

doi:10.3969/j.issn.1003-3114.2025.05.002

引用格式: 谢文武,袁曾家,李桂林,等. STAR-RIS 辅助无线供能通信的吞吐量优化研究[J]. 无线电通信技术, 2025, 51(5): 891-898. [XIE Wenwu, YUAN Zengjia, LI Guilin, et al. Throughput Optimization of Active STAR-RIS Assisted Wireless Powered Communication Network[J]. Radio Communications Technology, 2025, 51(5): 891-898.]

STAR-RIS 辅助无线供能通信的吞吐量优化研究

谢文武¹,袁曾家¹,李桂林¹,李一鸣^{1*},黄杰²,周振威¹

(1. 湖南理工学院 信息科学与工程学院, 湖南 岳阳 414006;

2. 湖南六九零六信息科技股份有限公司, 湖南 岳阳 414006)

摘要:提出一种基于可同时透射和反射的有源可重构智能表面(Active Simultaneously Transmitting and Reflecting Reconfigurable Intelligent Surface, ASTAR-RIS)辅助的无线供能通信网络(Wireless Powered Communication Network, WPCN)。通信网络主要由采集供电站(Power Station, PS)、传感器节点组(Sensor Node Groups, SNGs)、ASTAR-RIS 和接入点(Access Point, AP)4个部分组成。通信系统的运行流程主要分为无线能量传输(Wireless Energy Transfer, WET)和无线信息传输(Wireless Information Transfer, WIT)2个阶段,在无线能量传输阶段采用能量分裂(Energy Splitting, ES)工作模式,在无线信息传输阶段采用分时(Time Switching, TS)工作模式。在联合优化 ASTAR-RIS 的相移参数和通信资源分配以及放大功率约束的情况下,最大化系统的信噪比,即系统的通信性能达到最佳。由于优化问题是非凸的,采用交替优化算法对问题进行求解,根据耦合的变量将问题分为2个部分,在交替优化算法的基础之上,利用半定松弛(Semidefinite Relaxation, SDR)和分式规划(Fractional Programming, FP)分别求解2个部分的变量的最优解。实验结果表明,提出的通信方案可以为系统提供更高的性能增益。

关键词:无线供能通信网络;同时透射和反射的有源可重构智能表面;凸优化

中图分类号:TN92

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1003-3114(2025)05-0891-08



Throughput Optimization of Active STAR-RIS Assisted Wireless Powered Communication Network

XIE Wenwu¹, YUAN Zengjia¹, LI Guilin¹, LI Yiming^{1*}, HUANG Jie², ZHOU Zhenwei¹

(1. School of Information Science and Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China;

2. Hunan 6906 Information Technology Co., Ltd., Yueyang 414006, China)

Abstract: In this paper, a Wireless Powered Communication Network (WPCN) based on Active Simultaneously Transmitting and Reflecting Reconfigurable Intelligent Surface (ASTAR-RIS) is proposed. The communication network is mainly composed of four parts: Power Station (PS), Sensor Node Groups (SNGs), ASTAR-RIS and Access Point (AP). The operation process of the communication system is mainly divided into two stages: Wireless Energy Transfer (WET) stage and Wireless Information Transfer (WIT) stage. Energy Splitting (ES) mode is adopted in the wireless energy transmission phase, and Time Switching (TS) mode is adopted in the wireless information transmission phase. This paper aims to optimize the phase shift parameters and communication resource allocation of ASTAR-RIS to maximize system throughput. Since the optimization problem is non-convex, this paper uses an alternate optimization algorithm to solve the problem. Firstly, the problem is divided into two parts according to the coupled variables. The optimal solutions of the variables in these two parts are solved by Semidefinite Relaxation (SDR) and Fractional Programming (FP) respectively. Experimental results show that the communication scheme proposed in this paper can provide higher performance gain for the system.

Keywords: WPCN; ASTAR-RIS; convex optimization

收稿日期:2025-04-22

基金项目:湖南省自然科学基金(2023JJ50045)

Foundation Item: Provincial Natural Science Foundation of Hunan(2023JJ50045)

0 引言

随着通信技术的迅速发展,对于通信速率的要求逐步提高,通信时所消耗的能量也越来越多。在一些偏远地区通信时,能量供应已经成为一个迫在眉睫的问题。为了适应时代发展,WPCN 受到了广泛关注。在 WPCN 中,传感节点通过采集到的能量进行供能和信息传输,从而有效提高了通信系统的能量利用率、增大了通信系统的信息吞吐量^[1]。文献[2]提出了一种 WPCN 协议,用于协调能量采集和信息传递。WPCN 的操作可分为 2 个部分:下行无线功率传输,各节点吸收基站发射的能量;上行无线信息传输,各节点利用第一部分收集的能量来发射信号^[3]。WPCN 通过 2 个部分协同合作,能有效提升系统的资源分配效率和信息传输能力^[4]。

近年来,RIS 因可以优化无线通信的频谱和能源效率,得到了广泛应用。RIS 通过对入射信号反射来有效提高通信系统的性能,同时建立视线链路来提高感测性能^[5]。RIS 研究仅支持同侧用户通信,限制了设备部署和实时通信效率^[6],无源 STAR-RIS (Passive STAR-RIS, PSTAR-RIS) 提出了解决方案,但仍存在双衰落效应,导致信号损耗严重^[7]。文献[8-9]提出了 PSTAR-RIS 的模型,并分析了 PSTAR-RIS 和传统 RIS 系统的分集增益,提出了 PSTAR-RIS 的 3 种工作方案,即 ES、模式切换 (Mode Switching, MS) 和 TS。考虑到双衰落的影响,将 WPCN 与 ASTAR-RIS 进行结合,既解决了系统中的无线设备能量受阻的问题,又进一步提升了系统的通信性能。

