (Gauss) 随机化得到 RIS 相移的可行解, 但该方法复杂度较高并且只能获得近似解. 文献 [23] 研究了灾难场景下, RIS 辅助 WPCN 提供可靠的通信和供电, 采用 SCA 结合罚函数的低复杂度算法, 旨在最小化灾情信息的传播时间. 针对“双远近”问题, 文献 [24] 采用了分离架构的 WPCN, 在有源 RIS 的辅助下, 以最大化和速率为目标, 提出了一种基于交替迭代的算法. 研究表明, RIS 的优势与 WPCN 的核心目标高度契合, 即为能量受限设备提供高效能量传输的同时, 实现可靠的信息传输. 同时, RIS 辅助的 WPCN 系统在提高无线通信系统性能方面具有很好的应用潜力.

现有的 RIS 辅助 WPCN 系统的研究主要集中于 WPCN 的混合部署架构, 通过联合优化资源分配与 RIS 反射系数来最大化系统的吞吐量或最小化发射功率. 然而, 这种混合部署的网络模型会产生严重的“双远近”问题, 且忽略了 WPCN 信息传输和能量消耗之间的权衡, 因此, 提高 WPCN 系统中众多设备的能量效率更符合未来万物互联场景的需求. 针对这一问题, 本文首次考虑 RIS 辅助分离架构的 WPCN 系统中不同设备通信权重的场景, 提出一种以最大化设备加权和能效为目标的波束成型与资源分配方案. 本文的主要创新点如下.

(1) 首次考虑在物联网无线传感设备能量受限的场景下, RIS 和 NOMA 辅助分离架构的 WPCN 系统, 并根据不同设备的服务质量 (quality of service, QoS) 需求, 研究了设备加权和能效最大化问题. 通过联合优化 PS 和 RS 的有源波束成型、RIS 无源波束成型、时间分配以及设备的发射功率分配, 旨在最大化设备的加权和能效.

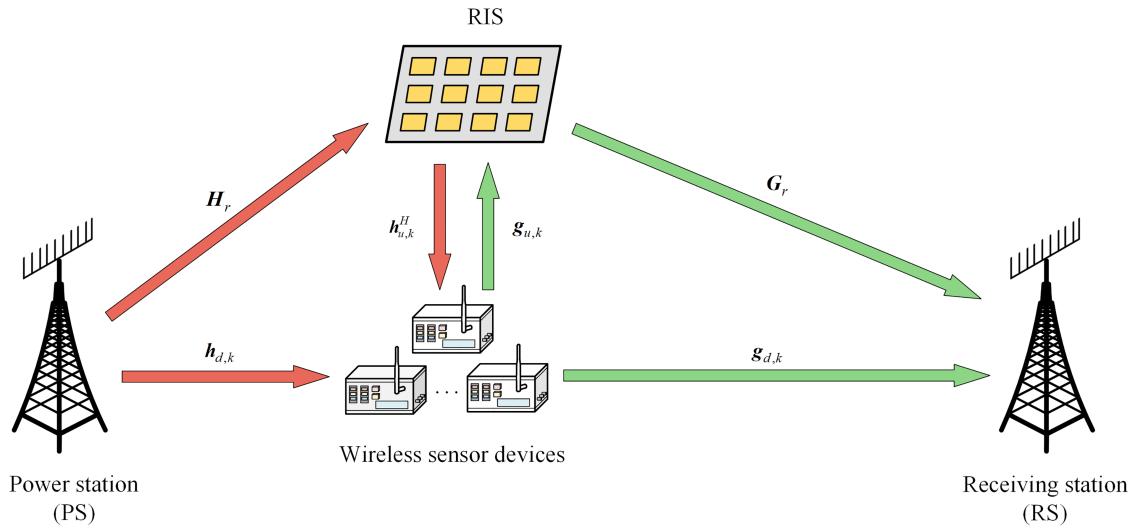


图 1 (网络版彩图) RIS 辅助的 WPCN 系统。

Figure 1 (Color online) RIS-assisted WPCN system.

(2) 为了解决本文研究的优化问题, 提出了一种基于加速近端距离算法 (accelerated proximal distance algorithm, A-PDA) 的波束成型与资源分配方案. 所提方案通过多次分式规划解耦优化问题, 交替优化波束成型与资源分配变量直至收敛. 交替优化中, 采用 A-PDA 求解 RIS 无源波束成型的非凸二次约束二次规划 (quadratic constrained quadratic programming, QCQP) 子问题. 理论分析证明了所提方案在收敛性和复杂度方面的优越性.

(3) 仿真结果表明, 相较于其他方案, 所提方案能够更快速地收敛, 并且在小发射功率场景下表现出更加优异的加权和能效性能, 相较于经典的基于 SDR 和黎曼流形优化 (Riemannian manifold optimization, RMO) 方案, 所提方案的平均运行时间显著降低, 更适用于实时大规模场景.

2 系统模型及优化问题

2.1 RIS 辅助分离架构的 NOMA-WPCN 系统

本文考虑如图 1 所示的 RIS 辅助分离架构的 NOMA-WPCN 系统. 图中, 系统配备 1 个能量发射站 PS、1 个信息接收站 RS、 K 个能量受限的无线传感设备, 以及 1 个具有 N 个反射单元的无源 RIS. 其中, PS 和 RS 分别配备 M 根天线和 Q 根天线, 无线传感设备均为单天线. 根据 HTT 协议, 总持续时间 T 被分成两个阶段, 即能量传输阶段 t_0 和信息传输阶段 t_1 . 将整个过程的时间进行归一化, 有 $t_0 + t_1 = 1$. 不失一般性, 假设所有信道均为准静态平坦衰落, 且信道状态信息 (channel state information, CSI) 为完美 CSI^[22]. 能量传输阶段, PS 到 RIS, RIS 到设备 k , PS 到设备 k 的信道分别表示为 $\mathbf{H}_r \in \mathbb{C}^{N \times M}$, $\mathbf{h}_{u,k}^H \in \mathbb{C}^{1 \times N}$, $\mathbf{h}_{d,k} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$; 信息传输阶段, 设备到 RIS, RIS 到 RS 以及设备到 RS 的信道分别表示为 $\mathbf{g}_{u,k} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, $\mathbf{G}_r \in \mathbb{C}^{Q \times N}$, $\mathbf{g}_{d,k} \in \mathbb{C}^{Q \times 1}$. RIS 对角化反射系数矩阵为 $\boldsymbol{\Theta}_i = \text{diag}(\boldsymbol{\theta}_i) \in \mathbb{C}^{N \times N}$, 其中 $\boldsymbol{\theta}_i = [\text{e}^{\text{j}\varphi_{i,1}}, \text{e}^{\text{j}\varphi_{i,2}}, \dots, \text{e}^{\text{j}\varphi_{i,N}}]^H$, $i \in \{0, 1\}$ 表示 WET/WIT 阶段 RIS 的反射系数向量, $\varphi_{i,n} \in [0, 2\pi]$ 表示 WET/WIT 阶段下 RIS 第 n 个元件的相移.

在 WET 阶段, PS 在 t_0 的持续时间内广播能量信号, 设备均采用线性能量收集模型. 设 $\mathbf{w}_0 \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 表示发射波束成型向量, 则设备 k 收集的能量为

$$\begin{aligned} E_k &= \eta_k t_0 |(\mathbf{h}_{d,k}^H + \mathbf{h}_{u,k}^H \boldsymbol{\Theta}_0 \mathbf{H}_r) \mathbf{w}_0|^2 \\ &= \eta_k t_0 |\mathbf{h}_k \mathbf{w}_0|^2, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, η_k ($0 < \eta_k \leq 1$) 表示能量收集效率.

