

# 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

杨震, 冯璇, 吕斌

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 为了提高基于中继的无线供电通信网络 (WPCN) 的能量和信息传输效率, 提出了双智能反射面 (IRS) 辅助的两跳中继无线传输方案。其中,  $IRS_1$  和  $IRS_2$  分别放置在混合中继节点 (HRN) 与用户、HRN 和基站 (BS) 之间, 使 BS 和 HRN、HRN 和用户之间构成反射链路, 从而提高 HRN 到用户的能量传输、用户到 HRN 的数据传输和 HRN 到 BS 的数据转发效率。为了最大化系统吞吐量, 考虑了能量、数据传输和数据转发的时间调度、IRS 的相位和用户的传输功率的联合优化问题。为了解决该非凸优化问题, 提出了高效的交替优化算法, 从而求得该问题的次优解。此外, 分析了所提算法的收敛性和计算复杂度。仿真结果表明, IRS 能够有效提升基于中继的 WPCN 的吞吐量。此外, 所提最优传输方案下的系统性能优于其他对照方案。

**关键词:** 智能反射面; 中继; 无线供电通信网络; 相移优化; 能量传输

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022182

## Research on throughput maximization for intelligent reflecting surface assisted dual-hop relay wireless powered communication network

YANG Zhen, FENG Xuan, LYU Bin

School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

**Abstract:** To improve the energy and information transmission efficiency of relay-based wireless powered communication network (WPCN), a two intelligent reflecting surface (IRS) assisted dual-hop relay wireless transmission scheme was proposed. In particular,  $IRS_1$  and  $IRS_2$  were deployed between the base station (BS) and hybrid relay node (HRN), and between the HRN and users, respectively, which could improve the efficiency of energy transfer from the HRN to users, data transmission from users to the HRN and data forwarding from HRN to BS. To maximize the system throughput, an optimization problem was formulated, where the time scheduling of energy, information transmission and forwarding, the phase shifts of IRS, and the delivered power of users were jointly optimized. To address non-convexity of the formulated problem, an efficient alternating optimization algorithm was proposed and the sub-optimal solution was obtained. In addition, the convergence and computational complexity of the proposed algorithm were analyzed. Numerical results verify that IRS can effectively improve the throughput of WPCN based on relay. In addition, compared to the benchmark schemes, the proposed optimal transmission scheme can significantly improve the system performance in terms of throughput.

**Keywords:** intelligent reflecting surface, relay, wireless powered communication network, phase shift optimization, energy transfer

收稿日期: 2022-05-09; 修回日期: 2022-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62071242, No.61671252, No.62071005); 安徽省自然科学基金资助项目 (No.2008085MF181)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.62071242, No.61671252, No.62071005), The Natural Science Foundation of Anhui Province (No.2008085MF181)

## 0 引言

5G时代的来临使物联网蓬勃发展,但同时也面临诸多挑战。物联网中无线设备的能量十分有限<sup>[1]</sup>,它们通常通过有线充电或者更换电池等方式维持自身运行。但是有线充电的方式有时会受到环境的制约而无法实现,而手动更换电池带来的人工成本通常是不可接受的<sup>[2]</sup>。因此,克服无线设备能量受限的问题尤其重要。近年来,无线能量传输(WPT, wireless power transfer)因可以通过发送射频信号为无线设备稳定持续地供电引起了各界的广泛关注<sup>[3]</sup>。尤其是在通信领域,基于WPT的无线供电通信网络(WPCN, wireless powered communication network)激发了广大学者的研究兴趣。WPCN中,混合接入点(HAP, hybrid access point)通过发送射频信号向无线设备传输能量,无线设备再利用收集的能量向HAP传输信息<sup>[4-7]</sup>。