当前已有将 RIS 与 WPCN 结合的研究,文献[10]研究了在 WPCN 系统中加入 RIS 的最大化通信速率的问题,结果表明 RIS 辅助 WPCN 相较于传统的 WPCN 的性能更佳。文献[11]结合了 RIS、WPCN 和 NOMA,研究通信系统的最大上行数据量问题,表明该方案能满足更多级别的服务需求。文献[12]研究了在信息进行全双工通信下 RIS 辅助 WPCN 系统的吞吐量问题,表明 RIS 辅助能有效增强 WPCN 系统的性能。以上研究证明了 RIS 和 WPCN 系统结合的可行性,并对系统性能有较为明显的提升。文献[13]研究了 STAR-RIS 辅助的无人机搭载 WPCN 系统,并优化了在上行信息传输过程中信息量,表明该方案优于传统方案。文献[14]研究了 RIS 辅助 WPCN 和 SWIPT 的通信系统,模拟在

现实信道状态的情况下,对信道采用鲁棒分析方法,分析通信系统的能量和通信传输性能,得到了更为节能环保的通信系统。

ASTAR-RIS 相较传统的 RIS 能更好地提升通信系统性能。文献[15]引入 ASTAR-RIS 以提高非正交多址 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 网络辅助下行链路通信的多用户网络的系统性能,结果表明 ASTAR-RIS 辅助明显优于传统 RIS。文献[16]研究了 ASTAR-RIS 在提高多用户无线网络的能量和速率方面的应用,结果表明 ASTAR-RIS 能够兼顾能量可持续性和提高吞吐量性能。文献[17]研究了 ASTAR-RIS 辅助的 NOMA 中最大化通信速率问题,提出了 3 种不同的操作协议,结果表明 ASTAR-RIS 对于 NOMA 网络的性能提升优于加入 RIS 和 PSTAR-RIS,并且应用 TS 协议优于应用 ES 和 MS 协议。

然而,现阶段仅研究了 RIS 辅助 WPCN 通信系统,通常情况下 ASTAR-RIS 对于通信系统的提升也显著大于 RIS。因此,本文提出了 ASTAR-RIS 辅助 WPCN 通信系统,在保留 RIS 和 PSTAR-RIS 对于 WPCN 的通信与供能性能提升的优势下,还能大大减小传统 RIS 和 PSTAR-RIS 对于 WPCN 通信系统的负面影响。本文主要创新有:① 研究 ASTAR-RIS 辅助的通信系统,并将其分为 2 个工作阶段,且在每个工作阶段应用不同的工作模式,不同的工作模式能有效提升通信系统的性能。② 根据 2 个工作阶段的工作特点,提出了一个非凸优化问题,其优化目标为最大化通信系统的吞吐量。针对这个非凸问题,先将原问题分为 2 个子问题,再进行分别迭代求解。在交替优化的基础上,分别利用 SDR 和 FP 进行子问题的优化并得到最优解。③ 通过仿真模拟可知,引入 ASTAR-RIS 能大大提升 WPCN 通信系统的性能表现,并且与以往引入传统 RIS 和 PSTAR-RIS 辅助 WPCN 通信系统相比,ASTAR-RIS 对系统性能提升更为显著。

1 系统模型

本文所构建的系统由一个 PS、2 个传感器、一个 ASTAR-RIS 和一个 AP 组成,系统模型如图 1 所示。PS 仅配置一根天线,ASTAR-RIS 含有 M 个单元,每个传感器上都有 K 个传感节点。ASTAR-RIS 部署在 2 个传感器节点之间。如图 2 所示,该模型的工作模型主要分为 WET 和 WIT 阶段。考虑 ASTAR-RIS 的 3 种操作协议在 WPCN 系统中的适配问题,本文 WET 阶段

在 AP 处接收到的来自传感 S1、S2 的第 k 个节点的信息传输速率为:

$$R_{S1,k} = \tau_k^t \text{lb} \left(1 + \frac{p_{k,S1} |h_{d,1,k} + h_r^H \Theta_k^t h_{1,k}|^2}{(\sigma_{n_s}^2 h_{1,k}^H (\Theta_k^t)^H \Theta_k^t h_{1,k} + \sigma_{n3}^2)} \right), \quad (13)$$

$$R_{S2,k} = \tau_k^r \text{lb} \left(1 + \frac{p_{k,S2} |h_{d,2,k} + h_r^H \Theta_k^r h_{2,k}|^2}{(\sigma_{n_s}^2 h_{2,k}^H (\Theta_k^r)^H \Theta_k^r h_{2,k} + \sigma_{n4}^2)} \right). \quad (14)$$

2 问题提出及优化

2.1 问题提出

本文目标是在符合设备发射功率约束以及 S1、S2 服务质量约束的情况下,联合优化能量采集时长 τ_0 ,信息传输时间段 τ_k^t, τ_k^r , ASTAR-RIS 的相移振幅,使系统在 AP 处的吞吐量最大化。系统模型的优化问题(P1)可以写为:

$$(P1) \max_{\Omega} \sum_{k=1}^K (R_{S1,k} + R_{S2,k}), \quad (15)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^K \tau_k^t + \sum_{k=1}^K \tau_k^r + \tau_0 = T, \quad (15a)$$

$$P_{RIS1,WIT} \leq P_{RIS,max}, P_{RIS2,WIT} \leq P_{RIS,max}, \quad (15b)$$

$$P_{RIS,WET} \leq P_{RIS,max}, \quad (15c)$$

$$\beta_m^l \in [0, \beta_{max}], \sum_l \beta_m^l \leq \beta_{max}, \forall l \in \{t, r\}, \quad (15d)$$

