

RIS 赋能多集群无线携能通信网络的自维持能力增强性研究

邵凯^{1,2}, 毛恬恬¹, 王光宇¹, 楚征³

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065;
3. 宁波诺丁汉大学电气与电子工程系, 浙江 宁波 315100)

摘 要: 研究了由可重构智能表面 (RIS) 辅助的多集群无线携能通信网络 (WPCN) 通信性能最大化问题。为提升网络的自我维持能力, 约束了网络设备的信噪比 (SNR), 并提出了一种混合时分多址 (TDMA-TDMA) 传输方案。首先, 为避免集群间干扰采用 TDMA 模式轮询集群; 其次, 基于 RIS 的时间选择性, 在单集群内采用 TDMA 策略设计无源波束成形和时间分配。所建立的优化问题, 采用非线性能量采集 (NLEH) 模型, 考虑了 RIS 的相移误差 (PSE)、传输时间、用户的 SNR 和不完美信道状态信息 (CSI) 等约束条件。仿真结果表明, 与传统的资源分配方案相比, 所提方案提高了网络边缘用户生存能力, 有效地保证了网络生命周期。

关键词: 无线携能通信网络; 可重构智能表面; 资源分配; 相移误差

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025096

Research on boosting self-sustainability for RIS-aided multi-cluster wireless powered communication networks

SHAO Kai^{1,2}, MAO Tiantian¹, WANG Guangyu¹, CHU Zheng³

1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China
2. Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing 400065, China
3. Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Nottingham Ningbo China, Ningbo 315100, China

Abstract: The performance maximization was investigated in a reconfigurable intelligent surface (RIS) assisted multi-cluster wireless powered communication network (WPCN). To enhance the self-sustaining capability of the network, the signal-to-noise ratio (SNR) of network devices was constrained and a hybrid time division multiple access (TDMA-TDMA) transmission scheme was proposed. Firstly, the TDMA was used to poll the cluster for avoiding the inter-cluster interference. Secondly, based on RIS's time selectivity, passive beamforming and time allocation were designed by using TDMA strategy within a single cluster. A nonlinear energy harvesting (NLEH) model was adopted in the established optimization problem, with constraints on phase shift error (PSE) of RIS, transmission time SNR of users, and imperfect channel state information (CSI). Simulation results show that, the proposed scheme improves the survivability of network edge users and effectively ensures the network lifecycle, compared with traditional resource allocation schemes.

Keywords: wireless powered communication network, reconfigurable intelligent surface, resource allocation, phase shift error

收稿日期: 2024-12-24; 修回日期: 2025-05-19

基金项目: 宁波市自然科学基金资助项目 (No.2024J233)

Foundation Item: The Ningbo Natural Science Foundation (No.2024J233)

0 引言

随着物联网 (IoT, Internet of things) 在智慧农业、环境监测和应急事件处理等领域的广泛应用,越来越多的IoT设备/传感器被部署在各种极端且充满挑战的环境中^[1]。针对这些特殊场景的通信节点,传统的设备寿命延长方法(如定期维护或更换电池)显得尤为困难,对网络的自我维持能力提出了挑战。对于特殊场景的IoT应用,网络的自我维持能力尤为重要,其决定了整个网络的生存周期。最近采用微波无线电力传输技术的无线携能通信网络(WPCN, wireless powered communication network)正逐渐成为可能的解决方案^[2-3]: WPCN中的通信节点在下行无线能量传输(WET, wireless energy transfer)阶段收集来自专用电站的射频(RF, radio frequency)能量,并利用这些能量在上行无线信息传输(WIT, wireless information transfer)阶段将数据发送至接入点。然而,现有无线电力传输技术在约10 m范围内仅能传输数十微瓦的RF功率。因此,在大规模WPCN中为功耗达几毫瓦的设备提供支持仍具挑战性^[4]。此外,无线信道的随机性导致设备易受功率和距离衰减的影响,严重限制了网络的覆盖范围和性能。文献[5-6]主要针对无线信道中的信号衰落和衰减问题展开研究,文献[7-9]通过引入大量有源RF链以确保服务质量,但这往往伴随高能耗和高成本。相比之下,可重构智能表面(RIS, reconfigurable intelligent surface)提供了一种新的解决方案,RIS控制器能够在不增加额外能耗的情况下,调整反射信号的相移和振幅,为能量和信息传输创造有利条件,从而提升无线链路质量^[10-11]。

近年来,RIS与WPCN的集成受到广泛关注,相关研究主要集中在2个方面。一方面,从WET阶段的时间和功率的分配角度优化能量管理策略,如文献[12-15]等。另一方面,主要探讨单集群WPCN中上行WIT的传输协议,这些研究采用时分多址(TDMA, time division multiple access)^[16-17]、频分多址(FDMA, frequency division multiple access)^[18-20]或非正交多址(NOMA, non-orthogonal multiple access)^[21-22]等方式,利用设备收集的能源向接入点发送数据。研究表明,在动态、一次性、无相位调整的条件下,RIS辅助的NOMA网络的平均下行速率优于TDMA和FDMA,但NOMA比TDMA需要更高的功率^[23-24]。如果考虑RIS的时

间选择性,可以认为在动态相位调整的情况下,TDMA优于FDMA^[25]。

最近,多集群WPCN受到越来越多的关注,研究集中在集群间和集群内所采用的混合传输协议。文献[26]在基于毫米波的WPCN中引入了一种混合传输协议,其中下行WET采用TDMA,上行WIT采用FDMA。为最大化传输速率,文献[27]提出了一种低复杂度的混合NOMA与TDMA方案。与文献[26-27]不同,文献[28-29]考虑了更具实践性的非线性能量采集(NLEH, non-linear energy harvesting)模型。文献[28]为多个RIS辅助的WPCN提出了一种新的TDMA-FDMA方案,将网络中的设备划分为多个集群,每个集群通过FDMA共享专用带宽进行信息传输。文献[29]采用文献[28]所提的方案,以规避多集群干扰的不利影响。研究表明,在能量受限的条件下,NOMA信号进行完美解码,其频谱效率可能低于TDMA^[24]。FDMA在最佳相移设计方面的灵活性较低,限制了RIS在WPCN中的应用潜力^[17]。

目前,关于RIS赋能的多集群WPCN的建模研究主要集中于优化系统整体性能(如吞吐量、能效和保密率),却忽视了对网络自维持能力的研究。然而,在智能工厂、环境监测及智慧农业等典型IoT应用场景中,终端设备通常分布广泛、部署密度较高,部分节点长期位于远离能量源的边缘区域。随着网络规模的扩展以及设备数量的增加,边缘设备因RF信号路径损耗导致获取能量显著减少,其生存能力面临严峻挑战。在WPCN中,边缘设备的生存能力是确保网络自维持性的关键因素。因此,为提升网络的自维持性,本文对RIS赋能的多集群WPCN系统约束了设备的信噪比(SNR, signal-to-noise ratio),并提出了一种新型混合TDMA-TDMA传输方案。首先,采用TDMA模式轮询集群,避免集群间干扰;其次,基于RIS的时间选择性,在单集群内采用TDMA策略优化无源波束成形和时间分配。

为了更实际地评估RIS辅助WPCN的总吞吐量,本文采用NLEH模型,考虑了RIS相移约束、传输时间约束、SNR约束、相移误差(PSE, phase shift error)约束和信道状态信息(CSI, channel state information)误差约束的限制。为便于处理,将每个反射单元的PSE建模为均匀分布的加性随机