在传统的WPCN中,路径损耗和阴影衰落使接收端和发送端只能在短距离内进行能量和信息的传输<sup>[7]</sup>。因此,为了扩大WPCN中能量和信息的传输范围,研究者将中继引入WPCN。现有的应用于WPCN的中继类型大致分为两类。一类是不需要电池供电的中继,这类中继可以从HAP收集能量来维持自身的电路损耗。文献[8]研究了基于双用户协作的WPCN,距离HAP较近的用户作为中继辅助远端用户进行信息传输。在文献[9-10]中,中继基于先收集后转发的策略辅助系统的能量和信息传输。此类中继能量消耗较大,需要花费较长时间从HAP收集能量,这样会减少用户信息传输的时间,从而降低系统性能。另一类中继是将基于稳定电源供电的中继集成到WPCN中充当HAP的角色,将其称为混合中继节点(HRN, hybrid relay node)<sup>[11-14]</sup>。文献[11-14]中,HRN首先作为能量站稳定地为用户提供能量,然后作为中继将用户的信息转发到基站(BS, base station)。此类中继不需要收集能量,用户有充足的时间进行信息传输。但是,在HRN辅助的WPCN系统中,能量和信息传输效率依旧较低。特别是未来无线通信的频率更高,同样传输距离的情况下信号的衰减会更大,会导致能量和信息传输的效率更低。因此,如何提升基于HRN的WPCN的能量和信息传输效率仍有待深入研究。

近年来,智能反射面(IRS, intelligent reflecting

surface)作为一种新型的器件受到了学者的广泛关注<sup>[15-16]</sup>。IRS由许多低成本且低功耗的反射元件组成,这些元件配有集成电路并可以通过编程的方式调节反射信号的相位和幅度,从而在某种程度上实现对信道的控制<sup>[17-19]</sup>。现有的一些研究表明,IRS在提高无线通信系统的和速率<sup>[20]</sup>、频谱效率和能量效率<sup>[21-22]</sup>等方面具有显著作用。

现有文献表明,IRS同样适用于传统的WPCN。文献[23]将IRS应用于基于非正交多址的WPCN,通过联合优化IRS反射相位、波束成形向量和资源分配,实现了从收集传输装置(HTTPD, harvest-then-transmit device)到HAP的上行和速率最大化。文献[24]研究了基于时分切换和功率分类的自供电IRS的WPCN系统的和速率增强方案。文献[25]将IRS用于辅助不同集群用户与HAP之间的能量和信息传输,通过联合优化IRS反射波束成形矩阵和时间分配,考虑了系统吞吐量的最大化问题。

有学者将IRS与中继结合,研究了基于IRS辅助的中继通信网络。文献[26]通过2个IRS来协助中继提高2个远距离用户间的通信效率,中继在第一个时隙同时接收2个用户的信息,然后在第二个时隙将目标信息传输到目标用户。文献[27]通过源节点采用时分复用的方式发送信号,信号经IRS反射到中继,再由中继解码转发后传输到目标节点。文献[28]研究了多个IRS辅助的中继解码转发系统,BS的发送信号经由多个IRS反射到中继,中继解码转发后再经由多个IRS反射到一个用户。

文献[23-25]表明,IRS在改善WPCN系统性能方面也有着优异的效果。文献[26-28]表明,IRS与中继结合可以进一步提高通信系统的信息传输效率。然而上述工作中,文献[23-25]只利用单个IRS来增强能量和信息传输的效率,这限制了系统性能的增长。实际上,IRS具备灵活部署的特点,而仅部署单个IRS不能充分挖掘IRS对于性能增强的潜力。此外,对于HRN辅助的WPCN中存在多跳传输链路的场景,文献[23-25]的方案并不适用。文献[26-28]通过多个IRS协助中继提高了系统信息传输效率,但没有考虑到WPCN中的能量传输过程。因此,面向HRN辅助的WPCN,本文提出了IRS辅助的两跳中继WPCN传输方案。通过在HRN和用户、HRN和BS间分别部署IRS,构建两跳的中继传输链路,

通过 IRS 提供的大量能量和信息传输链路增强 HRN 到用户的能量传输、用户到 HRN 的数据传输和 HRN 到 BS 的数据转发的性能。本文主要研究工作和创新如下。

1) 针对基于 HRN 的 WPCN 中 HRN 与用户间能量和数据传输效率, 以及 HRN 到 BS 的数据转发效率较低的问题, 本文提出了基于 IRS 辅助的性能增强方案。具体而言, 通过在 HRN 与用户、HRN 与 BS 之间分别放置 IRS<sub>1</sub> 和 IRS<sub>2</sub>, 构建 HRN-IRS<sub>2</sub>-BS、HRN-IRS<sub>1</sub>-用户的反射链路, 然后合理分配 HRN 到用户的能量传输、用户到 HRN 的数据传输和 HRN 到 BS 的数据转发时隙, 有效改善了 HRN 和用户之间的能量和数据传输效率, 以及 HRN 到 BS 的数据转发效率。