$$R_{S1,k} \geq R_0, R_{S2,k} \geq R_0, \quad (15e)$$

$$\tau_k^r p_{k,S2} \leq \tau_0 \eta (p_p |g_{d,2,k} + g_{2,k}^H \Theta_0^r g_0|^2 + \sigma_{n_s}^2 g_{2,k}^H (\Theta_0^r)^H \Theta_0^r g_{2,k}), \quad (15f)$$

$$\tau_k^t p_{k,S1} \leq \tau_0 \eta (p_p |g_{d,1,k} + g_{1,k}^H \Theta_0^t g_0|^2 + \sigma_{n_s}^2 g_{1,k}^H (\Theta_0^t)^H \Theta_0^t g_{1,k}), \quad (15g)$$

$$T_0 \geq 0, T_k^t \geq 0, T_k^r \geq 0, \forall k \in K, \quad (15h)$$

$$\Omega \in \{\Theta_0^t, \Theta_0^r, \{\Theta_k^t\}_1^K, \{\Theta_k^r\}_1^K, \tau_0, \{\tau_k^t\}_1^K, \{\tau_k^r\}_1^K, p_{k,S1}, p_{k,S2}\}. \quad (15i)$$

在优化问题(P1)中,目标函数表示在满足约束的前提下,使得系统的吞吐量最大化;式(15a)和式(15h)是时间分配约束和非负线性约束,表示能量接收阶段和信息传递阶段的时间总和不能超过一个时隙周期;式(15b)和式(15c)分别表示对上行链路 WIT 阶段 RIS 的放大功率以及在下行链路 WET 阶段 RIS 的放大功率的约束;式(15d)为 ASTAR-RIS 的振幅约束;式(15e)表示服务质量约束,对于每个节点的信噪比大于一个信噪比的最小值,以此来确保信息能被 AP 接收;式(15f)和式(15g)表示能量关系约束,即在信息传输阶段的发射功率不能超过在能量采集阶段获得的能量。由于 ASTAR-RIS 的使用让反射相移矩阵变量和发射功率变量相互耦合,使优化问题(P1)是非凸问题。

为了简化和方便问题求解, WIT 阶段的 ASTAR-RIS 的相移幅度改写为 $\mathbf{v}_{k,l} = [\sqrt{\beta_{k,l}^t} e^{j\theta_{k,l}^t}, \sqrt{\beta_{k,l}^t} e^{j\theta_{k,l}^t}, \dots, \sqrt{\beta_{k,l}^t} e^{j\theta_{k,l}^t}]^H, \forall l \in \{t, r\}$ 。同样 WET 阶段 ASTAR-RIS 的相移幅度变换为 $\mathbf{v}_{0,l} = [\sqrt{\beta_{0,l}^r} e^{j\theta_{0,l}^r}, \sqrt{\beta_{0,l}^r} e^{j\theta_{0,l}^r}, \dots, \sqrt{\beta_{0,l}^r} e^{j\theta_{0,l}^r}]^H, \forall l \in \{t, r\}$ 。则可将 S1、S2 的信息传输速率简写为:

$$R_{S1,k} = \tau_k^t \text{lb} \left(1 + \frac{p_{k,S1} |h_{d,1,k} + \mathbf{b}_k^H \mathbf{v}_{k,t}|^2}{\sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{k,t}^H \mathbf{Q}_{1,k} \mathbf{v}_{k,t} + \sigma_{n3}^2} \right), \quad (16)$$

$$R_{S2,k} = \tau_k^r \text{lb} \left(1 + \frac{p_{k,S2} |h_{d,2,k} + \mathbf{a}_k^H \mathbf{v}_{k,r}|^2}{\sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{k,r}^H \mathbf{Q}_{2,k} \mathbf{v}_{k,r} + \sigma_{n4}^2} \right), \quad (17)$$

式中: $\mathbf{b}_k^H = \mathbf{h}_r^H \text{diag}(\mathbf{h}_{1,k})$, $\mathbf{Q}_{1,k} = \text{diag}(|[\mathbf{h}_{1,k}]_1|^2, |[\mathbf{h}_{1,k}]_2|^2, \dots, |[\mathbf{h}_{1,k}]_N|^2)$, $\mathbf{a}_k^H = \mathbf{h}_r^H \text{diag}(\mathbf{h}_{2,k})$, $\mathbf{Q}_{2,k} = \text{diag}(|[\mathbf{h}_{2,k}]_1|^2, |[\mathbf{h}_{2,k}]_2|^2, \dots, |[\mathbf{h}_{2,k}]_N|^2)$ 。通过上述转换,问题(P1.1)可以表示为:

$$(P1.1) \max_{\Omega_1} \sum_{k=1}^K (R_{S1,k} + R_{S2,k}), \quad (18)$$

$$\text{s. t. } (15a), (15d), (15e), (15h), \quad (18a)$$

$$p_{k,S1} \mathbf{v}_{k,t}^H \mathbf{Q}_{1,k} \mathbf{v}_{k,t} + \sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{k,t}^H \mathbf{v}_{k,t} \leq P_{RIS,max}, \quad (18b)$$

$$p_{k,S2} \mathbf{v}_{k,r}^H \mathbf{Q}_{2,k} \mathbf{v}_{k,r} + \sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{k,r}^H \mathbf{v}_{k,r} \leq P_{RIS,max}, \quad (18c)$$

$$p_p \mathbf{v}_{0,r}^H \mathbf{Q}_5 \mathbf{v}_{0,r} + \sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{0,r}^H \mathbf{v}_{0,r} + p_p \mathbf{v}_{0,t}^H \mathbf{Q}_5 \mathbf{v}_{0,t} + \sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{0,t}^H \mathbf{v}_{0,t} \leq P_{RIS,max}, \quad (18d)$$