在 WIT 阶段, 所有设备利用其收集到的能量, 通过 NOMA 技术向 RS 传输各自信息. 设 $s_{u,k}$ 表示设备 k 发送的数据符号, p_k 表示设备 k 的发射功率, 则 RS 接收到来自 k 个设备的信号可以表示为

$$\begin{aligned} u_k &= \boldsymbol{\omega}_k^H \left(\sum_{k=1}^K (\mathbf{g}_{d,k} + \mathbf{G}_r \boldsymbol{\Theta}_1 \mathbf{g}_{u,k}) \sqrt{p_k} x_{u,k} + \mathbf{n}_r \right) \\ &= \boldsymbol{\omega}_k^H \sum_{k=1}^K \mathbf{g}_k \sqrt{p_k} x_{u,k} + \boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{n}_r, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{n}_r \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_1^2 \mathbf{I})$ 是 RS 接收端天线引入的高斯白噪声, $\boldsymbol{\omega}_k \in \mathbb{C}^{Q \times 1}$ 表示 RS 接收波束成型矢量. 在 RS 处使用串行干扰消除 (successive interference cancellation, SIC) 技术. 由于信道质量差的设备更容易受到信道质量良好设备的干扰, 因此优先解码具有良好信道条件的设备^[25]. 假设所有设备的信道增益排序为 $|\mathbf{g}_1|^2 \geq |\mathbf{g}_2|^2 \geq \dots \geq |\mathbf{g}_K|^2$, 在完美 SIC 之后, 第 k 个设备的速率可以表示为

$$\begin{aligned} R_k &= t_1 \log \left(1 + \frac{p_k |\boldsymbol{\omega}_k^H (\mathbf{g}_{d,k} + \mathbf{G}_r \boldsymbol{\Theta}_1 \mathbf{g}_{u,k})|^2}{\sum_{i=k+1}^K p_i |\boldsymbol{\omega}_k^H (\mathbf{g}_{d,i} + \mathbf{G}_r \boldsymbol{\Theta}_1 \mathbf{g}_{u,i})|^2 + \sigma_1^2 \boldsymbol{\omega}_k^H \boldsymbol{\omega}_k} \right) \\ &= t_1 \log (1 + \gamma_k). \end{aligned} \quad (3)$$

由于众多无线传感设备传输到 RS 的信息各不相同, 为了平衡不同设备之间的需求差异, 引入权重 β_k 来表示设备 k 的优先级顺序, 那么所有设备的加权和速率为

$$R_{\text{sum}} = t_1 \sum_{k=1}^K \beta_k R_k. \quad (4)$$

由于物联网中无线传感设备通常是能量受限的, 因此本文考虑无线传感设备的能量效率最大化. 设 P_k^c 是设备的电路功耗, 无线传感设备的总能耗可以表示为

$$E_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K P_k^c + \sum_{k=1}^K t_1 p_k. \quad (5)$$

2.2 设备加权和能效最大化问题

鉴于未来物联网通信场景中, 众多能量受限的无线传感设备在 QoS 需求上存在差异, 本文研究了一种 RIS 辅助的 WPCN 通信系统, 通过资源分配和波束成型的联合设计, 以最大化能量受限设备的加权和能效, 优化问题可以表示为 (P1):

$$(P1) : \max_{\mathbf{t}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\Theta}_0, \boldsymbol{\Theta}_1, \mathbf{w}_0, \boldsymbol{\omega}_k} f_a(\mathbf{t}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\Theta}_0, \boldsymbol{\Theta}_1, \mathbf{w}_0, \boldsymbol{\omega}_k) = \frac{R_{\text{sum}}}{E_{\text{sum}}}, \quad (6)$$

$$\text{s.t. } (t_0 + t_1) P_k^c + t_1 p_k \leq E_k, \forall k \in K, \quad (7)$$

$$t_0 + t_1 = 1, t_0 \geq 0, t_1 \geq 0, \quad (8)$$

$$p_k \geq 0, \forall k \in K, \quad (9)$$

$$|\theta_{i,n}|^2 = 1, \forall n = 1, \dots, N, i \in \{0, 1\}, \quad (10)$$

$$\|\mathbf{w}_0\|^2 \leq P_T, \quad (11)$$

其中, $\mathbf{t} = [t_0, t_1]$ 为两阶段消耗的传输时间, $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_K]$ 为 K 个设备的发射功率. 式 (7) 为设备的能量约束, 其中 E_k 为设备 k 收集到的能量; 式 (8) 为时间分配约束; 式 (10) 表示 WET 和 WIT 阶段 RIS 反射系数的恒模约束; 式 (11) 表示 PS 的发射功率约束, 其中 P_T 为 PS 的最大发射功率. 可以看出, 优化问题 (P1) 是一个非凸优化问题, 其目标函数不仅包含比值对数和问题, 还呈现出复杂的分式结构, 相较于传统的分式和或对数和问题更加复杂. 此外, 多变量的耦合以及非凸约束的存在使得优化问题难以直接求解.

3 基于 A-PDA 的波束成型与资源分配方案

为了解决上述非凸的优化问题,本节提出了一种基于 A-PDA 的交替优化方案,即首先采用分式规划解耦优化问题,然后通过线性规划、A-PDA、拉格朗日 (Lagrange) 对偶分解等方法交替优化各个子问题,最后循环迭代直至收敛,得到优化问题的最终解.

由于优化问题 $(P1)$ 的目标函数是复杂的分式形式,本文采用 Dinkelbach 法^[26] 将优化问题 $(P1)$ 转化为 $(P1')$

$$(P1') : \max_{\mathbf{t}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\Theta}_0, \boldsymbol{\Theta}_1, \mathbf{w}_0, \boldsymbol{\omega}_k} f_{a1}(\mathbf{t}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\Theta}_0, \boldsymbol{\Theta}_1, \mathbf{w}_0, \boldsymbol{\omega}_k) = R_{\text{sum}} - \alpha E_{\text{sum}}, \quad (12)$$

s.t. (7) \sim (11),

其中, $\alpha > 0$ 是引入的能效参数, 其最优值为 $\alpha^{\text{opt}} = R_{\text{sum}}/E_{\text{sum}}$.