2) 为了最大化系统吞吐量, 构建了 HRN 到用户的能量传输和用户到 BS 的信息传输的时隙分配、用户到 HRN 的数据传输和 HRN 到 BS 的数据转发的时隙调度、用户的数据传输功率以及 IRS 的反射相位的联合优化问题。由于定义的问题是非凸的, 因此提出了一种高效的交替优化算法求得了其次优解。此外, 分析了所提算法的收敛性和计算复杂度。

3) 仿真结果表明, 相较于随机能量和信息传输 IRS 相位、信息传输阶段无 IRS 辅助方案和现有文献中的等分信息传输时间方案, 本文所提出的最优传输方案始终可以获得最大的系统吞吐量。

## 1 系统模型

系统模型如图 1 所示。IRS 辅助的两跳中继 WPCN 由 BS、HRN、IRS<sub>1</sub>、IRS<sub>2</sub> 和  $K$  个用户  $U_k, k=1,2,3,\dots,K$  组成, 其中, BS、HRN 和  $U_k$  配备单根天线。 $U_k$  为能量受限用户, 为了维持自身的电路运行和信息传输需要从 HRN 收集能量。假设  $U_k$  与 BS 距离较远,  $U_k$  到 BS 的信息传输只能通过 IRS 和 HRN 构建的两跳中继链路来完成。其中, IRS<sub>1</sub> 和 IRS<sub>2</sub> 分别放置在 HRN 与  $U_k$ 、HRN 与 BS 之间, 协助系统的能量和信息传输。HRN 作为系统核心, 不仅可以为  $U_k$  稳定地提供能量, 还能将  $U_k$  的信息解码转发到 BS 处。BS、HRN、IRS 和  $U_k$  间需执行严格的同步机制。需要注意的是, 分别在 BS 与 HRN 间和 HRN 与  $U_k$  间部署单个 IRS 是合理的。如果将 IRS<sub>1</sub> 和 IRS<sub>2</sub> 布置在接收端或发送端的同一侧, 虽然 2 个 IRS 依旧能提供大量的传输链路, 但是收发两

端间能量或信息传输距离的增加会降低部署 IRS 带来的性能增益。

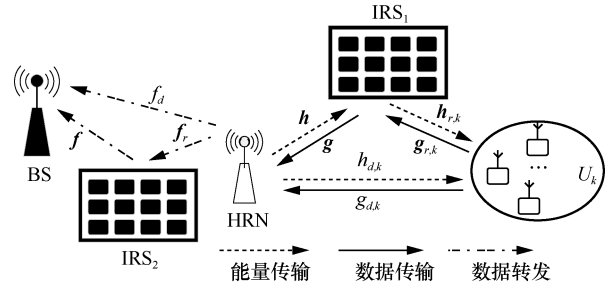


图 1 系统模型

HRN 与 IRS<sub>1</sub>、HRN 与  $U_k$ 、IRS<sub>1</sub> 与  $U_k$  的下行信道系数分别用  $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^{N_1 \times 1}$ 、 $h_{d,k}$  和  $h_{r,k} \in \mathbb{C}^{N_1 \times 1}$  表示, 上行信道系数分别用  $\mathbf{g} \in \mathbb{C}^{N_1 \times 1}$ 、 $g_{d,k}$  和  $g_{r,k} \in \mathbb{C}^{N_1 \times 1}$  表示。HRN 与 IRS<sub>2</sub>、HRN 与 BS、IRS<sub>2</sub> 与 BS 的上行信道系数分别用  $\mathbf{f}_r \in \mathbb{C}^{N_2 \times 1}$ 、 $f_d$  和  $\mathbf{f} \in \mathbb{C}^{N_2 \times 1}$  表示。当前, 诸多文献设计了可行的 IRS 系统的信道状态信息 (CSI, channel state information) 的估计技术<sup>[14-18]</sup>。因此, 假设各链路的 CSI 能够提前获知。