$$\tau_k^r p_{k,S2} \leq \tau_0 \eta (p_p |g_{d,2,k} + \mathbf{d}_k^H \mathbf{v}_{0,t}|^2 + \sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{0,t}^H \mathbf{Q}_{4,k} \mathbf{v}_{0,t}), \quad (18e)$$

$$\tau_k^t p_{k,S1} \leq \tau_0 \eta (p_p |g_{d,1,k} + \mathbf{c}_k^H \mathbf{v}_{0,r}|^2 + \sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{0,r}^H \mathbf{Q}_{3,k} \mathbf{v}_{0,r}), \quad (18f)$$

$$\Omega_1 \in \{\mathbf{v}_{0,r}, \mathbf{v}_{0,t}, \{\mathbf{v}_{k,r}\}_1^K, \{\mathbf{v}_{k,t}\}_1^K, \tau_0, \{\tau_k^t\}_1^K, \{\tau_k^r\}_1^K, p_{k,S1}, p_{k,S2}\}, \quad (18g)$$

式中: $\mathbf{c}_k^H = \mathbf{g}_{1,k}^H \text{diag}(\mathbf{g}_0)$, $\mathbf{Q}_{3,k} = \text{diag}(|[\mathbf{g}_{1,k}]_1|^2, |[\mathbf{g}_{1,k}]_2|^2, \dots, |[\mathbf{g}_{1,k}]_N|^2)$, $\mathbf{d}_k^H = \mathbf{g}_{1,k}^H \text{diag}(\mathbf{g}_0)$, $\mathbf{Q}_{4,k} = \text{diag}(|[\mathbf{g}_{2,k}]_1|^2, |[\mathbf{g}_{2,k}]_2|^2, \dots, |[\mathbf{g}_{2,k}]_N|^2)$, $\mathbf{Q}_5 = \text{diag}(|[\mathbf{g}_0]_1|^2, |[\mathbf{g}_0]_2|^2, \dots, |[\mathbf{g}_0]_N|^2)$ 。该问题由于相移和发射功率之间仍然是耦合状态,还是具有非凸性,所以问题还是非凸问题,并不能直接进行求解。

2.2 问题优化

通过数学转换简化原问题,将其分解为 2 个子问题。使用交替优化算法进行迭代循环优化,并最终针对 2 个子问题应用不同的优化方法进行求解。

2.2.1 WET 阶段的相移优化和时隙优化以及传输功率优化

在给定 WIT 阶段相移 $\mathbf{v}_{k,t}, \mathbf{v}_{k,r}$ 的情况下,为了方便计算,由于每个设备的信号干扰加噪声比是恒定值,则用公式来代替恒定值。 $\gamma_{k,t} \triangleq |\mathbf{h}_{d,1,k} + \mathbf{b}_k^H \mathbf{v}_{k,t}|^2 / (\sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{k,t}^H \mathbf{Q}_{1,k} \mathbf{v}_{k,t} + \sigma_{n_3}^2)$, $\gamma_{k,r} \triangleq |\mathbf{h}_{d,2,k} + \mathbf{b}_k^H \mathbf{v}_{k,r}|^2 / (\sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{k,r}^H \mathbf{Q}_{2,k} \mathbf{v}_{k,r} + \sigma_{n_4}^2)$, 其中 $\mathbf{v}_{k,l} = [\sqrt{\beta_{k,1}^l} e^{j\theta_{k,1}^l}, \sqrt{\beta_{k,2}^l} e^{j\theta_{k,2}^l}, \dots, \sqrt{\beta_{k,M}^l} e^{j\theta_{k,M}^l}]^H, \forall l \in \{t, r\}$ 。 $\mathbf{b}_k^H = \mathbf{h}_k^H \text{diag}(\mathbf{h}_{1,k})$, $\mathbf{Q}_{1,k} = \text{diag}(|[\mathbf{h}_{1,k}]_1|^2, |[\mathbf{h}_{1,k}]_2|^2, \dots, |[\mathbf{h}_{1,k}]_N|^2)$, $\mathbf{a}_k^H = \mathbf{h}_k^H \text{diag}(\mathbf{h}_{2,k})$, $\mathbf{Q}_{2,k} = \text{diag}(|[\mathbf{h}_{2,k}]_1|^2, |[\mathbf{h}_{2,k}]_2|^2, \dots, |[\mathbf{h}_{2,k}]_N|^2)$ 。引入辅助变量 $f_{k,t}, f_{k,r}$, 同时令 $f_{k,t} = P_{k,S1} \tau_k^t f_{k,r} = P_{k,S2} \tau_k^r$ 。将相移系数进行转换: $\tilde{\mathbf{v}}_{0,l} = [\mathbf{v}_{0,r}^H, \mathbf{I}]^H, \mathbf{V}_{0,r} = \tilde{\mathbf{v}}_{0,r} \tilde{\mathbf{v}}_{0,r}^H, \mathbf{W}_{0,l} = \tau_0 \mathbf{V}_{0,l}, \forall l \in \{t, r\}$ 。同时满足条件 $\mathbf{W}_{0,l} \succeq 0$, 即新生成的矩阵是半正定矩阵,其矩阵秩也要满足 $\text{rank}(\mathbf{W}_{0,l})=1, \text{tr}(\mathbf{W}_{0,l})=\tau_0 (\mathbf{v}_{0,l}^H \mathbf{v}_{0,l} - 1)$ 。通过上面的操作,进而可以将问题表示为:

$$(P1.2) \max_{\mathbf{u}_2} \sum_{k=1}^K [\tau_k^t \text{lb}(1 + \gamma_{k,t} f_{k,t} / \tau_k^t) + \tau_k^r \text{lb}(1 + \gamma_{k,r} f_{k,r} / \tau_k^r)], \quad (19)$$