变量, 并将其随机 PSE 转换为确定性对应变量。

为解决变量间的耦合问题, 本文先采用拉格朗日对偶方法和卡罗需-库恩-塔克 (KKT, Karush-Kuhn-Tucke) 条件, 推导出 WET 和 WIT 的最优时间调度的闭式解。然后, 通过二次变换 (QT, quadratic transformation) 将目标函数转换为更易处理的形式。最后, 推导出上行 WIT 阶段 RIS 相移矩阵的最优解, 并通过元素块坐标下降 (EBCD, element-wise block coordinate descent) 法对 WET 阶段 RIS 相移进行迭代优化。仿真结果表明, 本文方案所获得的最佳时隙和相移矩阵方案可为所有设备提供接近最优的能量收集效率。最重要的是, 本文方案在提升单个设备的生存能力方面的有效性得到了充分验证。

1 系统模型及问题构建

1.1 系统模型

图 1 为一个 RIS 辅助的多集群 WPCN, 该网络由一个电站、一个接入点、一个无源 RIS 控制器及 M 台能量受限的设备组成。假设 RIS 反射单元数目为 N , 而其他节点仅配备单根天线。定义设备所在集群的集合为 $\mathcal{K} \triangleq \{1, \dots, K\} (\forall k \in \mathcal{K})$, 特定集群内的设备的集合为 $\mathcal{M} \triangleq \{1, \dots, M_k\} (\forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K})$, 反射单元集合为 $\mathcal{N} \triangleq \{1, \dots, N\} (\forall n \in \mathcal{N})$ 。其中, M 台设备被分成 K 个集群, 每个集群包含 $M_k, \forall k \in \mathcal{K}$ 台设备, 定义第 k 个集群内的第 m 台设备表示为 $\mathcal{D}_{k,m}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M}$ 。

为不失一般性, 假设电站、接入点和所有设备在同一频率下工作, 总传输时间 $T = 1$ 。在该系统中, 本文采用一种通用的“先收集-后发送”协议^[4]。如图 2 所示, 传输过程被划分为 2 个阶段。

第一阶段: 下行 WET 过程的持续时间为 $\tau_0 \in [0, 1]$ 。在此期间, 电站发射 RF 信号, 为设备和 RIS 提供能量。RIS 收集的部分能量用于为其控制器供电, 其余则通过反射信号为设备提供能量。

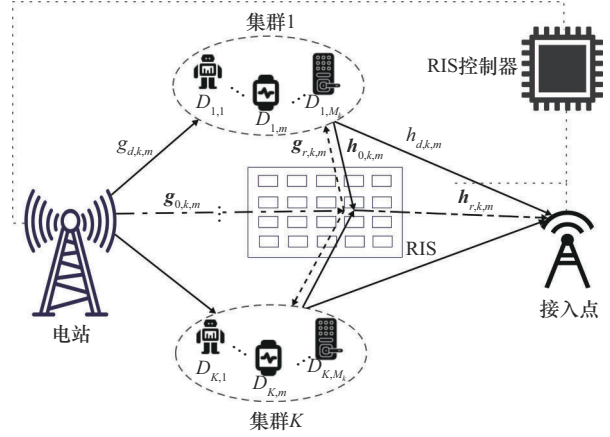


图 1 RIS 辅助的多集群 WPCN

第二阶段: 在上行 WIT/RIS 反射过程中, 采用 TDMA-TDMA 方案。在集群间采用 TDMA 方式进行轮询调度, 为每个集群分配一个专用的传输时隙 τ_k , 以避免集群间干扰。在同一集群内, 系统通过 TDMA 方式为每台设备分配专用子时隙 $t_{k,m}$, 各设备在 RIS 辅助下利用收集的能量将数据传输至接入点。该机制允许为远距离的边缘设备分配更长的传输时间, 以弥补路径损耗带来的信号衰减。

1.2 信道模型

表 1 给出了信道系数和路径损耗符号。由于 RIS 辅助下的级联信道 CSI 难以获取, 本文研究了一种基于不完美 CSI 的鲁棒方案, 定义从电站到 $\mathcal{D}_{k,m}$ 以及从 $\mathcal{D}_{k,m}$ 到接入点的级联链路分别表示为 $\mathbf{g}_{c,k,m} = \text{diag}(\mathbf{g}_{0,k,m}) \mathbf{g}_{r,k,m}, \mathbf{h}_{c,k,m} = \text{diag}(\mathbf{h}_{0,k,m}) \mathbf{h}_{r,k,m}$ 。与文献[30]类似, 信道模型可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_{c,k,m} &= \hat{\mathbf{g}}_{e,k,m} + \mathbf{e}_{0,k,m} \\ \mathbf{h}_{c,k,m} &= \hat{\mathbf{h}}_{e,k,m} + \mathbf{e}_{1,k,m} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\hat{\mathbf{g}}_{e,k,m}$ 和 $\hat{\mathbf{h}}_{e,k,m}$ 表示估计的 CSI, $\mathbf{e}_{0,k,m} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 和 $\mathbf{e}_{1,k,m} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 表示信道的不确定性, 定义 ψ_0 和 ψ_1 为误差因子, 且满足 $\|\mathbf{e}_{0,k,m}\| \leq \psi_0 \|\hat{\mathbf{g}}_{e,k,m}\|^2$, $\|\mathbf{e}_{1,k,m}\| \leq \psi_1 \|\hat{\mathbf{h}}_{e,k,m}\|^2$ 。

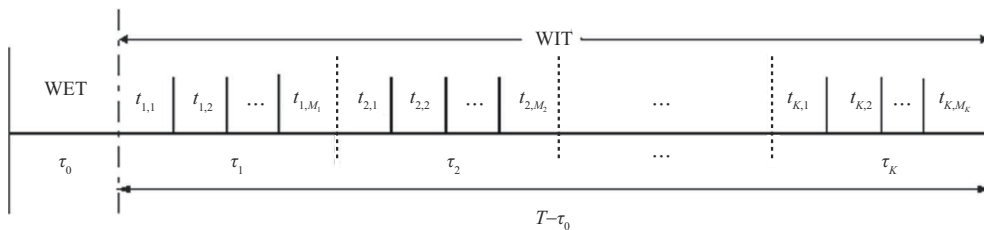


图 2 TDMA-TDMA 传输方案

表1 信道系数和路径损耗符号

参数符号	参数描述
$g_{d,k,m} \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$	电站到 $\mathcal{D}_{k,m}$ 的信道系数
$\mathbf{g}_{0,k,m} \in \mathbb{C}^{1 \times N}$	电站到 RIS 的信道系数
$\mathbf{h}_{0,k,m} \in \mathbb{C}^{1 \times N}$	$\mathcal{D}_{k,m}$ 到 RIS 的信道系数
$h_{d,k,m} \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$	$\mathcal{D}_{k,m}$ 到接入点的信道系数
$\mathbf{g}_{r,k,m} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$	RIS 到 $\mathcal{D}_{k,m}$ 的信道系数
$\mathbf{h}_{r,k,m} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$	RIS 到接入点的信道系数
λ_{PD}	电站到 $\mathcal{D}_{k,m}$ 的路径损耗
λ_{PR}	电站到 RIS 的路径损耗
λ_{DR}	$\mathcal{D}_{k,m}$ 到 RIS 的路径损耗
λ_{DA}	$\mathcal{D}_{k,m}$ 到接入点的路径损耗
λ_{RD}	RIS 到 $\mathcal{D}_{k,m}$ 的路径损耗
λ_{RA}	RIS 到接入点的路径损耗