系统时隙分配如图 2 所示, 时长为  $T$  的传输时隙包含能量传输 (ET, energy transfer)、信息传输 (IT, information transmission) 2 个阶段。在 ET 阶段 (记为 H-U), HRN 发送的能量信号经由 IRS<sub>1</sub> 反射到  $U_k$ 。信息传输阶段又分为  $U_k$  到 HRN 的数据传输 (记为  $U_k$ -H) 和 HRN 到 BS 的数据转发 (记为 H-B) 2 个阶段。在数据传输阶段, IRS<sub>1</sub> 将  $U_k$  发送的信号反射到 HRN; 在数据转发阶段, HRN 对接收信号进行解码转发后经由 IRS<sub>2</sub> 反射到 BS。

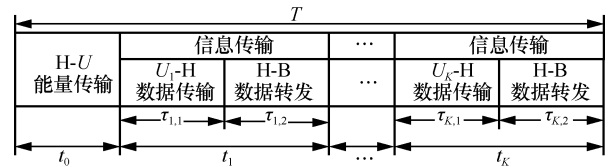


图 2 系统时隙分配

### 1) 能量传输阶段

在 HRN 到用户  $U_k$  的下行能量传输过程中, IRS<sub>1</sub> 将 HRN 在时隙  $t_0$  内发射的射频信号反射到  $U_k$ ,  $U_k$  从射频信号中收集能量。IRS<sub>1</sub> 的能量反射波束成形矩阵为  $\Theta_h = \sqrt{\rho} \text{diag}\{v_{h,1}, \dots, v_{h,N_1}\}$ , 其中  $v_{h,n} = e^{j\theta_n}$  且  $|v_{h,n}| = 1$ ,  $\rho \in (0,1)$  表示 IRS<sub>1</sub> 的反射效率。 $U_k$  接收来自 HRN 的信号为

$$y_{d,k} = (\mathbf{h}_{r,k}^H \Theta_h \mathbf{h} + h_{d,k}) \sqrt{P_{hd}} s_h + n_{d,k} \quad (1)$$

其中,  $P_{hd}$  为 HRN 的能量发送功率,  $s_h$  为 HRN 发射的能量信号且  $s_h \sim \text{CN}(0,1)$ ,  $n_{d,k}$  为  $U_k$  处的加性白高斯噪声。

实际应用中, 用户的接收功率存在一个上限值即饱和功率。因此随着 HRN 的发送功率不断增加, 用户的接收功率先增加后趋于平缓。为表征这种非线性能量传输模型的特点, 本文采用两阶段的线性能量传输模型<sup>[29-31]</sup>。则  $U_k$  的实际收集的功率为

$$P_k = \begin{cases} p_{r,k}, & p_{r,k} < p_{f,k} \\ p_{f,k}, & p_{r,k} \geq p_{f,k} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $p_{r,k} = \eta P_{hd} |\mathbf{h}_{r,k}^H \boldsymbol{\Theta}_h \mathbf{h} + h_{d,k}|^2$ ,  $p_{r,k}$  为  $U_k$  的接收功率,  $\eta$  为  $U_k$  能量传输效率,  $p_{f,k}$  为  $U_k$  的饱和功率。则  $U_k$  在时隙  $t_0$  内收集的能量为

$$E_k = t_0 \min\left(\eta P_{hd} |\mathbf{h}_{r,k}^H \boldsymbol{\Theta}_h \mathbf{h} + h_{d,k}|^2, p_{f,k}\right) \quad (3)$$

## 2) 信息传输阶段

在时隙  $t_k$  内,  $U_k$  与 BS 进行信息传输。时隙  $t_k$  又被划分为 2 个时隙  $\tau_{k,1}$  和  $\tau_{k,2}$ , 分别用于  $U_k$  到 HRN 的数据传输和 HRN 到 BS 的数据转发。在时隙  $\tau_{k,1}$  内, IRS<sub>1</sub> 将  $U_k$  发送的信号  $x_k$  直接反射到 HRN。IRS<sub>1</sub> 的反射波束成形矩阵为  $\boldsymbol{\Theta}_{g,k} = \sqrt{\rho} \text{diag}\{v_{g,k,1}, \dots, v_{g,k,N_1}\}$ , 其中  $v_{g,k,n} = e^{j\theta_n}$  且  $|v_{g,k,n}| = 1$ 。HRN 接收来自  $U_k$  的信号为

$$y_{h,k} = (\mathbf{g}^H \boldsymbol{\Theta}_{g,k} \mathbf{g}_{r,k} + g_{d,k}) \sqrt{p_k} x_k + n_h \quad (4)$$