$$\text{s. t. (15b), (15h)}, \quad (19a)$$

$$f_{k,r} + \eta \tau_0 \sigma_{n_s}^2 \leq \eta \text{tr}[(P_p A_k + \sigma_{n_s}^2 \tilde{\mathbf{Q}}_{4,k}) \mathbf{W}_{0,t}], \quad (19b)$$

$$f_{k,t} + \eta \tau_0 \sigma_{n_s}^2 \leq \eta \text{tr}[(P_p B_k + \sigma_{n_s}^2 \tilde{\mathbf{Q}}_{3,k}) \mathbf{W}_{0,r}], \quad (19c)$$

$$f_{k,t} \mathbf{v}_{k,t}^H \mathbf{Q}_{1,k} \mathbf{v}_{k,t} + \sigma_{n_s}^2 \tau_k^t \mathbf{v}_{k,t}^H \mathbf{v}_{k,t} \leq \tau_k^t P_{\text{RIS,max}}, \quad (19d)$$

$$f_{k,r} \mathbf{v}_{k,r}^H \mathbf{Q}_{2,k} \mathbf{v}_{k,r} + \sigma_{n_s}^2 \tau_k^r \mathbf{v}_{k,r}^H \mathbf{v}_{k,r} \leq \tau_k^r P_{\text{RIS,max}}, \quad (19e)$$

$$\tau_k^t \text{lb}(1 + \gamma_{k,t} f_{k,t} / \tau_k^t) \geq R_0, \tau_k^r \text{lb}(1 + \gamma_{k,r} f_{k,r} / \tau_k^r) \geq R_0, \forall k, \quad (19f)$$

$$[\mathbf{W}_{0,r}]_{m,m} \leq \beta_{\max}^2 \tau_0, [\mathbf{W}_{0,t}]_{m,m} \leq \beta_{\max}^2 \tau_0, m = 1, 2, \dots, M, \quad (19g)$$

$$[\mathbf{W}_{0,l}]_{M+1, M+1} = \tau_0, \mathbf{W}_{0,l} \succeq 0, \text{rank}(\mathbf{W}_{0,l}) = 1, \forall l \in \{t, r\}, \quad (19h)$$

$$P_p \text{tr}(\tilde{\mathbf{Q}}_5 \mathbf{W}_{0,l}) + \sigma_{n_s}^2 \text{tr}(\mathbf{W}_{0,l}) \leq \tau_0 (2P_p + 2\sigma_{n_s}^2 + P_{\text{RIS,max}}), \quad \forall l \in \{t, r\}, \quad (19i)$$

$$\mathbf{Q}_2 \in \{\mathbf{v}_{0,r}, B_{0,t}, \tau_0, \{\tau_k^t\}_1^K, \{\tau_k^r\}_1^K, f_{k,t}, f_{k,r}, \mathbf{W}_{0,r}, \mathbf{W}_{0,t}\}, \quad (19j)$$

式中: $\mathbf{c}_k^H = \mathbf{g}_{1,k}^H \text{diag}(\mathbf{g}_0)$, $\tilde{\mathbf{Q}}_{3,k} = \text{diag}(|[\mathbf{g}_{1,k}]_1|^2, |[\mathbf{g}_{1,k}]_2|^2, \dots, |[\mathbf{g}_{1,k}]_N|^2, 1)$, $\mathbf{d}_k^H = \mathbf{g}_{1,k}^H \text{diag}(\mathbf{g}_0)$, $\tilde{\mathbf{Q}}_{4,k} = \text{diag}(|[\mathbf{g}_{2,k}]_1|^2, |[\mathbf{g}_{2,k}]_2|^2, \dots, |[\mathbf{g}_{2,k}]_N|^2, 1)$, $\tilde{\mathbf{Q}}_5 = \text{diag}(|[\mathbf{g}_0]_1|^2, |[\mathbf{g}_0]_2|^2, \dots, |[\mathbf{g}_0]_N|^2, 1)$, $\tilde{\mathbf{a}}_k = [\mathbf{d}_k^H \mathbf{g}_{d,2,k}]^H$, $\mathbf{B}_k = \tilde{\mathbf{b}}_k \tilde{\mathbf{b}}_k^H$, $\tilde{\mathbf{b}}_k = [\mathbf{c}_k^H \mathbf{g}_{d,1,k}]^H$ 。

在给定 WIT 阶段相移情况下, $\gamma_{k,t}, \gamma_{k,r}$ 为恒定

值,那么目标函数是关于 τ_k^t 和 $f_{k,t}$ 的联合凹函数,目标函数是 2 个凹函数的和形式,因此目标函数也是凹函数。由于凹函数大于等于常数的形式是凸约束,所以用户服务质量约束也是凸约束。除了秩一约束 (19h) 以外,其他约束为线性的,所以都是凸约束。通过 SDR 将难处理的非凸的秩一约束进行松弛化处理,所以该问题是一个标准的凸半定规划问题,为了更好地处理这类问题,可以借助凸优化工具箱中的 CVX 进行优化求解^[19]。

但若松弛处理后最优解不满足 $\text{rank}(\mathbf{W}_{0,l}) = 1, \forall l \in \{t, r\}$, 则需要使用高斯随机化进行构造秩一解。通过 $\mathbf{V}_{0,l} = \mathbf{W}_{0,l} / \tau_0$ 将 $\mathbf{V}_{0,l}$ 还原出来,对所求的次优解 $\tilde{\mathbf{V}}_{0,l}$ 进行特征值分解,其过程如下所示:

$$\tilde{\mathbf{V}}_{0,l} = \mathbf{U}_{0,l} \sum_{0,l} \mathbf{U}_{0,l}^H, \forall l \in \{t, r\}, \quad (20)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_{0,l} = \mathbf{U}_{0,l} \sqrt{\sum_{0,l} \mathbf{r}}, \forall l \in \{t, r\}, \quad (21)$$