1.3 优化问题的构建

定义实际相移为 $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_{k,m} = \text{diag}(\beta_{k,m,1} e^{j(\alpha_{k,m,1} + \alpha_{E,k,m,1})}, \dots, \beta_{k,m,N} e^{j(\alpha_{k,m,N} + \alpha_{E,k,m,N})})$, 其中 $\beta_{k,m,n} \in [0,1]$ 和 $\alpha_{k,m,n} \in [0,2\pi), \forall k \in [0,K], \forall m \in \mathcal{M}, \forall n \in \mathcal{N}$ 分别为幅度和相位。为最大化接收到的能量或信息信号强度, 将振幅设置为 1。定义 $\alpha_{E,k,m,n}$ 为加性 PSE, 服从均匀分布, 即 $\alpha_{E,k,m,n} \sim \mathcal{U}(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$, $\forall m \in \mathcal{M}, \forall n \in \mathcal{N}^{[31]}$ 。令 $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_{k,m} = \boldsymbol{\theta}_{L,k,m} \boldsymbol{\theta}_{E,k,m} \boldsymbol{\theta}_{L,k,m} = \text{diag}[e^{j\alpha_{k,m,1}}, \dots, e^{j\alpha_{k,m,N}}] \boldsymbol{\theta}_{E,k,m} = \text{diag}[e^{j\alpha_{E,k,m,1}}, \dots, e^{j\alpha_{E,k,m,N}}]$ 。在 WET 期间, 本文采用分数 NLEH 模型^[32], $\mathcal{D}_{k,m}$ 处收获的能量为

$$E_{k,m} = \frac{\tau_0 (t_{k,m} \varsigma_{k,m} - \kappa_{k,m}) P_0 |g_{d,k,m} + \mathbf{g}_{0,k,m} \tilde{\boldsymbol{\theta}}_{0,m} \mathbf{g}_{r,k,m}|^2}{\varsigma_{k,m} P_0 |g_{d,k,m} + \mathbf{g}_{0,k,m} \tilde{\boldsymbol{\theta}}_{0,m} \mathbf{g}_{r,k,m}|^2 + \varsigma_{k,m}^2} \quad (2)$$

其中, $t_{k,m} = 2.463, \kappa_{k,m} = 1.635, \varsigma_{k,m} = 0.826$ ^[32]; $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_{0,m}$ 和 P_0 分别表示在 τ_0 持续时间内的 RIS 相移矩阵和电站的发射功率。定义

$$p_{0,k,m} = |g_{d,k,m} + \mathbf{g}_{0,k,m} \tilde{\boldsymbol{\theta}}_{0,m} \mathbf{g}_{r,k,m}|^2 = |g_{d,k,m} + \mathbf{g}_{0,k,m} \boldsymbol{\theta}_{L,0,m} \boldsymbol{\theta}_{E,0,m} \mathbf{g}_{r,k,m}|^2 = |g_{d,k,m} + \boldsymbol{\theta}_{L,0,m} \mathbf{d}_{0,k,m}|^2 \quad (3)$$

$$p_{1,k,m} = |h_{d,k,m} + \mathbf{h}_{0,k,m} \tilde{\boldsymbol{\theta}}_{k,m} \mathbf{h}_{r,k,m}|^2 = |h_{d,k,m} + \mathbf{h}_{0,k,m} \boldsymbol{\theta}_{L,k,m} \boldsymbol{\theta}_{E,k,m} \mathbf{h}_{r,k,m}|^2 = |h_{d,k,m} + \boldsymbol{\theta}_{L,k,m} \mathbf{d}_{1,k,m}|^2 \quad (4)$$

其中,

$$\mathbf{d}_{0,k,m} = \boldsymbol{\theta}_{E,0,m} \text{diag}(\mathbf{g}_{0,k,m}) \mathbf{g}_{r,k,m} = \boldsymbol{\theta}_{E,0,m} \mathbf{g}_{c,k,m}, \mathbf{d}_{1,k,m} = \boldsymbol{\theta}_{E,k,m} \text{diag}(\mathbf{h}_{0,k,m}) \mathbf{h}_{r,k,m} = \boldsymbol{\theta}_{E,k,m} \mathbf{h}_{c,k,m}$$

$$\boldsymbol{\theta}_{L,k,m} = [\boldsymbol{\theta}_{L,k,m,1}, \dots, \boldsymbol{\theta}_{L,k,m,N}] = [e^{j\alpha_{k,m,1}}, \dots, e^{j\alpha_{k,m,N}}]$$

$$|\boldsymbol{\theta}_{L,k,m,n}| = 1, \forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M}, \forall n \in \mathcal{N}$$

$$\boldsymbol{\theta}_{L,0,m} = [\boldsymbol{\theta}_{L,0,m,1}, \dots, \boldsymbol{\theta}_{L,0,m,N}] = [e^{j\alpha_{0,m,1}}, \dots, e^{j\alpha_{0,m,N}}]$$

$$|\boldsymbol{\theta}_{L,0,m,n}| = 1, \forall m \in \mathcal{M}, \forall n \in \mathcal{N}$$

其中, $\boldsymbol{\theta}_{E,0,m}$ 和 $\boldsymbol{\theta}_{E,k,m}$ 分别表示 WET 和 WIT 过程中的 PSE。为了减小开销, 本文假设 RIS 的相移和 PSE 在每个集群分配的专用时隙内保持不变, 即 $\boldsymbol{\theta}_{L,k,1} = \dots = \boldsymbol{\theta}_{L,k,M_k}, \boldsymbol{\theta}_{E,k,1} = \dots = \boldsymbol{\theta}_{E,k,M_k}, \forall k \in [0,K]$ 。因此, $\mathcal{D}_{k,m}$ 处的 SNR 表示为

$$\zeta_{k,m} = \frac{t\tau_0 (\iota_{k,m} \varsigma_{k,m} - \kappa_{k,m}) p_{0,k,m} p_{1,k,m}}{t_{k,m} (\varsigma_{k,m} P_0 p_{0,k,m} + \varsigma_{k,m}^2)} \quad (5)$$

其中, $t = \frac{P_0}{\sigma^2}$, σ^2 是接入点处的噪声功率。则第 k 个集群的可达吞吐量为

$$R_{k,M_k} = \sum_{m=1}^{M_k} t_{k,m} \text{lb}(1 + \zeta_{k,m}) \quad (6)$$

本文通过联合优化 WET 和 WIT 的时隙分配与相移设计, 以最大化总体吞吐量。该目标涵盖多个相互关联的因素, 包括单个设备的 SNR、PSE 以及从电站到设备 $\mathcal{D}_{k,m}$ 和从 $\mathcal{D}_{k,m}$ 到接入点的级联链路的不完美 CSI。因此, 优化问题可表述为

$$\begin{aligned} \text{P1: } & \max_{\Omega} \min_{\{e_{0,k,m}, e_{1,k,m}\}} \sum_{k=1}^K R_{k,M_k} \\ \text{s.t. } & \text{C1: } |e^{j\alpha_{k,m,n}}| = 1, \forall k \in [0,K], \forall m \in \mathcal{M}, \forall n \in \mathcal{N} \\ & \text{C2: } \alpha_{E,k,m,n} \sim \mathcal{U}(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}), \forall k \in [0,K], \forall m \in \mathcal{M}, \forall n \in \mathcal{N} \\ & \text{C3: } \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} t_{k,m} + \tau_0 \leq 1, t_{k,m} \geq 0, \tau_0 \geq 0 \\ & \text{C4: } \zeta_{k,m} \geq \zeta_0 \\ & \text{C5: } \|\mathbf{e}_{0,k,m}\|^2 \leq \psi_0 \|\hat{\mathbf{g}}_{e,k,m}\|^2 \\ & \text{C6: } \|\mathbf{e}_{1,k,m}\|^2 \leq \psi_1 \|\hat{\mathbf{h}}_{e,k,m}\|^2 \\ & \text{C7: } \Omega = [\{\tilde{\boldsymbol{\theta}}_{0,m}\}, \{\tau_0\}, \{\tilde{\boldsymbol{\theta}}_{k,m}, t_{k,m}\}_{m=1, k=1}^{M_k, K}] \quad (7) \end{aligned}$$