其中,  $p_k$  为  $U_k$  的发送功率,  $n_h$  为 HRN 处的噪声且  $n_h \sim \text{CN}(0, \delta_h^2)$ 。HRN 处的信噪比为

$$\gamma_{h,k} = \frac{p_k |\mathbf{g}^H \boldsymbol{\Theta}_{g,k} \mathbf{g}_{r,k} + g_{d,k}|^2}{\delta_h^2}。因而, U_k 在数据传输$$

阶段的吞吐量为

$$R_{k,1} = \tau_{k,1} \text{lb}(1 + \gamma_{h,k}) \quad (5)$$

此外,  $U_k$  进行数据传输的能量应该不超过收集的能量, 即约束条件为

$$(p_k + p_{c,k}) t_k \leq t_0 \min\left(\eta P_{hd} |\mathbf{h}_{r,k}^H \boldsymbol{\Theta}_h \mathbf{h} + h_{d,k}|^2, p_{f,k}\right) \quad (6)$$

在时隙  $\tau_{k,2}$  内, HRN 将接收的信号  $y_{h,k}$  解码转发后经由 IRS<sub>2</sub> 反射到 BS。IRS<sub>2</sub> 的反射波束成形矩阵为  $\boldsymbol{\Theta}_{f,k} = \sqrt{\rho} \text{diag}\{v_{f,k,1}, \dots, v_{f,k,N_2}\}$ , 其中,  $v_{f,k,n} = e^{j\theta_n}$ 。BS 接收来自 HRN 的信号为

$$y_{b,k} = (\mathbf{f}_r^H \boldsymbol{\Theta}_{f,k} \mathbf{f} + f_d) \sqrt{p_{hu}} x_k + n_b \quad (7)$$

其中,  $p_{hu}$  为 HRN 的信息发送功率,  $n_b$  为 BS 处的噪声且  $n_b \sim \text{CN}(0, \delta_b^2)$ 。BS 处的信噪比为

$$\gamma_{b,k} = \frac{P_{hu} |\mathbf{f}_r^H \boldsymbol{\Theta}_{f,k} \mathbf{f} + f_d|^2}{\delta_b^2}。故 U_k 在数据转发阶段的$$

吞吐量为

$$R_{k,2} = \tau_{k,2} \text{lb}(1 + \gamma_{b,k}) \quad (8)$$

根据文献[11],  $U_k$  在时隙  $t_k$  的吞吐量为

$$R_k = \min(R_{k,1}, R_{k,2}) \quad (9)$$

## 2 系统吞吐量最大化

为了最大化系统的吞吐量, 本节设计了能量传输、数据传输和数据转发阶段 IRS 的反射波束成形矩阵、时间调度以及用户的发送功率的联合优化问题。该问题定义为

P1:

$$\max_{p, t, \tau, \boldsymbol{\Theta}_g, \boldsymbol{\Theta}_f, \boldsymbol{\Theta}_R} \sum_{k=1}^K \min(R_{k,1}, R_{k,2})$$

$$\text{s.t. C1: } \tau_{k,1} (p_k + p_{c,k}) \leq$$

$$t_0 \min\left(\eta P_{hd} |\mathbf{h}_{r,k}^H \boldsymbol{\Theta}_h \mathbf{h} + h_{d,k}|^2, p_{f,k}\right)$$

$$\text{C2: } p_k \geq 0$$

$$\text{C3: } \sum_{k=0}^K t_k \leq T, 0 \leq t_k \leq T$$

$$\text{C4: } \tau_{k,1} + \tau_{k,2} \leq t_k, 0 \leq \tau_{k,1}, \tau_{k,2} \leq t_k$$

$$\text{C5: } |v_{h,n}| = 1, \forall n$$

$$\text{C6: } |v_{g,k,n}| = 1, \forall n, \forall k$$

$$\text{C7: } |v_{f,k,n}| = 1, \forall n, \forall k$$

其中,  $\mathbf{p} = [p_1, \dots, p_K]$ ,  $\mathbf{t} = [t_0, t_1, \dots, t_K]$ ,  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_{1,\mu}, \dots, \tau_{K,\mu}]$ ,  $\mu = \{1, 2\}$ 。在 P1 中, 约束条件 C1 保证了  $U_k$  数据传输的能耗不会超过收集的能量, C2 为  $U_k$  发送功率的约束, C3 为  $U_k$  与 BS 间进行信息传输的时间约束, C4 为  $U_k$  向 HRN 进行数据传输和 HRN 向 BS 进行数据转发的时间约束, C5~C7 分别为能量传输、数据传输和数据转发阶段 IRS 的反射相位的约束。为了简化该问题, 引入 2 个关于  $U_k$  的吞吐量约束条件为