3.1 时间分配优化

首先通过固定发射功率分配、有源和无源波束成型矩阵来优化时间分配 $\{t_0, t_1\}$. 对于固定的 $\{\mathbf{p}, \boldsymbol{\Theta}_0, \boldsymbol{\Theta}_1, \mathbf{w}_0, \boldsymbol{\omega}_k\}$, 问题 $(P1')$ 能够转化为优化问题 $(P2)$:

$$(P2) : \max_{t_1} t_1 \left(\sum_{k=1}^K \beta_k \log \left(1 + \frac{p_k |\boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_k|^2}{\sum_{i=k+1}^K p_i |\boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_i|^2 + \sigma_1^2 \|\boldsymbol{\omega}_k\|^2} \right) - \alpha \sum_{k=1}^K p_k \right) - \alpha \sum_{k=1}^K P_k^c, \quad (13)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq t_1 \leq 1 - \frac{P_k^c + p_k}{\eta_k |\mathbf{h}_k \mathbf{w}_0|^2 + p_k}, \forall k \in K. \quad (14)$$

由于优化问题 $(P2)$ 是一个关于 t_1 一维线性问题, 令 $c = \sum_{k=1}^K \beta_k \log \left(1 + \frac{p_k |\boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_k|^2}{\sum_{i=k+1}^K p_i |\boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_i|^2 + \sigma_1^2 \|\boldsymbol{\omega}_k\|^2} \right) - \alpha \sum_{k=1}^K p_k$, 得到最优的时间分配为

$$t_1^{\text{opt}} = \begin{cases} \min_k 1 - \frac{P_k^c + p_k}{\eta_k |\mathbf{h}_k \mathbf{w}_0|^2 + p_k}, & c > 0, \\ 0, & c \leq 0. \end{cases} \quad (15)$$

3.2 WIT 阶段 RIS 波束成型优化

由于优化问题 $(P1')$ 的目标函数中 R_{sum} 是关于比值对数和的问题, 首先针对速率表达式 $\beta_k t_1 R_k$, 采用拉格朗日对偶变换^[27], 将其转化为 $t_1 \frac{\beta_k (1+\mu_k) \gamma_k}{1+\gamma_k}$, 那么目标函数可以表示为 $t_1 \sum_{k=1}^K \frac{\beta_k (1+\mu_k) \gamma_k}{1+\gamma_k} - \alpha \sum_{k=1}^K P_k^c + t_1 p_k$, 此时目标函数中的被减数是一个多比求和的形式, 对其采用二次变换^[27] 将比值转化为差式的形式. 通过拉格朗日对偶变换和二次变换, 问题 $(P1')$ 转化为优化问题 $(P3)$:

$$(P3) : \max_{\mathbf{p}, \boldsymbol{\Theta}_0, \boldsymbol{\Theta}_1, \mathbf{w}_0, \boldsymbol{\omega}_k} f_b(\mathbf{p}, \boldsymbol{\Theta}_0, \boldsymbol{\Theta}_1, \mathbf{w}_0, \boldsymbol{\omega}_k)$$

$$= t_1 \sum_{k=1}^K \left(2 \sqrt{\mu_k p_k} \operatorname{Re} \{ \tau_k^* \boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_k \} - |\tau_k|^2 \left(\sum_{i=k}^K p_i |\boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_i|^2 + \|\boldsymbol{\omega}_k\|^2 \sigma_0^2 \right) \right) - \alpha \sum_{k=1}^K P_k^c + t_1 p_k, \quad (16)$$

s.t. (7), (9) \sim (11),

其中 μ_k 和 τ_k 分别是拉格朗日变换和二次变换引入的辅助变量, 其最优解分别为 $\mu_k^{\text{opt}} = \gamma_k$, $\tau_k^{\text{opt}} = \left(\sum_{i=k}^K p_i |\boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_i|^2 + \|\boldsymbol{\omega}_k\|^2 \sigma_0^2 \right)^{-1} \sqrt{\mu_k p_k} |\boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_k|^2$, 其中 $\widetilde{\mu_k} = \beta_k (1 + \mu_k)$.

通过上述分式规划, 将优化问题 $(P1')$ 转化为问题 $(P3)$. 通过固定其他变量来优化 WIT 阶段的 RIS 相移矩阵 $\boldsymbol{\Theta}_1$, 优化问题 $(P3)$ 可以被重写为单变量优化问题 $(P4)$

$$(P4) : \max_{\boldsymbol{\Theta}_1} f_c(\boldsymbol{\Theta}_1)$$

$$= \sum_{k=1}^K 2\sqrt{\mu_k p_k} \operatorname{Re} \{ \tau_k^* \boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_k \} - \sum_{k=1}^K |\tau_k|^2 \left(\sum_{i=k}^K p_i |\boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_i|^2 + \|\boldsymbol{\omega}_k\|^2 \sigma_0^2 \right), \quad (17)$$

$$\text{s.t. } |\theta_{1,n}|^2 = 1, \forall n = 1, \dots, N. \quad (18)$$

为了便于求解, 将式 (18) 转化为关于 $\boldsymbol{\theta}_1$ 的形式, 得到

$$f_{c1}(\boldsymbol{\theta}_1) = \sum_{k=1}^K 2\sqrt{\mu_k p_k} \operatorname{Re} \{ \tau_k^* (b_{k,k} + \boldsymbol{\theta}_1^H \mathbf{a}_{k,k}) \} - \sum_{k=1}^K |\tau_k|^2 \left(\sum_{i=k}^K p_i |b_{k,i} + \boldsymbol{\theta}_1^H \mathbf{a}_{k,i}|^2 + \|\boldsymbol{\omega}_k\|^2 \sigma_0^2 \right), \quad (19)$$

其中 $b_{k,k} = \boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_{d,k}$, $\mathbf{a}_{k,k} = \operatorname{diag}(\boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{G}_r) \mathbf{g}_{u,k}$, $b_{k,i} = \boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_{d,i}$, $\mathbf{a}_{k,i} = \operatorname{diag}(\boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{G}_r) \mathbf{g}_{u,i}$. 根据式 (19), 优化问题 (P4) 可以重写为问题 (P4'):

$$(P4') : \min_{\boldsymbol{\theta}_1} f_{c2}(\boldsymbol{\theta}_1) = \boldsymbol{\theta}_1^H \mathbf{U} \boldsymbol{\theta}_1 + 2\operatorname{Re} \{ \boldsymbol{\theta}_1^H \mathbf{v} \}, \quad (20)$$

s.t. (18),

其中 $\mathbf{U} = \sum_{k=1}^K |\tau_k|^2 \sum_{i=k}^K p_i \mathbf{a}_{k,i} \mathbf{a}_{k,i}^H$, $\mathbf{v} = -\sum_{k=1}^K \left(\sqrt{\mu_k p_k} \tau_k^* \mathbf{a}_{k,k} - |\tau_k|^2 \sum_{i=k}^K p_i b_{k,i}^* \mathbf{a}_{k,i} \right)$.

优化问题 (P4') 是一个非凸的 QCQP 问题, 目前已经有许多方法来处理这类问题, 但是常用的 SDR 方法提升了变量的维度并且需要高斯随机化得到问题的近似解; SCA 方法则需要一个可行的起点, 某些情况下找到一个可行的起点可能与解决原始 QCQP 问题一样困难; 交替方向乘子法 (alternating direction method of multipliers, ADMM) 可能无法收敛^[28]. 鉴于此, 本文首次采用加速近端距离算法^[29]求解具有单位模约束的非凸问题 (P4'), 它融合了罚函数法和优化最小化 (majorization-minimization, MM) 的思想, 实现了高效闭合形式的迭代.

首先, 通过在目标函数中添加有关距离的惩罚项, 可以将优化问题 (P4') 重写为无约束的优化问题 (P4''):

$$(P4'') : \min_{\boldsymbol{\theta}_1} f_{c3}(\boldsymbol{\theta}_1) = \boldsymbol{\theta}_1^H \mathbf{U} \boldsymbol{\theta}_1 + 2\operatorname{Re} \{ \boldsymbol{\theta}_1^H \mathbf{v} \} + \frac{\rho}{2} \operatorname{dist}(\boldsymbol{\theta}_1, \mathcal{C}_1)^2, \quad (21)$$

其中, \mathcal{C}_1 表示 $\boldsymbol{\theta}_1$ 的可行集合, $\operatorname{dist}(\boldsymbol{\theta}_1, \mathcal{C}_1) \triangleq \min_{\mathbf{c} \in \mathcal{C}_1} \|\boldsymbol{\theta}_1 - \mathbf{c}\|_2$ 表示 $\boldsymbol{\theta}_1$ 和集合 \mathcal{C}_1 之间的距离, $\rho > 0$ 是惩罚参数, 当 $\rho \rightarrow \infty$ 时, 问题 (P4'') 等价于优化问题 (P4').