式中: $\tilde{\mathbf{v}}_{0,l}$ 表示问题 (P1.2) 经过高斯随机化后的次优解, $\mathbf{r} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_{M+1})$ 表示均值为零、协方差为 \mathbf{I} 的随机向量。随机进行一两次求解得到的值具有偶然性,高斯随机化都会进行大量次数的实验,再选择一个让目标函数能够达到最大值的解 $\tilde{\mathbf{v}}_{0,l}^*$ 。由于通过高斯随机化构造出的次优解不一定会满足相移振幅约束,所以要对次优解 $\tilde{\mathbf{v}}_{0,l}^*$ 进行归一化操作,其归一化操作过程如下所示:

$$\mathbf{v}_{0,l}^* = \exp\left(\text{jarg}\left(\left[\begin{array}{c} \tilde{\mathbf{v}}_{0,l}^* \\ \tilde{\mathbf{v}}_{0,l, M+1}^* \end{array}\right]_{(1:M)}\right)\right) \quad (22)$$

相移以及振幅可以由下式求出:

$$[\mathbf{V}_{0,l}]_{m,m} = (\sqrt{\beta_{0,m}^l} e^{j\theta_{0,m}^l}) (\sqrt{\beta_{0,m}^l} e^{j\theta_{0,m}^l})^H = \beta_{0,m}^l, \forall l \in \{t, r\}, \forall m, \quad (23)$$

$$e^{j\theta_{0,m}^l} = \frac{[\mathbf{v}_{0,l}^*]_m}{\sqrt{\beta_{0,m}^l}} \quad (24)$$

由于高斯随机化复杂度高、收敛慢,为了能够更好地使目标函数收敛,不同于传统的在每次迭代收敛后进行高斯随机化,而是在交替优化完 2 个子问题后再进行收敛性判断,收敛后再进行高斯随机化来重构秩一解。

2.2.2 WIT 阶段的相移优化

由于在 WIT 阶段采用的是用户自适应 IRS 波束形成协议,允许有 ASTAR-RIS 在上行链路信息传递中重新配置其相移矢量 K 次,并且每个相移对应一个设备。其相移变量与其他变量具有独立性,对于 WIT 阶段的最优解 $\mathbf{v}_{k,t}, \mathbf{v}_{k,r}$ 可以通过并行

求解 $2K$ 个子问题独立获得。由于上一步已经获得了能量传输阶段的相移,传输时间以及发射功率的优化解,要想获得每一个最优解 $\mathbf{v}_{k,t}, \mathbf{v}_{k,r}$, 将其分为 K 个独立的子问题,就可以通过最大化目标函数的信噪比来获得最优解。通过采用分式规划方法来进行处理^[20]。引入辅助变量 I_k^l 求解 $\mathbf{v}_{k,t}$ 的 K 个子问题可以表述为:

$$(P1.3) \max_{\mathbf{v}_{k,t}, I_k^l} 2\text{Re} \{ (I_k^l)^H (\mathbf{h}_{d,1,k} + \mathbf{b}_k^H \mathbf{v}_{k,t}) \} - |I_k^l|^2 \cdot (\sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{k,t}^H \mathbf{Q}_{1,k} \mathbf{v}_{k,t} + \sigma_{n_3}^2), \quad (25)$$

$$\text{s. t. } p_{k,S1} \mathbf{v}_{k,t}^H \mathbf{Q}_{1,k} \mathbf{v}_{k,t} + \sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{k,t}^H \mathbf{v}_{k,t} \leq P_{\text{RIS,max}}, \quad (25a)$$

$$\beta_{k,m}^l \leq \beta_{\text{max}}, \forall m. \quad (25b)$$

引入辅助变量 I_k^r , 求解 $\mathbf{v}_{k,r}$ 的 K 个子问题可以表述为:

$$(P1.4) \max_{\mathbf{v}_{k,r}, I_k^r} 2\text{Re} \{ (I_k^r)^H (\mathbf{h}_{d,2,k} + \mathbf{a}_k^H \mathbf{v}_{k,r}) \} - |I_k^r|^2 \cdot (\sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{k,r}^H \mathbf{Q}_{2,k} \mathbf{v}_{k,r} + \sigma_{n_3}^2), \quad (26)$$

$$\text{s. t. } p_{k,S2} \mathbf{v}_{k,r}^H \mathbf{Q}_{2,k} \mathbf{v}_{k,r} + \sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{k,r}^H \mathbf{v}_{k,r} \leq P_{\text{RIS,max}}, \quad (26a)$$

$$\beta_{k,m}^r \leq \beta_{\text{max}}, \forall m. \quad (26b)$$

最优解 I_k^l, I_k^r 可以通过对目标函数求其一阶导数设置为零获得:

$$I_k^l = \frac{(\mathbf{h}_{d,1,k} + \mathbf{b}_k^H \mathbf{v}_{k,t})}{\sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{k,t}^H \mathbf{Q}_{1,k} \mathbf{v}_{k,t} + \sigma_{n_3}^2}, \quad (27)$$

$$I_k^r = \frac{(\mathbf{h}_{d,2,k} + \mathbf{a}_k^H \mathbf{v}_{k,r})}{\sigma_{n_s}^2 \mathbf{v}_{k,r}^H \mathbf{Q}_{2,k} \mathbf{v}_{k,r} + \sigma_{n_3}^2}. \quad (28)$$

通过更新后的 I_k^l, I_k^r 求解问题可以获得 $\mathbf{v}_{k,t}, \mathbf{v}_{k,r}$ 的最优解,然后通过交替优化,直到目标函数收敛。优化流程如算法 1 所示。

算法 1 联合优化算法求解问题(P1.1)