其中, 约束 C1、C2 和 C3 分别为 RIS 相移约束、加性 PSE 约束和可用时间约束, 约束 C4 保证了单个设备的 SNR, 约束 C5 和 C6 是 CSI 误差造成的。

2 资源分配算法设计

由于多个优化变量之间的复杂耦合以及不完美

CSI 带来的约束, 问题 P1 的目标函数是非凸的。为解决这一问题, 首先需处理 CSI 的不确定性。根据问题 P1, 实现目标函数最大化的前提是满足约束 C5 和约束 C6。为了简化分析且不失一般性, 将 $\mathbf{e}_{0,k,m} = \sqrt{\psi_0} \hat{\mathbf{g}}_{e,k,m}$ 和 $\mathbf{e}_{1,k,m} = \sqrt{\psi_1} \hat{\mathbf{h}}_{e,k,m}$ 视为常数, 以便于后续处理。然后, 采用对偶法和 KKT 条件推导出一个理想的 SNR 解, 将得到的理想 SNR 解与约束 C4 进行比较得到问题 P1 的最优 SNR, 进而推导出 τ_0 和 $t_{k,m}$ 的封闭表达式。接下来, 将 WIT 阶段的 RIS 相移从目标函数中分离出来并推导出其最优解表达式。最后, 本文采用 EBCD 法, 以优化 WET 阶段的 RIS 相移。

2.1 最佳时间分配 $t_{k,m}$ 和 τ_0

为满足单个设备的 SNR 约束, 必须在不考虑约束 C4 的情况下最大化总体吞吐量。定义 $A_{k,m} = t_{k,m} \varsigma_{k,m} - \kappa_{k,m}$, $B_{k,m} = \varsigma_{k,m} P_0$ 。通过引入与约束 C3 相关的对偶变量 $\mu \geq 0$, 问题 P1 的拉格朗日函数可以写为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\tau_0, t_{k,m}, \mu) &= \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} t_{k,m} \cdot \\ &\text{lb} \left(1 + \frac{\tau_0 A_{k,m} P_{0,k,m} P_{1,k,m}}{t_{k,m} (B_{k,m} P_{0,k,m} + \varsigma_{k,m}^2)} \right) - \\ &\mu \left(\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} t_{k,m} + \tau_0 - 1 \right) \end{aligned} \quad (8)$$

定义 $\zeta_{k,m} = \zeta'_{k,m} \frac{\tau_0}{t_{k,m}}$, 其中 $\zeta'_{k,m} = \frac{A_{k,m} P_{0,k,m} P_{1,k,m}}{B_{k,m} P_{0,k,m} + \varsigma_{k,m}^2}$,

根据 KKT 条件可得

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \tau_0} = \frac{1}{\ln 2} \left(\ln(1 + \zeta_{k,m}) - \frac{\zeta_{k,m}}{1 + \zeta_{k,m}} \right) - \mu = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial t_{k,m}} = \frac{1}{\ln 2} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \frac{\zeta'_{k,m}}{1 + \zeta_{k,m}} - \mu = 0 \quad (10)$$

$$\mu^* \left(\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} t_{k,m} + \tau_0 - 1 \right) = 0 \quad (11)$$

P1 的最优性满足约束 C3 中的等式, 进而推导出式(11)中存在对偶变量 $\mu^* \geq 0$ 。通过一些简单的数学运算, 可得

$$f_1(\zeta_{k,m}) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \frac{\zeta'_{k,m}}{1 + \zeta_{k,m}}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (12)$$

其中, $f_1(x) = \ln(1+x) - \frac{x}{1+x}, x > 0$ 是一个单调

递增的函数。由于 $f_1(\zeta_{1,1}) = \dots = f_1(\zeta_{1,M_1}) = \dots = f_1(\zeta_{K,1}) = \dots = f_1(\zeta_{K,M_K})$, 则 $\zeta_{1,1} = \dots = \zeta_{1,M_1} = \dots = \zeta_{K,1} = \dots = \zeta_{K,M_K} = \bar{\zeta}$, 可得

$$\ln(1 + \bar{\zeta}) - \frac{\bar{\zeta}}{1 + \bar{\zeta}} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \frac{\zeta'_{k,m}}{1 + \bar{\zeta}} \quad (13)$$

$$\omega(\bar{\zeta}) e^{\omega(\bar{\zeta})} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \zeta'_{k,m} - 1}{e} \quad (14)$$

其中, $\omega(\bar{\zeta}) = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \zeta'_{k,m} - 1}{1 + \bar{\zeta}}$, 其最优值表示为 ω^* 。

根据 $x e^x = y \Rightarrow x = \mathcal{W}(y)$, 可得通用 SNR 为^[33]

$$\bar{\zeta} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \zeta'_{k,m} - 1}{\omega^*} - 1 \quad (15)$$

然而, $\bar{\zeta}$ 的值可能会违反问题 P1 中的约束 C4, 为避免这一冲突, 最佳 SNR 可以表示为

$$\zeta^* = \max \{ \bar{\zeta}, \zeta_0 \} \quad (16)$$

将式(16)代入 $\zeta_{k,m} = \zeta'_{k,m} \frac{\tau_0}{t_{k,m}}$, 可推导出 $t_{k,m}$ 和 τ_0

的封闭表达式分别为

$$t_{k,m}^* = \frac{\zeta'_{k,m}}{\zeta^* + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \zeta'_{k,m}} \quad (17)$$

$$\tau_0^* = \frac{\zeta^*}{\zeta^* + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \zeta'_{k,m}} \quad (18)$$

2.2 最佳 WIT 相移 $\theta_{L,k,m}$

将式(17)代入问题 P1 中, 其目标函数可被表述为

$$f_2(\zeta'_{k,m}) = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \zeta'_{k,m}}{\zeta^* + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \zeta'_{k,m}} \text{lb}(1 + \zeta^*), \forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (19)$$

式(19)可以看作由等式 $\varphi(x) = \frac{x}{\Delta + x} \text{lb}(1 + \Delta)$

定义的一类函数, 其中, Δ 表示一个常数。该函数的一阶导数推导为

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\Delta}{(\Delta + x)^2} \ln(1 + \Delta) > 0 \quad (20)$$

可以看出, 式(20)是关于变量 $\xi'_{k,m}$ 单调递增的函数。因此, 最大化 f_2 可以等价于最大化 $\xi'_{k,m}$ 。问题 P1 可以简化为

$$\begin{aligned} \text{P2: } \max_{\theta_{L,k,m}, \theta_{L,0,m}} & \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \frac{A_{k,m} p_{0,k,m} p_{1,k,m}}{B_{k,m} p_{0,k,m} + \zeta_{k,m}^2} \\ \text{s.t. } \text{C1: } & |e^{j\alpha_{k,m,n}}| = 1, \forall k \in [0, K], \forall m \in \mathcal{M}, \forall n \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (21)$$

由于分式规划和单位模量约束的存在, 求解问题 P2 非常困难。为解决这一问题, 首先推导出 WIT 期间相移的闭式解, 即 $\theta_{L,k,m}, \forall k \in [0, K], \forall m \in \mathcal{M}$ 。从式(4)和式(6)可以看出, 除了单位模数相移的约束外, $\theta_{L,k,m}$ 的取值仅依赖于目标函数, 该目标函数关于 $|h_{d,k,m} + \theta_{L,k,m} \mathbf{d}_{1,k,m}|^2$ 单调递增。因此, 可以将问题 P2 转化为以下子问题以得出最优解