$$\text{C8: } R_k \leq \tau_{k,1} \text{lb}(1 + \gamma_{h,k}) \quad (10)$$

$$\text{C9: } R_k \leq \tau_{k,2} \text{lb}(1 + \gamma_{b,k}) \quad (11)$$

P1 可以转换为

$$\text{P2: } \max_{p, t, \tau, \boldsymbol{\Theta}_g, \boldsymbol{\Theta}_f, \boldsymbol{\Theta}_R} \sum_{k=1}^K R_k$$

s.t. C1~C9

其中,  $\mathbf{R}=[R_1, \dots, R_K]$ 。约束条件 C1、C8 和 C9 中, 变量  $\tau_{k,\mu}, p_k, \Theta_h, \Theta_{g,k}$  和  $\Theta_{f,k}$  间存在耦合, 故 P2 是非凸的, 求解十分困难。为此, 本文提出一种交替迭代优化算法, 求得该非凸问题的次优解。

1) 给定  $\Theta_h, \Theta_g$  和  $\Theta_f$ , 优化  $\mathbf{p}, \mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}$  和  $\mathbf{R}$

给定能量传输、数据传输和数据转发阶段 IRS 的相移矩阵  $\Theta_h, \Theta_g$  和  $\Theta_f$ , C8 中数据传输的时间  $\tau_{k,1}$  和  $U_k$  的发送功率  $p_k$  耦合。令  $y_k = \tau_{k,1} p_k$ , 则 P2 等价于

P3:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{p}, \mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{R}} \quad & \sum_{k=1}^K R_k \\ \text{s.t.} \quad & \text{C3, C4, C9} \\ & \text{C10: } y_k + \tau_{k,1} p_{c,k} \leq \\ & t_0 \min \left( \eta P_{hd} \left| \mathbf{h}_{r,k}^H \Theta_h \mathbf{h} + h_{d,k} \right|^2, p_{f,k} \right) \\ & \text{C11: } y_k \geq 0 \\ & \text{C12: } R_k \leq \\ & \tau_{k,1} \text{lb} \left( 1 + \frac{y_k \left| \mathbf{g}^H \Theta_{g,k} \mathbf{g}_{r,k} + g_{d,k} \right|^2}{\tau_{k,1} \delta_h^2} \right) \end{aligned}$$

P3 的目标函数是线性的, 约束条件 C3、C4、C9、C11 都是线性的不等式, C10 是关于  $\tau_{k,1}$  和  $y_k$  的线性不等式。根据文献 [32], C12 中  $\tau_{k,1} \text{lb} \left( 1 + \frac{y_k \left| \mathbf{g}^H \Theta_{g,k} \mathbf{g}_{r,k} + g_{d,k} \right|^2}{\tau_{k,1} \delta_h^2} \right)$  是关于  $\tau_{k,1}$  和  $y_k$  的凹函数。故 P3 是凸优化问题, 可以利用凸优化工具 CVX 进行有效求解。

2) 给定  $\mathbf{p}, \mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{R}, \Theta_h$  和  $\Theta_f$ , 优化  $\Theta_g$

给定  $\mathbf{p}, \mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{R}, \Theta_h$  和  $\Theta_f$  时, 令  $\mathbf{g}_k = \mathbf{g}^H \Theta_{g,k} \mathbf{g}_{r,k} + g_{d,k}$ , 则 P2 转换为如下关于  $\Theta_{g,k}$  的可行性问题。

P4:

find  $\Theta_{g,k}$

$$\text{s.t. C12: } R_k \leq \tau_{k,1} \text{lb} \left( 1 + \frac{y_k \left| \mathbf{g}_k \right|^2}{\tau_{k,1} \delta_h^2} \right)$$