- 1: 初始化 WIT 阶段相移, 以及迭代次数 $n = 0$
- 2: 重复
- 3: 将给定初值的 WIT 阶段相移 $(\mathbf{v}_{k,t})^n, (\mathbf{v}_{k,r})^n$ 代入问题 (P1.2), 求得系统传输时隙参数 $(\tau_0)^{n+1}, (\{\tau_k^l\}_1^K)^{n+1}, (\{\tau_k^r\}_1^K)^{n+1}, (\mathbf{v}_{0,r})^{n+1}, (\mathbf{v}_{0,t})^{n+1}, (p_{k,S1})^{n+1}, (p_{k,S2})^{n+1}$
- 4: 将优化后的 $(\mathbf{v}_{0,r})^{n+1}, (\mathbf{v}_{0,t})^{n+1}, (p_{k,S1})^{n+1}, (p_{k,S2})^{n+1}, (T_0)^{n+1}, (\{T_k^l\}_1^K)^{n+1}, (\{T_k^r\}_1^K)^{n+1}$ 代入问题 (P1.3) 和问题 (P1.4)
- 5: 通过交替优化 I_k^l 和 $\mathbf{v}_{k,l}$, 直至问题 (P1.3) 和问题 (P1.4) 目标函数收敛, 从而获得最优解 $(\mathbf{v}_{k,t})^{n+1}$ 以及 $(\mathbf{v}_{k,r})^{n+1}$
- 6: $n = n + 1$
- 7: 直到目标值与前一次迭代得到的目标值差的绝对值小于给定阈值 $\tau > 0$, 终止

3 仿真结果

本文 PS 的发射功率 $P_p = 17$ dBm, ASTAR-RIS 处的功率最大值 $P_{\text{RIS,max}} = 17$ dBm, 振幅放大因子 $\beta_{\text{max}} = 40$ dB, ASTAR-RIS 元件的数量设置为 $M = 20$, S1 和 S2 中的传感器数量 $K = 4$ 。噪声设置为 $\sigma = -120$ dBm, 节点速率阈值 $R_0 = 0.1$ 。

图 3 给出了系统吞吐量性能随总发射功率的变化图。ASTAR-RIS 方案将系统总功率设置为 $P_p = P_{\text{RIS,max}} = P_{\text{total}}/2$, 其他方案将系统总功率设置为 $P_{\text{total}} = P_p$, 可以看出所有方案的系统吞吐量都是随着系统总发射功率的增加而增加, 增加基站发射功率可以提高无线设备接收到的能量, 从而为 WIT 阶段的信息传输提供更多能量。ASTAR-RIS 方案在总发射功率为 40 dBm 达到最优, 其峰值可以达到 17 dBm/Hz, 比 PSTAR-RIS 方案还要高 1 dBm/Hz。ASTAR-RIS 利用信号的反射、透射和放大为全空间的所有无线设备提供服务, 利用从无线信号中获取的能量来放大入射信号, 减轻双衰落效应, 提高级联链路信道增益, 从而提高了系统性能。

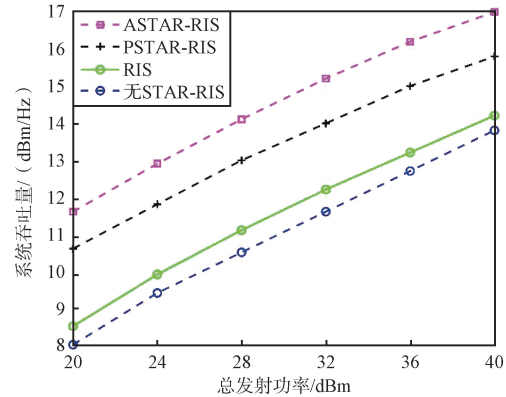


图 3 系统吞吐量与总发射功率的关系

Fig. 3 Relationship between system throughput and total transmitted power

图 4 展示了随着 ASTAR-RIS 的反射单元元件数量的变化, 不同方案下系统吞吐性能的变化情况。可以看出, 随着反射单元数量的增加, 系统具有更高的阵列增益, 可以形成更高的波束成形增益, 因此 RIS 的方案都具有提升系统性能的效果; 具有 ASTAR-RIS 的方案对系统性能的提升明显优于传统 RIS 和 PSTAR-RIS 的方案, ASTAR-RIS 由于部署更多的元件用于透射和反射操作, 因此具有更大的自由度来操纵信号传播, 实现全空间覆盖, 从而提高系统的通信性能。

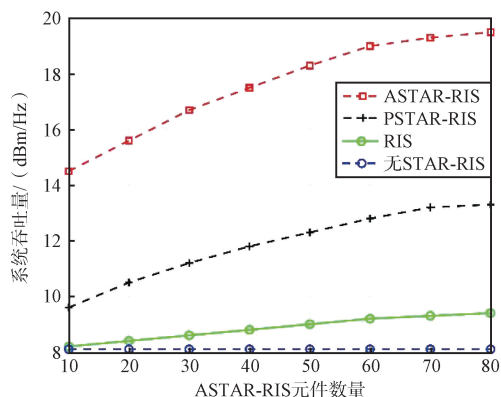


图 4 系统吞吐量与 ASTAR-RIS 元件数量的关系

Fig. 4 Relationship between system throughput and the number of ASTAR-RIS components

图 5 展示了随着 WET 阶段和 WIT 阶段的传输时间变化,系统吞吐量性能的变化情况。可以看出,所有方案随着传输时间的增加,系统吞吐性能也在不断增加。这是因为随着传输时间的增加,各阶段能够得到更多的时间进行能量传输与信息传递,对系统性能的提升会更加显著。ASTAR-RIS 辅助方案是所有仿真方案中对系统性能提升最为显著的,在传输时间为 17 s 时,其系统吞吐量能够达到 280 dBm/Hz,并且随着时间的增加,与其他方案之间的性能差距在不断增大。随着传输时间的增加,ASTAR-RIS 通过放大入射信号,在减轻级联信道双衰落效应的同时,增强了信号传输强度。这种增强使其在 WET 阶段能够获得更多的能量,在 WIT 阶段有更多的时间进行信息交互。综合这些方面的正向促进作用,使系统性能有显著提升。