其次, 采用 MM 方法来处理问题 (P4'') 的目标函数 $f_{c3}(\boldsymbol{\theta}_1)$, 有

$$f_{c3}(\boldsymbol{\theta}_1) \leq \boldsymbol{\theta}_1^H \mathbf{U} \boldsymbol{\theta}_1 + 2\operatorname{Re} \{ \boldsymbol{\theta}_1^H \mathbf{v} \} + \frac{\rho}{2} \|\boldsymbol{\theta}_1 - \Pi_{\mathcal{C}_1}(\boldsymbol{\theta}_1)\|_2^2, \quad (22)$$

其中, $\Pi_{\mathcal{C}_1}(\boldsymbol{\theta}_1)$ 表示将任意的 $\boldsymbol{\theta}_1$ 投影到集合 \mathcal{C}_1 中, 当 $\boldsymbol{\theta}_1 = \bar{\boldsymbol{\theta}}_1$ 时等号成立. 基于式 (22), 优化问题 (P4'') 可以转化为问题 (P4'''):

$$(P4''') : \begin{aligned} \boldsymbol{\theta}_1^{t+1} &= \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_1} f_{c4}(\boldsymbol{\theta}_1) \\ &= \boldsymbol{\theta}_1^H \mathbf{U} \boldsymbol{\theta}_1 + 2\operatorname{Re} \{ \boldsymbol{\theta}_1^H \mathbf{v} \} + \frac{\rho}{2} \|\boldsymbol{\theta}_1 - \Pi_{\mathcal{C}_1}(\boldsymbol{\theta}_1^t)\|_2^2. \end{aligned} \quad (23)$$

为了解决优化问题 (P4'''), 首先需要解决投影问题. 令 $\mathbf{y}^t = \Pi_{\mathcal{C}_1}(\boldsymbol{\theta}_1^t)$, 投影问题可以表示为问题 (P4''_{proj}):

$$(P4''_{\text{proj}}) : \mathbf{y}^t = \Pi_{\mathcal{C}_1}(\boldsymbol{\theta}_1^t) = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_1 \in \mathcal{C}_1} \frac{1}{2} \|\boldsymbol{\theta}_1 - \boldsymbol{\theta}_1^t\|_2^2, \quad (24)$$

它表示将 $\boldsymbol{\theta}_1^t$ 投影到集合 \mathcal{C}_1 以满足单位模约束.

其次, 求解近端映射问题 (P4''_{prox})

$$(P4''_{\text{prox}}) : \begin{aligned} \boldsymbol{\theta}_1^{t+1} &= \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_1} f_{c5}(\boldsymbol{\theta}_1) \\ &= \boldsymbol{\theta}_1^H \mathbf{U} \boldsymbol{\theta}_1 + 2\operatorname{Re} \{ \boldsymbol{\theta}_1^H \mathbf{v} \} + \frac{\rho}{2} \|\boldsymbol{\theta}_1 - \mathbf{y}^t\|_2^2. \end{aligned} \quad (25)$$

Algorithm 1 A-PDA for solving problem $(P4')$.

Input: $\rho > 0$, $\iota > 0$, ρ_{\max} , $\boldsymbol{\theta}_1^1 = \boldsymbol{\theta}_1^0$, $t = 0$, integer m , $\epsilon > 0$, T_{\max} ;

- 1: **while** $\|\boldsymbol{\theta}_1^t - \boldsymbol{\theta}_1^{t-1}\|^2 \leq \epsilon$ or $t \leq T_{\max}$ **do**
- 2: $t = t + 1$;
- 3: Using the Nesterov acceleration strategy of (27), obtain \mathbf{z}_1^t ;
- 4: Solving the projection problem $(P4''_{\text{proj}})$, obtain $\mathbf{y}^t = \Pi_{\mathcal{C}_1}(\mathbf{z}_1^t)$;
- 5: Solving the proximal mapping problem $(P4''_{\text{prox}})$, obtain $\boldsymbol{\theta}_1^{t+1}$;
- 6: Update penalty parameter $\rho = \min\{\iota\rho, \rho_{\max}\}$ every m iterations;
- 7: **end while**

Output: $\boldsymbol{\theta}_1^{\text{opt}}$.

观察到, 近端映射问题 $(P4''_{\text{prox}})$ 是一个无约束的 QP 问题, 通过令 $\partial f_{c5}(\boldsymbol{\theta}_1)/\partial \boldsymbol{\theta}_1 = 0$, 可以直接得到 $\boldsymbol{\theta}_1^{t+1}$ 的闭式解:

$$\boldsymbol{\theta}_1^{t+1} = (\mathbf{I} + 2\rho^{-1}\mathbf{U})^{-1}(\mathbf{y}^t - 2\rho^{-1}\text{Re}\{\mathbf{v}\}). \quad (26)$$

为了加快算法的收敛速度、降低计算复杂度, 在 PDA 算法基础上运用 Nesterov 加速策略^[28, 29] 得到 A-PDA 算法. 对于问题 $(P4''_{\text{proj}})$, 将问题 $(P4''_{\text{proj}})$ 中的 \mathbf{y}^t 替换为

$$\mathbf{y}^t = \Pi_{\mathcal{C}_1}(\mathbf{z}_1^t), \mathbf{z}_1^t = \boldsymbol{\theta}_1^t + \frac{t-1}{t+2}(\boldsymbol{\theta}_1^t - \boldsymbol{\theta}_1^{t-1}). \quad (27)$$

求解问题 $(P4')$ 的 A-PDA 算法如算法 1 所示, 若考虑 RIS 的离散相移, 只需要修改集合 \mathcal{C}_1 , 并在投影问题 $(P4''_{\text{prox}})$ 中将 $\boldsymbol{\theta}_1^t$ 投影到对应的离散集合. 对于该算法解决非凸问题的收敛性可以通过 Zangwill 的全局收敛定理^[30] 来证明, 文献 [29] 给出了详细的证明过程.

3.3 RS 波束成型和发射功率优化

在本节中, 通过固定其他优化变量, 对接收波束成型 $\boldsymbol{\omega}_k$ 和发射功率 \mathbf{p} 进行优化, 优化问题 $(P3)$ 可以重写为优化问题 $(P5)$:

$$\begin{aligned} (P5) : & \max_{\mathbf{p}, \boldsymbol{\omega}_k} f_d(\mathbf{p}, \boldsymbol{\omega}_k) \\ &= t_1 \sum_{k=1}^K 2\sqrt{\mu_k p_k} \text{Re}\{\tau_k^* \boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_k\} - t_1 \sum_{k=1}^K |\tau_k|^2 \left(\sum_{i=k}^K p_i |\boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_i|^2 + \|\boldsymbol{\omega}_k\|^2 \sigma_0^2 \right) - \alpha \sum_{k=1}^K P_k^c + t_1 p_k, \end{aligned} \quad (28)$$

s.t. (7), (9).