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} 2\sqrt{\tilde{A}_{k,m}} \Re \{ \text{conj}(s_{k,m}) \theta_{L,0,m} \mathbf{d}_{0,k,m} + \text{conj}(s_{k,m}) \mathbf{g}_{d,k,m} \} - \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} |s_{k,m}|^2 (B_{k,m} |\theta_{L,0,m} \mathbf{d}_{0,k,m} + \mathbf{g}_{d,k,m}|^2 + \zeta_{k,m}^2) \end{aligned} \quad (25)$$

其中, $\Re \{ \cdot \}$ 表示取复数实部的操作符, $s_{k,m}^* = \frac{\sqrt{\tilde{A}_{k,m}} (\theta_{L,0,m} \mathbf{d}_{0,k,m} + \mathbf{g}_{d,k,m})}{B_{k,m} |\theta_{L,0,m} \mathbf{d}_{0,k,m} + \mathbf{g}_{d,k,m}|^2 + \zeta_{k,m}^2}$ 表示应用拉格朗日乘子法获得的最优 $s_{k,m}$ 。为进一步处理式(25), 可将求解 θ_0 的问题转换为

$$\begin{aligned} \text{P5: } \min_{\theta_0} & f_3(\theta_0) = \theta_0 \mathbf{U}_0 \theta_0^H - 2\Re \{ \theta_0 \boldsymbol{\gamma} \} - C \\ \text{s.t. } \text{C1: } & |\theta_0(n)| = 1, \forall n \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (26)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_0 &= - \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} |s_{k,m}^2| B_{k,m} \mathbf{d}_{0,k,m} \mathbf{d}_{0,k,m}^H \\ \boldsymbol{\gamma} &= \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \sqrt{\tilde{A}_{k,m}} \text{conj}(s_{k,m}) \mathbf{d}_{0,k,m} - \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} |s_{k,m}|^2 B_{k,m} \text{conj}(\mathbf{g}_{d,k,m}) \mathbf{d}_{0,k,m} \\ C &= \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} (|s_{k,m}|^2 B_{k,m} \mathbf{g}_{d,k,m} \text{conj}(\mathbf{g}_{d,k,m}) + |s_{k,m}|^2 \zeta_{k,m}^2) - \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} 2\Re \left\{ \sqrt{\tilde{A}_{k,m}} \text{conj}(s_{k,m}) \mathbf{g}_{d,k,m} \right\} \end{aligned}$$

$$\text{P3: } \max_{\theta_{L,k,m}} |h_{d,k,m} + \theta_{L,k,m} \mathbf{d}_{1,k,m}|^2$$

$$\text{s.t. } \text{C1: } |e^{j\alpha_{k,m,n}}| = 1, \forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (22)$$

当 RIS 反射信号与直接信号对齐时, 上行链路的信道有效功率增益最大^[11], 其最优解表达式为

$$\theta_{L,k,m,n}^* = e^{j(\arg(h_{d,k,m}) - \arg(d_{1,k,m,n}))} \quad (23)$$

其中, $\arg(\cdot)$ 表示相位运算符, $d_{1,k,m,n}$ 表示 $\mathbf{d}_{1,k,m}$ 的第 n 个元素。由于 $\theta_{L,k,m,n} = 1$, 最佳相移 $\theta_{L,k,m}^*$ 可以通过 $\theta_{L,k,m}^*$ 获得。

2.3 最佳 WET 相移 $\theta_{0,k,m}$

为简洁, 将 $\theta_{0,k,m}$ 记为 θ_0 。将 $\tilde{p}_{1,k,m} = |h_{d,k,m} + \theta_{L,k,m}^* \mathbf{d}_{1,k,m}|^2$ 代入问题 P2 可得

$$\begin{aligned} \text{P4: } \max_{\theta_{L,0,m}} & \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \frac{\tilde{A}_{k,m} p_{0,k,m}}{B_{k,m} p_{0,k,m} + \zeta_{k,m}^2} \\ \text{s.t. } \text{C1: } & |e^{j\alpha_{0,m,n}}| = 1, \forall m \in \mathcal{M}, \forall n \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (24)$$

其中, $\tilde{A}_{k,m} = A_{k,m} \tilde{p}_{1,k,m}$ 。为了解决问题 P4, 先通过 QT 方法将分式目标函数转换为易于处理的形式, 引入向量 $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{KM \times 1}$, 可得

忽略不相关常数项, 问题 P5 的函数仍然是非凸的。因此, 本文采用 EBCD 法, 在单位模数约束下迭代优化 θ_0 。将 θ_0 和 $\boldsymbol{\gamma}$ 的第 i 个元素分别记为 $\theta_0(i)$ 和 $\boldsymbol{\gamma}(i)$, $\mathbf{U}_0(ij)$ 为 \mathbf{U}_0 的第 i 行、第 j 列的项。 $f_3(\theta_0)$ 中的每一项分别表示为^[34]

$$\begin{aligned} \theta_0 \mathbf{U}_0 \theta_0^H &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \theta_0(i) \mathbf{U}_0(ij) \theta_0^\dagger(j) = \\ & \theta_0(l) \mathbf{U}_0(l,l) \theta_0^\dagger(l) + \sum_{i \neq l}^N \sum_{j \neq l}^N \theta_0(i) \mathbf{U}_0(ij) \theta_0^\dagger(j) + \\ & \sum_{i \neq l}^N \theta_0(i) \mathbf{U}_0(i,l) \theta_0^\dagger(l) + \sum_{j \neq l}^N \theta_0(l) \mathbf{U}_0(l,j) \theta_0^\dagger(j) \\ \theta_0 \boldsymbol{\gamma} &= \sum_{i=1}^N \theta_0(i) \boldsymbol{\gamma}(i) = \theta_0(l) \boldsymbol{\gamma}(l) + \sum_{i \neq n}^N \theta_0(i) \boldsymbol{\gamma}(i) \end{aligned}$$

其中, θ_0^\dagger 表示为 θ_0 的共轭转置。由于 $|\theta_0(l)|^2 = 1, \forall l \in \mathcal{N}$, 去除不相关的常数项后可得

$$\begin{aligned} \text{P6: } \min_{\theta_0(l)} & f_4(\theta_0(l)) = \mathbf{U}_0(l,l) - 2\Re \{ \theta_0(l) \boldsymbol{\gamma}_1(l) \} \\ \text{s.t. } \text{C1: } & |\theta_0(l)| = 1, \forall l \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (27)$$

其中, $\gamma_1(l) = \gamma(l) - \sum_{j \neq l}^N U_0(lj) \theta_0^\dagger(j)$ 。P6 是一个凹二次函数, θ_0 的闭式解表达式推导为

$$(\theta_0(l))^* = \frac{\gamma_1(l)}{|\gamma_1(l)|}, \forall l \in \mathcal{N} \quad (28)$$

2.4 收敛性和复杂度分析

本节将进一步讨论所提的基于EBCD法求解 θ_0 的算法, 其具体实现步骤如下。

1) 初始化: 初始迭代次数 $r = 1$, 最大迭代次数 $I_1 = 20$, 可行解表示为 θ_0 , 收敛精度 $\varepsilon = 10^{-5}$ 。

2) 给定 $(\theta_0(n))^r, \forall n \in [1, N], l \neq n$, 通过式(28)求解得到 $(\theta_0(l))^{r+1}$ 。