其中,  $\Theta_{g,k} = \sqrt{\rho} \text{diag} \{v_{g,k,1}, \dots, v_{g,k,N_1}\}$ ,  $v_{g,k,n} = e^{j\theta_n}$ 。为了高效求得 P4 的可行解, 引入辅助变量  $x_k$ , 令  $\mathbf{e} = [v_{g,k,1}, \dots, v_{g,k,N_1}]^H$ 、 $\mathbf{a}_k = \sqrt{\rho} \text{diag}(\mathbf{g}^H) \mathbf{g}_{r,k}$  和  $\bar{\mathbf{e}} =$

$[e^H, 1]^H$ , 则  $\mathbf{g}_k = \mathbf{e}^H \mathbf{a}_k + g_{d,k}$ 。然后, 令  $\mathbf{E}_g^k = \bar{\mathbf{e}} \bar{\mathbf{e}}^H$  和

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_k \mathbf{a}_k^H & \mathbf{a}_k g_{d,k}^H \\ \mathbf{a}_k^H g_{d,k} & 0 \end{bmatrix}, \text{ 则 } |\mathbf{g}_k|^2 = \text{Tr}(\mathbf{A}_k \mathbf{E}_g^k) + |g_{d,k}|^2,$$

其中,  $\mathbf{E}_g^k \geq 0$  且  $\text{Rank}(\mathbf{E}_g^k) = 1$ 。则 P4 等价于

P4.1:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{E}_g^k, x_k} \quad & x_k \\ \text{s.t.} \quad & \text{C13: } x_k \geq 0 \\ & \text{C14: } \mathbf{E}_g^k \geq 0 \\ & \text{C15: } \text{Rank}(\mathbf{E}_g^k) = 1 \\ & \text{C16: } \mathbf{E}_g^k(n, n) = 1, n = \{1, \dots, N_1 + 1\} \\ & \text{C17: } R_k + x_k \leq \\ & \tau_{k,1} \text{lb} \left( 1 + \frac{y_k \left( \text{Tr}(\mathbf{A}_k \mathbf{E}_g^k) + |g_{d,k}|^2 \right)}{\tau_{k,1} \delta_h^2} \right) \end{aligned}$$

由于约束条件 C15 中  $\text{Rank}(\mathbf{E}_g^k) = 1$ , 故 P4.1 是非凸的。利用半正定松弛 (SDR, semidefinite relaxation) 技术对 C15 进行松弛后, 可以使用 CVX 进行求解。然后, 通过高斯随机技术得到满足秩为 1 且使  $|\mathbf{g}_k|^2$  最大的解  $\mathbf{e}_{g,k}^*$ 。通过求解  $K$  次 P4.1, 就可以获得不同  $U_k$  数据传输时 IRS<sub>1</sub> 的反射相移矩阵。

3) 给定  $\mathbf{p}, \mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{R}, \Theta_h$  和  $\Theta_g$ , 优化  $\Theta_f$

给定  $\mathbf{p}, \mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{R}, \Theta_h$  和  $\Theta_g$  时,  $\Theta_{f,k} =$

$\sqrt{\rho} \text{diag} \{v_{f,k,1}, \dots, v_{f,k,N_2}\}$ ,  $v_{f,k,n} = e^{j\theta_n}$ ,  $\mathbf{f}_k = \mathbf{f}^H \Theta_{f,k} \cdot$

$\mathbf{f}_r + \mathbf{f}_d$ 。令  $\mathbf{e} = [v_{f,k,1}, \dots, v_{f,k,N_2}]^H$ 、 $\bar{\mathbf{e}} = [e^H, 1]^H$  和

$\boldsymbol{\varphi} = \sqrt{\rho} \text{diag}(\mathbf{f}^H) \mathbf{f}_r$ , 则  $\mathbf{f}_k = \mathbf{e}^H \boldsymbol{\varphi} + \mathbf{f}_d$ 。然后, 令

$\mathbf{E}_f^k = \bar{\mathbf{e}} \bar{\mathbf{e}}^H$  和  $\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varphi} \boldsymbol{\varphi}^H & \boldsymbol{\varphi} \mathbf{f}_d^H \\ \boldsymbol{\varphi}^H \mathbf{f}_d & 0 \end{bmatrix}$ , 则  $|\mathbf{f}_k|^2 = \text{Tr}(\boldsymbol{\Phi} \mathbf{E}_f^k) +$