可以看出, 问题 $(P5)$ 是一个带约束的凸优化问题, 可以通过拉格朗日对偶分解来求解, 其拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} & \mathcal{L}(\boldsymbol{\omega}_k, \mathbf{p}, \lambda_k) \\ &= t_1 \sum_{k=1}^K \left(2\sqrt{\mu_k p_k} \text{Re}\{\tau_k^* \boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_k\} - |\tau_k|^2 \left(\sum_{i=k}^K p_i |\boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_i|^2 + \|\boldsymbol{\omega}_k\|^2 \sigma_0^2 \right) \right) \\ & \quad - \alpha \sum_{k=1}^K P_k^c + t_1 p_k + \sum_{k=1}^K \lambda_k \left(\eta_k (1-t_1) |\mathbf{h}_k \mathbf{w}_0|^2 - t_1 p_k - P_k^c \right), \end{aligned} \quad (29)$$

其中, λ_k 是引入的对偶变量. 由 KKT 条件易得 $\boldsymbol{\omega}_k$ 和 p_k 的最优解为

$$\boldsymbol{\omega}_k^{\text{opt}} = \frac{\sqrt{\mu_k p_k} \tau_k}{|\tau_k|^2} \left(\sum_{i=k}^K p_i \mathbf{g}_i \mathbf{g}_i^H + \sigma_0^2 \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{g}_k, \quad (30)$$

$$p_k^{\text{opt}} = \left(\frac{\sqrt{\mu_k} \text{Re}\{\tau_k^* \boldsymbol{\omega}_k^H \mathbf{g}_k\}}{\alpha + \lambda_k + \sum_{i=1}^k |\tau_i|^2 |\boldsymbol{\omega}_i^H \mathbf{g}_k|^2} \right)^2. \quad (31)$$

由于式 (31) 是关于 λ_k 的单调递减函数, 因此可以使用二分法得到最优的 λ_k^{opt} .

Algorithm 2 Beamforming and resource allocation scheme based on A-PDA.

Input: $t_0 = t_0^{(0)}$, $t_1 = t_1^{(0)}$, $p_k = p_k^{(0)}$, $\mathbf{w}_0 = \mathbf{w}_0^{(0)}$, $\boldsymbol{\omega}_k = \boldsymbol{\omega}_k^{(0)}$, $\boldsymbol{\theta}_0 = \boldsymbol{\theta}_0^{(0)}$, $\boldsymbol{\theta}_1 = \boldsymbol{\theta}_1^{(0)}$, $i = 0$, $\alpha > 0$, $\epsilon > 0$, I_{\max} ;

1: **while** $\|\alpha^i - \alpha^{i-1}\| \leq \epsilon$ or $i \leq I_{\max}$ **do**

2: $i = i + 1$;

3: Based on problem (P2), update $t_0^{(i)}$, $t_1^{(i)}$;

4: Based on problem (P4), update $\boldsymbol{\theta}_1^{(i)}$;

5: Based on problem (P5), update $\boldsymbol{\omega}_k^{(i)}$, $p_k^{(i)}$;

6: Based on problem (P6), update $\mathbf{w}_0^{(i)}$, $\boldsymbol{\theta}_0^{(i)}$;

7: Update $\alpha^{(i)} = R_{\text{sum}}/E_{\text{sum}}$;

8: **end while**
Output: $[\alpha, t_0, t_1, p_k, \mathbf{w}_0, \boldsymbol{\omega}_k, \boldsymbol{\theta}_0, \boldsymbol{\theta}_1]^{\text{opt}}$.

3.4 WET 阶段 RIS 和 PS 波束成型优化

通过固定 $\{t_0, t_1, \mathbf{p}, \boldsymbol{\Theta}_1, \boldsymbol{\omega}_k\}$ 来优化 WET 阶段的 RIS 相移矩阵 $\boldsymbol{\Theta}_0$ 和发射波束成型 \mathbf{w}_0 时, 利用惩罚项 $\xi_k > 0$ 将能量约束 (7) 集成到目标函数中并去除无关项^[23], 问题 (P3) 可以转换为优化问题 (P6):

$$(P6) : \max_{\boldsymbol{\Theta}_0, \mathbf{w}_0} f_e(\boldsymbol{\Theta}_0, \mathbf{w}_0) = \sum_{k=1}^K \xi_k \eta_k \left| (\mathbf{h}_{d,k}^H + \mathbf{h}_{u,k}^H \boldsymbol{\Theta}_0 \mathbf{H}_r) \mathbf{w}_0 \right|^2, \quad (32)$$

$$\text{s.t. (11), } |\theta_{0,n}|^2 = 1, \forall n = 1, \dots, N. \quad (33)$$

令 $\mathbf{H} = \sum_{k=1}^K \xi_k \eta_k \left(\mathbf{h}_{d,k}^H + \mathbf{h}_{u,k}^H \boldsymbol{\Theta}_0 \mathbf{H}_r \right)^H \left(\mathbf{h}_{d,k}^H + \mathbf{h}_{u,k}^H \boldsymbol{\Theta}_0 \mathbf{H}_r \right)$, 可以得到 \mathbf{w}_0 的最优解为^[2]

$$\mathbf{w}_0^{\text{opt}} = \sqrt{P_{\Gamma}} \vartheta_{\max}(\mathbf{H}), \quad (34)$$

其中, $\vartheta_{\max}(\cdot)$ 表示最大特征值对应的特征向量.

对于 WET 阶段的 RIS 相移, 可以采用与求解 $\boldsymbol{\theta}_1^{\text{opt}}$ 类似的算法来求解 $\boldsymbol{\theta}_0^{\text{opt}}$. 通过矩阵变换, 将问题 (P6) 可以重写为优化问题 (P6'):

$$(P6') : \min_{\boldsymbol{\theta}_0} f_{e1}(\boldsymbol{\theta}_0) = \boldsymbol{\theta}_0^H \mathbf{B} \boldsymbol{\theta}_0 + 2 \operatorname{Re} \{ \boldsymbol{\theta}_0^H \mathbf{q} \}, \quad (35)$$

$$\text{s.t. (33),}$$

其中, $\mathbf{B} = -\sum_{k=1}^K \xi_k \eta_k \mathbf{a}_{0,k} \mathbf{a}_{0,k}^H$, $\mathbf{q} = -\sum_{k=1}^K \xi_k \eta_k b_{0,k}^* \mathbf{a}_{0,k}$, $\mathbf{a}_{0,k} = \operatorname{diag}(\mathbf{h}_{u,k}^H) \mathbf{H}_r \mathbf{w}_0$, $b_{0,k} = \mathbf{h}_{d,k}^H \mathbf{w}_0$. 剩下的优化流程与 (P4') \sim (P4''') 类似, 故不再赘述.

3.5 收敛性和复杂度分析

综上, 求解优化问题 (P1) 的基于 A-PDA 的波束成型与资源分配方案如算法 2 所示.

由于优化问题的目标函数存在上限, 并且在基于 A-PDA 的波束成型与资源分配方案的迭代过程中满足 $f_a(\boldsymbol{\theta}_0^{(i)}) \leq f_a(\boldsymbol{\theta}_0^{(i+1)})$, 因此, 优化问题的目标函数在每次迭代后都是单调非减的, 故所提算法收敛.