3) 更新 $\theta_0^{(r+1)}$ 并求解 f_4 得到 $f_4(\theta_0^{(r+1)})$ 。

4) 当满足条件 $\frac{|f_4(\theta_0^{(r+1)}) - f_4(\theta_0^{(r)})|}{f_4(\theta_0^{(r+1)})} \leq \varepsilon$, 停止更新。

在每一轮迭代中, 由式(28)得到问题P6的局部最优解 $(\theta_0(l))^*$ 。将 $(\theta_0(l))^*$ 第 r 轮迭代的初始值设为 $\theta_0^{(r)}$, 所提的基于EBCD法更新迭代后的值为 $\theta_0^{(r+1)}$ 。问题P5中的目标函数不再随迭代次数单调递增, 即 $f(\theta_0^{(r)}) \geq f(\theta_0^{(r+1)})$, 则表明算法达到了稳定的收敛点。所提算法的复杂度为 $\mathcal{O}(KMI_1N^2)$, 其中 I_1 表示基于QT的EBCD迭代次数, 以保证其收敛性。

3 仿真结果分析

假设电站、RIS和接入点分别位于坐标 $(-10, 0, 0)$ m、 $(-2, 6, 2)$ m 和 $(10, 0, 0)$ m 处。 $\mathcal{D}_{k,m}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M}$ 均匀分布在 $x-z$ 平面上以圆心为 $(0, O_k)$ 、半径为 6 m 的圆形区域内。2 个相邻集群间的距离假定为 5 m, 即 $y = 5$, 且每个集群内包含相同数量的IoT设备。假定 $O_k = \frac{x \times y}{2}, \forall x = 1, \dots, 2(k+1); O_k = -\frac{(x-1) \times y}{2}, \forall x = 2, \dots, 2k$ 。将与距离相关的路径损耗建模为 $L(d) = L_0 d^{-\lambda}$, 其中, L_0 是 1 m 参考距离下的路径损耗, λ 代表路径损耗指数。信道相关参数的描述如表1所示, 仿真参数设置如表2所示。

本文的模拟仿真将通过与以下基准方法进行比较, 从而对所提方案进行数值评估。

1) 随机 RIS 相移: RIS 的每个相移都是在

$\alpha_{E,k,m,n} \sim \mathcal{U}(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ 生成的, 时隙调度如2.1节所述。

2) 固定时间分配: WET 和 WIT 的传输时间是固定的, RIS 相移则根据2.2节和2.3节进行优化。

3) 无 RIS 辅助: 模型即传统 WPCN, 传输时间在相同条件下进行优化。

4) 吞吐量上界: 为每台设备设定一个特定的 SNR 阈值。为获取系统总吞吐量的上界, 设备的 SNR 可能会违反 SNR 约束。

参数	值	参数	值
L_0 /dB	-20	ψ_0	0.1
σ^2 /dBm	-100	ψ_1	0.1
P_0 /dBm	30	λ_{PD}	3.5
K	3	λ_{PR}	2
N	40	λ_{DR}	2.5
M_k	10	λ_{DA}	3.5
T	1	λ_{RD}	2.5
ζ_0 /dB	20	λ_{RA}	2

图3为总吞吐量与CSI误差因子的关系。在完美CSI的理想条件下, 系统吞吐量受PSE影响下降约20%; 在不完美CSI条件下, 吞吐量随CSI误差因子的增大而显著下降; 在PSE与CSI误差共同作用下, 吞吐量下降幅度接近30%, 性能劣化最为显著。实际上, 由于CSI的不完美性和PSE的存在, 接入点和电站难以有效利用可用的空间自由度进行资源分配。

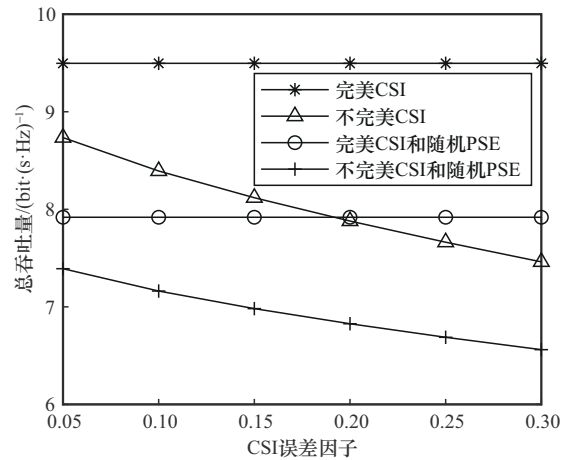


图3 总吞吐量与CSI误差因子的关系

图4为总吞吐量与集群数目 K 的关系。结果表明, 随着集群数目的增加, 总吞吐量呈上升趋势,

但增长率逐渐减缓。随着网络规模的扩大，边缘设备与电站、RIS 和接入点的距离增加，不可避免地削弱了它们的能量收集和 Information 传输能力。

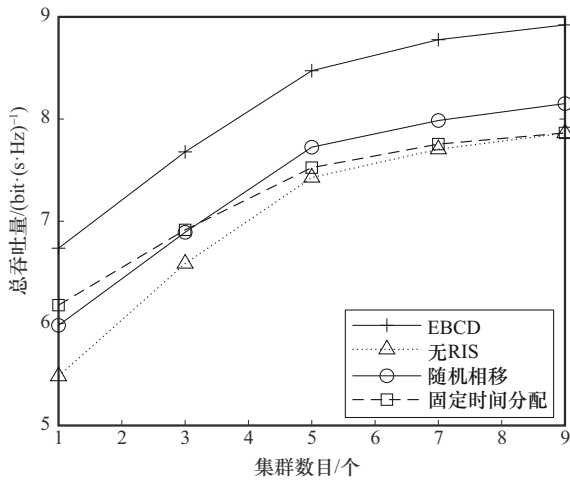


图 4 总吞吐量与集群数目 K 的关系

图 5 评估了总吞吐量与 RIS 反射单元数目的关系。结果表明，较大规模 RIS 能够利用更多的自由度来改善传播环境，从而实现更显著的无源波束成形增益。图 6 为电站发射功率 P_0 变化对总吞吐量的影响。结果表明，电站发射功率 P_0 的增加导致总吞吐量相应上升。图 7 为总吞吐量与 RIS 部署位置的关系， X_{RIS} 坐标位置被用于评估 RIS 部署位置。结果表明，与 RIS 相关的场景总吞吐量随着 X_{RIS} 的增加而增加，但在 $X_{RIS} \geq 0$ 后则会出现下降。这表明，RIS 的合理部署能显著提高系统吞吐量。图 4~图 7 的结果表明，系统总吞吐量受到网络规模、RIS 规模和 RIS 位置的影响，但本文方案在各种情况下均有明显优势。