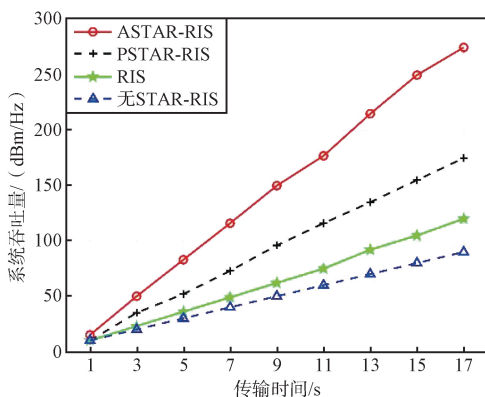


图 5 系统吞吐量随传输时间的变化

Fig. 5 Change of system throughput with transmission time

4 结束语

本文研究了在无线通信系统中 ASTAR-RIS 辅

助 WPCN 系统的吞吐量最大化问题。首先将问题根据耦合变量分为 2 个子问题,然后在交替优化算法的基础之上,利用半定松弛和分式规划分别求解这 2 个部分变量的最优解,最后通过多次循环迭代得到最大吞吐量。仿真结果表明,与其他基准方案相比,本文提出的通信方案可以显著提升系统的吞吐量。

参考文献

- [1] RABIE K, ADEBISI B, NAURYZBAYEV G, et al. Full-duplex Energy-harvesting Enabled Relay Networks in Generalized Fading Channels[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(5): 384-387.
- [2] HYUNSGSIK J, ZHANG R. Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(1): 418-428.
- [3] BI S Z, HO C K, ZHANG R. Wireless Powered Communication: Opportunities and Challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(4): 117-125.
- [4] XU Y J, TIAN Q Y, ZHANG H B, et al. RIS-enhanced Cognitive BackCom Networks: Robust Resource Allocation and Passive Beamforming Design [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(23): 38815-38828.
- [5] WANG Z L, MU X D, LIU Y W. STARS Enabled Integrated Sensing and Communications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(10): 6750-6765.
- [6] 张迪. 智能反射表面辅助无线供电通信网络中的安全传输研究[D]. 重庆:重庆邮电大学, 2022.
- [7] LIU Y W, LIU X, MU T D, et al. Reconfigurable Intelligent Surfaces: Principles and Opportunities [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(3): 1546-1577.
- [8] XU J Q, LIU Y W, MU X D, et al. STAR-RISs: Simultaneous Transmitting and Reflecting Reconfigurable Intelligent Surfaces [J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(9): 3134-3138.
- [9] LIU Y W, MU X D, XU J Q, et al. STAR: Simultaneous Transmission and Reflection for 360° Coverage by Intelligent Surfaces [J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(6): 102-109.
- [10] CHEN Z, CHEN L, HUANG L, et al. RIS-assisted UAV-enabled Wireless Powered Communication Network [C]// International Conference on Information Communication and Signal Processing. Xi'an: IEEE, 2023: 770-774.
- [11] DE PINHO C A M, LIMA F R M. Rate Maximization with QoS Guarantees in IRS-assisted WPCN-NOMA Systems [C]// 2022 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS). Fortaleza: IEEE, 2022: 1-6.

- [12] HUA M, WU Q Q. Joint Dynamic Beamforming Design and Resource Allocation for IRS-aided FD-WPCN [C] // 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Madrid; IEEE, 2021; 1-6.
- [13] ZHU P, QIN L J, WANG J, et al. Optimized Trajectory and Passive Beamforming for STAR-RIS-assisted UAV-empowered O2I WPCN [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(1): 163-167.
- [14] XU Y J, GU B W, GAO Z N, et al. Applying RIS in Multi-user SWIPT-WPCN Systems: A Robust and Environmentally-friendly Design [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2023, 10(1): 209-222.
- [15] ZHENG A L, NI W L, WANG W, et al. Enhancing NOMA Networks via Reconfigurable Multi-functional Surface [J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(4): 1195-1199.
- [16] WANG W, NI W L, TIAN H, et al. Performance Analysis and Optimization of Reconfigurable Multi-functional Surface Assisted Wireless Communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(11): 6695-6710.
- [17] ZHENG A L, NI W L, WANG W, et al. Next-generation RIS: From Single to Multiple Functions [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(12): 1988-1992.
- [18] PANDA B, SINGH P. Performance Analysis of NOMA Systems in Rayleigh and Rician Fading Channels [C] // 2021 Advanced Communication Technologies and Signal Processing (ACTS). Rourkela; IEEE, 2021; 1-6.
- [19] BOYD S, VANDENBERGHE L, FAYBUSOVICH L. Convex Optimization [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(11): 1859.
- [20] SHEN K M, YU W. Fractional Programming for Communication Systems—Part I: Power Control and Beamforming [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(10): 2616-2630.

作者简介:

谢文武 男, (1979—), 博士, 副教授。主要研究方向: 无线通信系统算法、教育大数据。

袁曾家 男, (1999—), 硕士研究生。主要研究方向: 智能反射面、隐蔽通信。

李桂林 男, (1999—), 硕士。主要研究方向: 无线供能通信。

(* 通信作者) 李一鸣 女, (1979—), 硕士, 副教授。主要研究方向: 计算机应用技术。

黄杰 男, (1978—), 经理。主要研究方向: 物联网。

周振威 男, (2005—)。主要研究方向: 智能反射面。