基于 A-PDA 的波束成型与资源分配方案求解时间分配和功率分配的复杂度约为 $\mathcal{O}(K)$, 求解 WET 和 WIT 阶段 RIS 相移的复杂度分别为 $\mathcal{O}(T_{0,\text{iter}} N^3)$, $\mathcal{O}(T_{1,\text{iter}} N^3)$, 其中 $T_{0,\text{iter}}$ 和 $T_{1,\text{iter}}$ 分别为求解 $\boldsymbol{\theta}_0$ 和 $\boldsymbol{\theta}_1$ 的迭代次数, 求解 PS 和 RS 波束成型的复杂度分别为 $\mathcal{O}(M^3)$, $\mathcal{O}(Q^2)$. 综上所述, 所提方案的计算复杂度为 $\mathcal{O}\{I_{\text{iter}}(K + (T_{0,\text{iter}} + T_{1,\text{iter}})N^3 + Q^2 + M^3)\}$, 其中 I_{iter} 表示所提方案的迭代次数.

若采用经典的 SDR 算法求解两阶段相移矩阵, 复杂度约为 $\mathcal{O}\{(T_{0,\text{iter}} + T_{1,\text{iter}})(N + 1)^{4.5}\}$ ^[31], 那么求解优化问题 (P1) 的总复杂度为 $\mathcal{O}\{I_{\text{iter}}(K + (T_{0,\text{iter}} + T_{1,\text{iter}})(N + 1)^{4.5} + Q^2 + M^3)\}$. 相较之下, 本文方案能够有效降低计算复杂度. 此外, 由于每次迭代的计算过程简单, 所提方案在运行速度上明显优于其他方案, 下文仿真分析中进一步验证了这一结论.

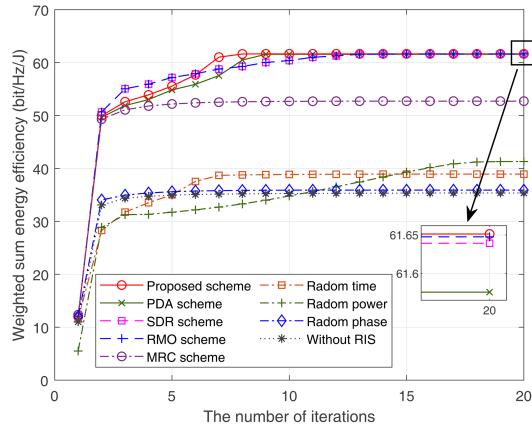


图 2 (网络版彩图) 加权和能效与迭代次数的关系.

Figure 2 (Color online) Weighted sum energy efficiency versus the number of iterations.

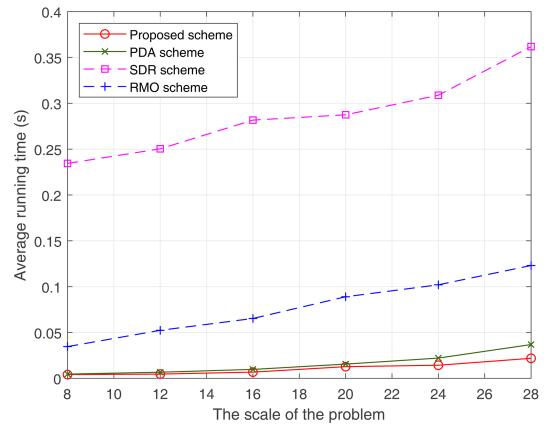


图 3 (网络版彩图) 平均运行时间与问题规模的关系.

Figure 3 (Color online) Average running time versus the scale of the problem.

4 仿真分析

仿真中设置能量发射站 PS、信息接收站 RS, RIS 分别位于 $(0 \text{ m}, 0 \text{ m})$, $(60 \text{ m}, 0 \text{ m})$, $(10 \text{ m}, 2 \text{ m})$, K 个无线传感设备均匀分布于以 $(10 \text{ m}, 0 \text{ m})$ 为圆心, 半径为 1 m 的圆上. 路径损耗模型为 $L(d) = C_0 (d/D_0)^{-\alpha}$, 其中 $C_0 = -30 \text{ dB}$ 是参考距离为 $D_0 = 1 \text{ m}$ 时的路径损耗, d 表示链路距离, α 表示路径损耗指数. PS 到设备以及设备到 RS 的直连路径损耗为 3.5 , 其余信道的路径损耗设置为 2.2 . 小尺度衰落均采用莱斯 (Rician) 衰落信道, 莱斯因子 $\kappa = 3 \text{ dB}$. 其他仿真参数设置为 $K = 4$, $\eta_k = 0.8$, $\sigma_1^2 = -85 \text{ dBm}$, $P_k^c = 7 \text{ dBm}$. 不失一般性, 我们假设所有无线传感设备都具有相同的权重 $\beta_k = 1/K$.

在仿真中, 将所提方案与以下三类方案进行对比, 分别是: 基于普通 PDA 的方案、经典优化方案 (基于 SDR 的方案 [20, 21, 32]、基于 RMO 的方案 [33]) 和基准方案 (基于最大比合并 (maximum ratio combining, MRC) 的方案 [34]、随机时间分配方案、随机功率分配方案、RIS 随机相移方案和无 RIS 辅助方案). 基于普通 PDA 的方案, 不采用 Nesterov 加速策略, 是所提方案的基础; 基于 SDR 的方案是目前 RIS 与 WPCN 结合最经典、最常用的算法; 基于 RMO 的方案利用 RMO 算法来求解 RIS 相移, RMO 在传统 RIS 系统的理论优化中表现优异, 具有一定的理论指导意义, 但由于其在流形空间内涉及复杂的几何运算, 还需要综合考虑硬件实现等实际约束.

图 2 给出了设备加权和能效与迭代次数之间的关系. 仿真结果表明, 本文提出的方案相较于其他对比方案能够更快速地收敛, 并且获得了更优越的加权和能效. 这是因为所提方案能够稳定地获得各个变量的闭式解, 从而快速收敛到最优解. 此外, 相比于 MRC 的方案, 本文方案有效降低了用户间干扰, 实现了更高的能量效率; 相较于随机时间、功率、相移分配的方案以及无 RIS 辅助的方案, 本文提出的方案充分利用了 RIS 的可编程特性, 通过联合优化资源分配与波束成型, 从而显著提升了系统的加权和能效, 进一步验证了 RIS 辅助的 WPCN 系统中联合优化波束成型和资源分配的关键性与重要性.

图 3 给出了性能相近的 4 种方案的平均运行时间与问题规模之间的关系, 即针对 RIS 波束成型子问题, 所提方案、PDA 方案、SDR 方案和 RMO 方案的平均运行时间随着 RIS 元件数目变化的曲线. 仿真结果表明, 所提方案在平均运行时间上显著优于其他经典优化方案. 这是因为所提方案每次迭代过程简单, 并且没有提升变量维度. 此外, 随着问题规模的扩大, 所提方案与 PDA, SDR 和 RMO 方案的性能差距进一步扩大, 这表明本文所提方案中引入的 Nesterov 加速策略有效减少了运行时间, 因此所提方案更加适应未来大规模 RIS 实时性系统的需求.