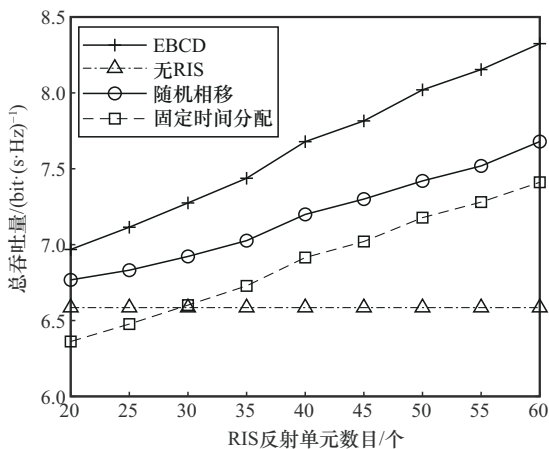


图 5 总吞吐量与 RIS 反射单元数目的关系

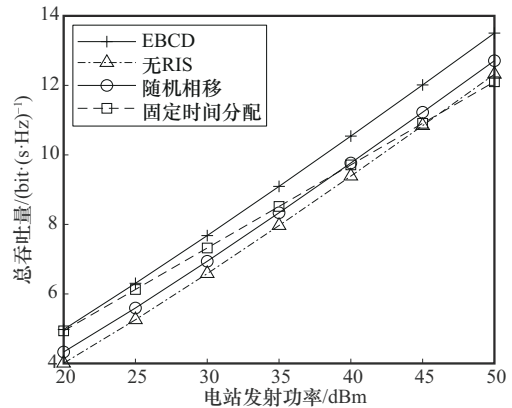


图 6 电站发射功率 P_0 变化对总吞吐量的影响

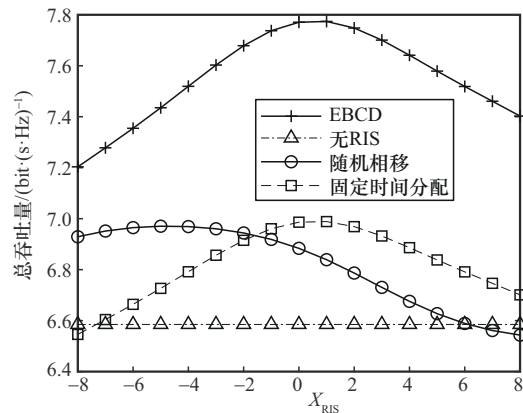


图 7 总吞吐量与 RIS 部署位置的关系

图 8 和图 9 分别展示了不同 SNR (即 $\xi_0 = 20$ dB、 $\xi_0 = 30$ dB、 $\xi_0 = 40$ dB) 约束下总吞吐量与电站发射功率和 RIS 反射单元数目的关系。结果表明，当传输功率较低或 RIS 规模较小时，较高的 SNR 约束会导致系统性能显著下降。尤其在单个设备对生存能力要求较高的情况下，为满足其 SNR 约束，系统资源分配将更侧重于边缘设备，从而导致整体吞吐量下降。随着电站发射功率或 RIS 反射单元数目的增加，系统吞吐量显著提升，并在不同 SNR 阈值下趋于一致。这表明，当电站发射功率或 RIS 规模足以保障设备 SNR 需求时，SNR 约束不再成为限制系统性能的主要因素，系统吞吐量接近其理论上限。

图 10 为总吞吐量与信噪比阈值的关系。结果表明，在添加各设备最低 SNR 约束后，无 RIS 辅助方案、随机相移方案以及本文方案均能够实现更高的系统吞吐量，且本文方案表现更优。然而，随着 SNR 约束阈值的进一步提升，系统需为边缘设备分配更多资源，导致整体吞吐量显著下降，其中，无 RIS 和随机相移方案的性能下降尤为明显，固定时

间分配方案对 SNR 阈值的变化不敏感, 说明其难以有效保障各设备的生存能力。这一结果揭示了单个设备生存能力与系统整体性能之间的权衡关系, 同时体现出 SNR 约束水平的设置对系统资源分配策略的重要影响。

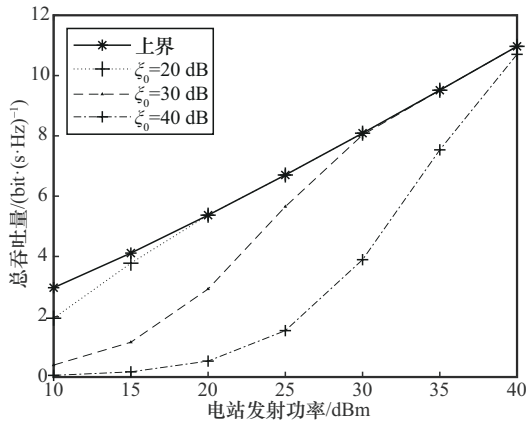


图8 信噪比约束下总吞吐量与电站发射功率的关系

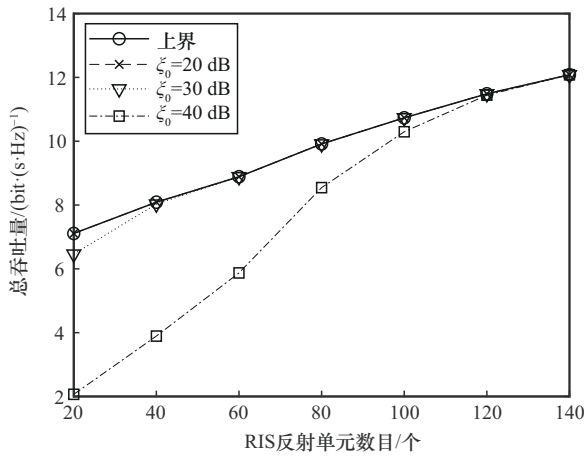


图9 信噪比约束下总吞吐量与RIS反射单元数目的关系

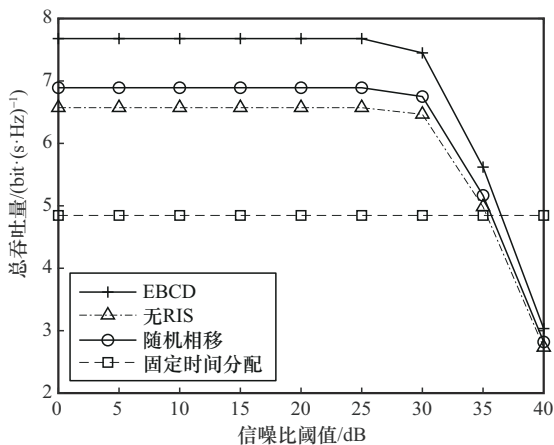


图10 总吞吐量与信噪比阈值的关系

图11和图12分别展示了优化后的WET收集的能源和优化后的时间调度。可以看出, 本文方案随着RIS反射单元数目的增加, WET的持续时间 τ_0 有所减少, 而收获的能量则呈上升趋势, 这主要是因为在上行WIT中可以利用更多的时间自由度进行信息传输。

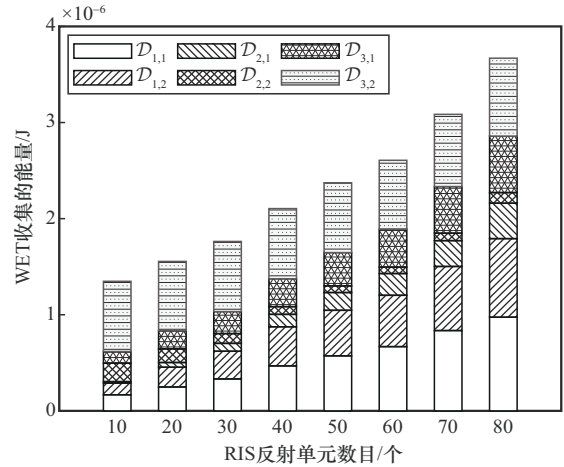


图11 优化后的WET收集的能源

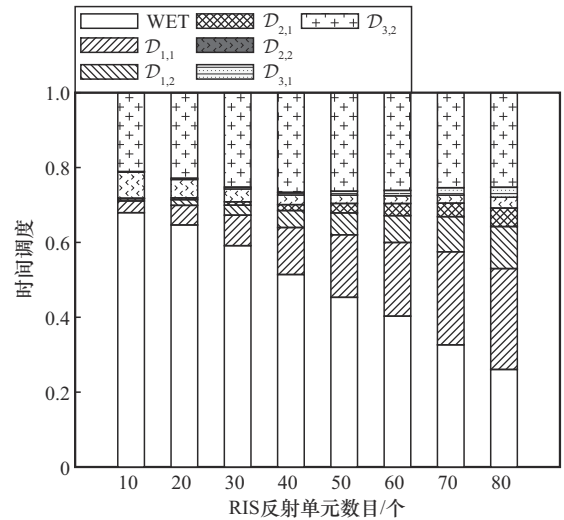


图12 优化后的时间调度

4 结束语

本文探讨了RIS驱动的多集群WPCN, 提出了重点关注单个设备的生存能力的网络总吞吐量最大化问题。该优化问题受到PSE、RIS相移、分配时间和单个设备的接收SNR的约束。仿真结果验证了本文方案的有效性。严格的SNR限制可能会导致分配给边缘设备的时间减少, 从而降低整体吞吐量性能。这一现象反映了系统整体吞吐量与多设备