图 4 和图 5 给出了不同方案下设备加权和能效随着 PS 最大发射功率 P_T 的变化. 仿真结果表明, 所提方案相较于其他对比方案能够获得更好的性能, 特别是在小发射功率下, 所提方案明显优于基于 PDA, SDR 和 RMO

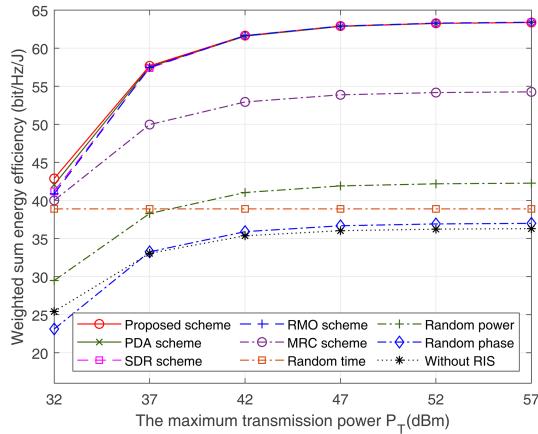


图 4 (网络版彩图) 加权和能效与最大发射功率的关系.

Figure 4 (Color online) Weighted sum energy efficiency versus the maximum transmission power.

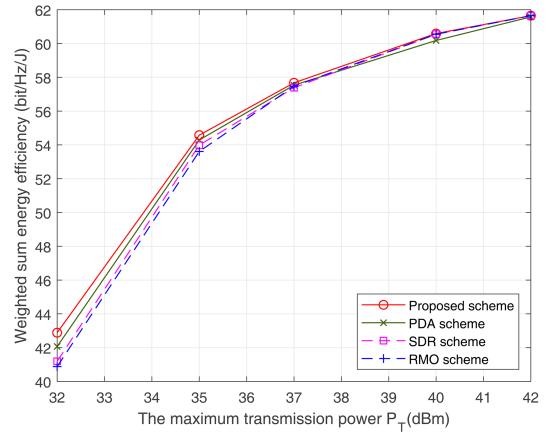


图 5 (网络版彩图) 小发射功率阈值下加权和能效与最大发射功率的关系.

Figure 5 (Color online) Weighted sum energy efficiency versus the maximum transmission power under low power threshold.

的方案,这表明所提方案在解决 RIS 辅助的 WPCN 系统下加权和能效问题的有效性与优越性.此外,除随机时间分配的方案外,随着 P_T 的增加,其他方案的加权和能效逐渐提升,在高功率阈值时出现饱和.这是因为当 P_T 较小时,发射功率的小幅增加能够显著缩短 WET 时间,从而延长 WIT 时间,迅速提高设备的加权和能效.然而,当 P_T 较大时,设备收集的能量对能效的影响趋于饱和,进一步增加 P_T 对加权和能效的提升效果有限.随机时间分配的方案随着 P_T 的增加,设备的加权和能效并未出现显著提升,这是由于未优化的时间分配限制了功率增大带来的收益:能量收集时间或信息传输时间不足都会导致能效提升受限.

图 6 给出了不同方案下设备加权和能效随着信息接收站天线数目的变化.可以看出,随着 RS 天线数目的增加,各个方案的加权和能效均增加,这是因为 RS 天线数目的增加使得信道分集增益和波束成型增益得到提升.所提方案获得了与经典优化方案相当的加权和能效,但所提方案能够更快速地收敛且运行时间更短.此外,随着 RS 天线数目的增加,所提方案与基于 MRC 方案的性能差距越来越大.这是因为 MRC 虽然能够增强目标用户的信号功率,但未考虑用户间的干扰问题.随着信息站天线数目的增加,目标信号增强的同时,其他设备的干扰信号也会被放大,这便限制了 MRC 在多用户场景中性能的提升.因此,与基于 MRC 的方案相比,所提方案更适用于多用户干扰的场景.

图 7 给出了不同方案下设备加权和能效随 RIS 元件数目的变化.可以看出,所提方案获得了与经典优化方案相当甚至较优的加权和能效,同时具有更快的收敛速度及运行速度,因此,所提方案具有更优越的系统性能以及解决大规模实时问题的潜力.此外,随着 RIS 元件数目的增加,除了无 RIS 辅助的方案外,其他方案的加权和能效均增加.这是因为更多的 RIS 元件能够提供更高的信道增益,从而提升设备的加权和能效.在 RIS 元件数目较少时,其提供的信道增益相对较小,难以有效增强信号,此时, RIS 对信号的增强作用不足以弥补随机资源分配的缺陷,从而导致能量和信息传输效率低下,同时随机相移方案可能导致有用信号的衰减或干扰信号的放大,进一步降低设备的加权和能效.仿真结果突显了所提方案联合优化所有变量对提升系统性能的重要性.

上述仿真结果表明,所提方案相较于基于 SDR 的方案能够有效降低计算复杂度,并且相较于经典优化方案均能够快速收敛,并显著降低了平均运行时间,在不同系统设置下均表现出优越的加权和能效.因此,所提方案在大规模实时场景及小发射功率等场景下更具优势.

5 总结

本文研究了 RIS 辅助分离架构的 WPCN 系统中设备的加权和能效最大化问题,并提出了一种基于 A-PDA

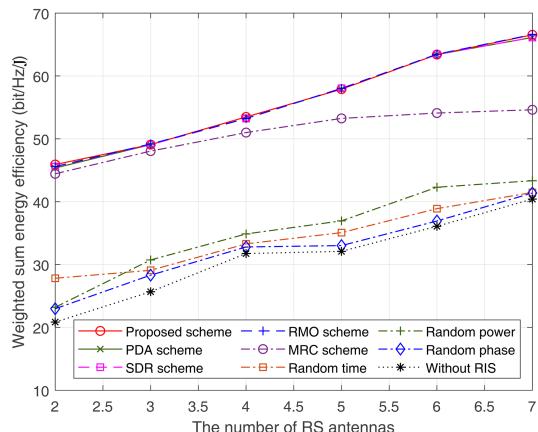


图 6 (网络版彩图) 加权和能效与 RS 天线数目的关系.

Figure 6 (Color online) Weighted sum energy efficiency versus the number of RS antennas.

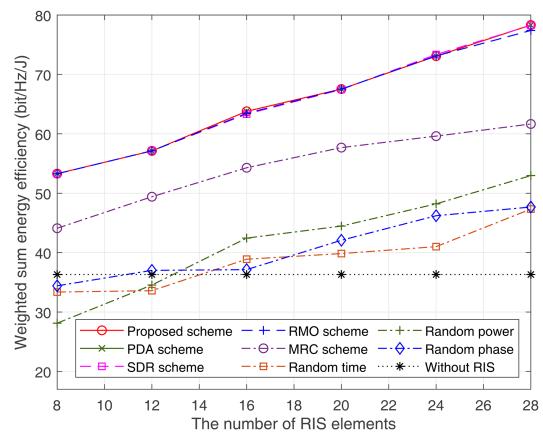


图 7 (网络版彩图) 加权和能效与 RIS 元件数目的关系.

Figure 7 (Color online) Weighted sum energy efficiency versus the number of RIS elements.

算法的波束成型与资源分配方案. 所提方案通过分式规划解耦优化问题, 交替优化直至收敛获得最终解, 其中 RIS 相移矢量采用 A-PDA 求解得到闭式解. 仿真结果表明, 所提方案在不同系统设置下均表现出优越的加权和能效性能, 并且相比于经典优化方案, 显著降低了平均运行时间, 为未来大规模实时的 RIS-WPCN 系统提供了一种高效可行的解决方案.

参考文献

- 1 Choi K W, Ginting L, Aziz A A, et al. Toward realization of long-range wireless-powered sensor networks. *IEEE Wireless Commun*, 2019, 26: 184–192
- 2 Zhai L, Zou Y, Zhu J. Robust transmission design for RIS-assisted multi-cluster wireless powered communications with hardware impairments. *IEEE Trans Commun*, 2024, 72: 3035–3050
- 3 Bi S, Ho C K, Zhang R. Wireless powered communication: opportunities and challenges. *IEEE Commun Mag*, 2015, 53: 117–125
- 4 Ju H, Zhang R. Throughput maximization in wireless powered communication networks. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2013, 13: 418–428
- 5 Tang H, Wu Q, Chen W, et al. Mitigating the doubly near-far effect in UAV-enabled WPCN. *IEEE Trans Veh Technol*, 2021, 70: 8349–8354
- 6 Huang K, Lau V K N. Enabling wireless power transfer in cellular networks: architecture, modeling and deployment. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2014, 13: 902–912
- 7 Nguyen T T, Nguyen V D, Lee J H, et al. Sum rate maximization for multi-user wireless powered IoT network with non-linear energy harvester: time and power allocation. *IEEE Access*, 2019, 7: 149698
- 8 Khavari-Moghaddam S, Farahmand S, Razavizadeh S M, et al. Optimum solutions for weighted sum-rate of NOMA and TDMA in wireless-powered IoT networks. *IEEE Internet Things J*, 2024, 11: 3302–3315
- 9 Rezaei O, Masjedi M, Naghsh M M, et al. Cooperative throughput maximization in a multi-cluster WPCN. *IEEE Trans Green Commun Netw*, 2024, 8: 1505–1520
- 10 Tang K, Jiao F, Yan P, et al. Energy efficiency maximization for mmWave WPCN with dynamic multi-steerable energy beamforming. *IEEE Trans Veh Technol*, 2024, 73: 18635–18648
- 11 Wu Q, Zhang R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network. *IEEE Commun Mag*, 2019, 58: 106–112
- 12 Basar E, Renzo M D, de Rosny J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Access*, 2019, 7: 116753
- 13 Tao Q, Wang J, Zhong C. Performance analysis of intelligent reflecting surface aided communication systems. *IEEE Commun Lett*, 2020, 24: 2464–2468
- 14 Cao K, Tang Q. Energy efficiency maximization for RIS-assisted MISO symbiotic radio systems based on deep reinforcement learning. *IEEE Commun Lett*, 2024, 28: 88–92

- 15 Han Q, Li K, Zhang Z, et al. Phase quantized intelligent reflecting surface assisted rate-splitting multiple access for downlink multiuser MISO systems. In: Proceedings of 2023 9th International Conference on Computer and Communications (ICCC), 2023. 475–479
- 16 Hamza K M, Basharat S, Jung H, et al. Secrecy analysis of RIS-assisted uplink NOMA systems under Nakagami-m fading. In: Proceedings of 2024 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 2024. 1511–1516
- 17 Wang T, Fang F, Ding Z. An SCA and relaxation based energy efficiency optimization for multi-user RIS-assisted NOMA networks. *IEEE Trans Veh Technol*, 2022, 71: 6843–6847
- 18 Aung P S, Park Y M, Tun Y K, et al. Energy-efficient communication networks via multiple aerial reconfigurable intelligent surfaces: DRL and optimization approach. *IEEE Trans Veh Technol*, 2024, 73: 4277–4292
- 19 Hua M, Wu Q, Poor H V. Power-efficient passive beamforming and resource allocation for IRS-aided WPCNs. *IEEE Trans Commun*, 2022, 70: 3250–3265
- 20 Dursun Y, Basit S A, Ding Z. Wireless powered NOMA-based cognitive radio for 6G networks. *Comput Netw*, 2024, 248: 110497
- 21 Wu Q, Zhou X, Schober R. IRS-assisted wireless powered NOMA: do we really need different phase shifts in DL and UL? *IEEE Wireless Commun Lett*, 2021, 10: 1493–1497
- 22 Wu C, Ke F, Yang X, et al. Joint energy and information precoding for NOMA-based WPCNs aided by reconfigurable intelligent surface. *IEEE Trans Veh Technol*, 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3287250
- 23 Song Y H, Xu D Y, Li B, et al. Time allocation for RIS-aided wireless power communication networks in disaster sceneio. In: Proceedings of IEEE Global Communications Conference, 2023. 1030–1035
- 24 Jie J, Bin L, Pengcheng C, et al. Sum-rate maximization in active RIS-assisted multi-antenna WPCN. *China Commun*, 2024, 21: 23–39
- 25 Zewde T A, Gursoy M C. NOMA-based energy-efficient wireless powered communications. *IEEE Trans Green Commun Netw*, 2018, 2: 679–692
- 26 Dinkelbach W. On nonlinear fractional programming. *Manage Sci*, 1967, 13: 492–498
- 27 Shen K, Yu W. Fractional programming for communication systems-part I: power control and beamforming. *IEEE Trans Signal Process*, 2018, 66: 2616–2630
- 28 Li Q, Liu Y T, Shao M J, et al. Proximal distance algorithm for nonconvex QCQP with beamforming applications. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2020. 5155–5159
- 29 Keys K L, Zhou H, Lange K. Proximal distance algorithms: theory and practice. 2019. ArXiv:1604.05694
- 30 Luenberger D G, Ye Y Y. Linear and Nonlinear Programming. 3rd ed. New York: Springer, 2008
- 31 Luo Z Q, Ma W K, So A M C, et al. Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems. *IEEE Signal Process Mag*, 2010, 27: 20–34
- 32 Zhang J, Tang J, Feng W, et al. Throughput maximization for RIS-assisted UAV-enabled WPCN. *IEEE Access*, 2024, 12: 13418–13430
- 33 Dong L, Wang H M, Bai J, et al. Double intelligent reflecting surface for secure transmission with inter-surface signal reflection. *IEEE Trans Veh Technol*, 2021, 70: 2912–2916
- 34 Peng Z, Zhu J, Lu Z, et al. Active RIS-aided massive MIMO uplink systems with low-resolution ADCs. *IEEE Wireless Commun Lett*, 2025, 14: 73–77

Beamforming and resource allocation for reconfigurable intelligent surface assisted wireless powered communication network

Yi GUO, Yingxin GUO*, Gang LIU* & Shaozhong FU

State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China

* Corresponding author. E-mail: gyingxin1126@163.com, liugang@mail.xidian.edu.cn

Abstract In view of the energy constraints and diverse quality of service (QoS) requirements of numerous wireless sensor devices in the future Internet of Things, as well as the “doubly near-far” problem in wireless powered communication network (WPCN), this paper investigates a WPCN system model with a reconfigurable intelligent surface (RIS) assisted separated architecture, aiming to maximize the weighted sum energy efficiency of devices by jointly optimizing active beamforming, passive beamforming and resource allocation. To address this optimization problem, a beamforming and resource allocation scheme based on the accelerated proximal distance algorithm (A-PDA) is proposed. This scheme uses fractional programming to decouple the optimization problem and alternately optimizes each subproblem until convergence. Notably, the A-PDA is employed for the first time to derive the closed-form solution of the RIS phase shift vector. Simulation results demonstrate that, compared with classical optimization schemes, the proposed scheme achieves faster convergence, significantly reduces the average running time, and exhibits superior weighted sum energy efficiency performance, particularly under low transmission power conditions.

Keywords reconfigurable intelligent surface, wireless powered communication network, beamforming, resource allocation, proximal distance algorithm