生存性保障之间的权衡。基于此初步研究,笔者将在今后的工作中进一步探讨 RIS 赋能的多集群 WPCN 中的其他问题,如集群规模优化问题、收发器硬件损坏问题以及鲁棒资源分配优化问题。

参考文献:

- [1] VAEZI M, AZARIA, KHOSRAVIRAD S R, et al. Cellular, wide-area, and non-terrestrial IoT: a survey on 5G advances and the road toward 6G[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(2): 1117-1174.
- [2] BI S Z, ZENG Y, ZHANG R. Wireless powered communication networks: an overview[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(2): 10-18.
- [3] CHU Z, ZHU Z Y, ZHOU F H, et al. Intelligent reflecting surface assisted wireless powered sensor networks for Internet of Things[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(7): 4877-4889.
- [4] JU H, ZHANG R. Throughput maximization in wireless powered communication networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(1): 418-428.
- [5] DI RENZO M, ZAPPONE A, DEBBAH M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(11): 2450-2525.
- [6] RENZO M D, DEBBAH M, PHAN-HUY D T, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: an idea whose time has come[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019, 2019(1): 129.
- [7] BUSARI S A, HUQ K M S, MUMTAZ S, et al. Millimeter-wave massive MIMO communication for future wireless systems: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(2): 836-869.
- [8] ZHANG H J, HUANG S T, JIANG C X, et al. Energy efficient user association and power allocation in millimeter-wave-based ultra dense networks with energy harvesting base stations[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(9): 1936-1947.
- [9] CHEN X M, ZHONG C J, YUEN C, et al. Multi-antenna relay aided wireless physical layer security[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(12): 40-46.
- [10] 王丹, 陈小梦, 王勇芳. 可重构智能表面辅助无线通信的用户分配[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(7): 2425-2430.
WANG D, CHEN X M, WANG Y F. User assignment for wireless communication assisted by reconfigurable intelligent surfaces[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(7): 2425-2430.
- [11] CHU Z, XIAO P, SHOJAFAR M, et al. Utility maximization for IRS assisted wireless powered mobile edge computing and caching (WP-MECC) networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(1): 457-472.
- [12] LYU B, RAMEZANI P, HOANG D T, et al. Optimized energy and information relaying in self-sustainable IRS-empowered WPCN[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(1): 619-633.
- [13] CHU Z, XIAO P, MI D, et al. A novel transmission policy for intelligent reflecting surface assisted wireless powered sensor networks[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2021, 15(5): 1143-1158.
- [14] 杨震, 冯璇, 吕斌. 智能反射面辅助的两跳中继无线供电通信网络吞吐量最大化研究[J]. *通信学报*, 2022, 43(9): 90-99.
YANG Z, FENG X, LYU B. Research on throughput maximization for intelligent reflecting surface assisted dual-hop relay wireless powered communication network[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(9): 90-99.
- [15] ZHU Z Y, LI Z, CHU Z, et al. Resource allocation for intelligent reflecting surface assisted wireless powered IoT systems with power splitting[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(5): 2987-2998.
- [16] HUA M, WU Q Q. Joint dynamic passive beamforming and resource allocation for IRS-aided full-duplex WPCN[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(7): 4829-4843.
- [17] CHU Z, ZHU Z Y, LI X W, et al. Resource allocation for IRS-assisted wireless-powered FDMA IoT networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(11): 8774-8785.
- [18] MAO S, LIU L, ZHANG N, et al. Intelligent reflecting surface-assisted low-latency federated learning over wireless networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(2): 1223-1235.
- [19] JIANG W, SCHOTTEN H D. User scheduling and passive beamforming for FDMA/OFDMA in intelligent reflection surface[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [20] SONG D, SHIN W, LEE J. A maximum throughput design for wireless powered communication networks with IRS-NOMA[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(4): 849-853.
- [21] 雷维嘉, 于顺洪, 雷宏江, 等. 智能反射表面辅助的非正交多址接入系统用户分组、波束赋形与相移的优化[J]. *电子与信息学报*, 2024, 46(3): 858-866.
LEI W J, YU S H, LEI H J, et al. Optimization of user pairing, beamforming and phase-shifting for intelligent reflecting surface assisted non-orthogonal multiple access systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(3): 858-866.
- [22] LYU B, RAMEZANI P, HOANG D T, et al. IRS-assisted downlink and uplink NOMA in wireless powered communication networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(1): 1083-1088.
- [23] ZENG M, LI X W, LI G, et al. Sum rate maximization for IRS-assisted uplink NOMA[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(1): 234-238.
- [24] CHEN G J, WU Q Q, HE C, et al. Active IRS aided multiple access for energy-constrained IoT systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(3): 1677-1694.
- [25] GUO Y Y, QIN Z J, LIU Y W, et al. Intelligent reflecting surface aided multiple access over fading channels[J]. *IEEE Transactions on Com-*

munications, 2021, 69(3): 2015-2027.

- [26] TANG K, ZHENG B X, JIAO F Y, et al. Joint resource allocation for maximizing energy efficiency in mmWave-based wireless-powered communication networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(6): 8514-8528.
- [27] ZHANG D C, WU Q Q, CUI M, et al. Throughput maximization for IRS-assisted wireless powered hybrid NOMA and TDMA[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(9): 1944-1948.
- [28] CHU Z, XIAO P, MI D, et al. Multi-IRS assisted multi-cluster wireless powered IoT networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(7): 4712-4728.
- [29] ZHAI L S, ZOU Y L, ZHU J. Robust transmission design for RIS-assisted multi-cluster wireless powered communications with hardware impairments[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(5): 3035-3050.
- [30] TRAN H V, KADDOUM G. Robust design of AC computing-enabled receiver architecture for SWIPT networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(3): 801-804.
- [31] CHU Z, ZHONG J, XIAO P, et al. RIS assisted wireless powered IoT networks with phase shift error and transceiver hardware impairment[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(7): 4910-4924.
- [32] CHEN Y F, ZHAO N, ALOUINI M S. Wireless energy harvesting using signals from multiple fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(11): 5027-5039.
- [33] MAO Z, HU F Y, WU W, et al. Joint distributed beamforming and backscattering for UAV-assisted WPSNs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(3): 1510-1522.
- [34] CHU Z, XIAO P, MI D, et al. IRS-assisted wireless powered IoT network with multiple resource blocks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(4): 2335-2350.

[作者简介]



邵凯 (1977-), 男, 云南普洱人, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为智能感知与信息系统、信号与信息智能处理。



毛恬恬 (2000-), 女, 江西抚州人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线携能通信网络、可重构智能表面。



王光宇 (1964-), 男, 贵州兴义人, 博士, 重庆邮电大学特聘教授, 主要研究方向为智能感知与信息系统、信号与信息智能处理。



楚征 (1986-), 男, 河南平顶山人, 博士, 宁波诺丁汉大学副教授, 主要研究方向为6G无线通信、物联网。