$|\mathbf{f}_d|^2$ , 其中,  $\mathbf{E}_f^k \geq 0$  且  $\text{Rank}(\mathbf{E}_f^k) = 1$ 。最后, 引入辅助变量  $x_k$ , 则类似于 P4 的关于  $\Theta_{f,k}$  的可行性问题就可以转换为

P5:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{E}_f^k, x_k} \quad & x_k \\ \text{s.t.} \quad & \text{C13, C18: } \mathbf{E}_f^k \geq 0 \\ & \text{C19: } \text{Rank}(\mathbf{E}_f^k) = 1 \\ & \text{C20: } \mathbf{E}_f^k(n, n) = 1, n = \{1, \dots, N_2, N_2 + 1\} \\ & \text{C21: } R_k + x_k \leq \end{aligned}$$

$$\tau_{k,2} \ln \left( 1 + \frac{P_{hu} \left( \text{Tr}(\Phi \mathbf{E}_f^k) + |f_d|^2 \right)}{\delta_b^2} \right)$$

同上, 约束条件 C19 中  $\text{Rank}(\mathbf{E}_f^k) = 1$ , 故 P5 也是非凸的。利用 SDR 技术对 C19 进行松弛后使用 CVX 求解, 再通过高斯随机技术获得满足  $\text{Rank}(\mathbf{E}_f^k) = 1$  且  $|f_k|^2$  最大的解  $\mathbf{e}_{g,k}^*$ 。最后求解  $K$  次 P5 获得 HRN 向 BS 转发  $U_k$  的数据时 IRS<sub>2</sub> 的反射相移矩阵。

4) 给定  $\mathbf{p}, \mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{R}, \Theta_f$  和  $\Theta_g$ , 优化  $\Theta_h$

给定  $\mathbf{p}, \mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{R}, \Theta_f$  和  $\Theta_g$  时,  $h_k = \mathbf{h}_{r,k}^H \Theta_h \mathbf{h} + h_{d,k}$ , 其中,  $\Theta_h = \sqrt{\rho} \text{diag}\{v_{h,1}, \dots, v_{h,N_1}\}$ ,  $v_{h,n} = e^{j\theta_n}$ 。令  $\mathbf{e} = [v_{h,1}, \dots, v_{h,N_1}]^H$ 、 $\bar{\mathbf{e}} = [\mathbf{e}^H, 1]^H$  和  $\mathbf{v}_k = \sqrt{\rho} \text{diag}(\mathbf{h}_{r,k}^H) \mathbf{h}$ , 则  $h_k = \mathbf{e}^H \mathbf{v}_k + h_{d,k}$ 。然后, 引入变量  $\mathbf{E}_h = \bar{\mathbf{e}} \bar{\mathbf{e}}^H$  和  $\mathbf{V}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^H & \mathbf{v}_k h_{d,k}^H \\ \mathbf{v}_k^H h_{d,k} & 0 \end{bmatrix}$ , 则  $|h_k|^2 = \text{Tr}(\mathbf{V}_k \mathbf{E}_h) + |h_{d,k}|^2$ , 其中,  $\mathbf{E}_h \geq 0$  且  $\text{Rank}(\mathbf{E}_h) = 1$ 。最后, 引入辅助变量  $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \dots, \lambda_K]$ , 则类似于 P4 的关于  $\Theta_h$  的可行性问题就可以变换为

P6:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{E}_h, \boldsymbol{\lambda}} \quad & \sum_{k=1}^K \lambda_k \\ \text{s.t.} \quad & \text{C22: } \mathbf{E}_h \geq 0 \\ & \text{C23: } \text{Rank}(\mathbf{E}_h) = 1 \\ & \text{C24: } \mathbf{E}_h(n, n), n = \{1, \dots, N_1, N_1 + 1\} \\ & \text{C25: } \lambda_k \geq 0, \forall k \\ & \text{C26: } y_k + p_{c,k} \tau_{k,1} + \lambda_k \leq \\ & t_0 \min \left( \eta P_{hd} \left( \text{Tr}(\mathbf{V}_k \mathbf{E}_h) + |h_{d,k}|^2 \right), p_{f,k} \right) \end{aligned}$$

同上, 约束条件 C23 中  $\text{Rank}(\mathbf{E}_h) = 1$ , 故 P6 也是非凸的。利用 SDR 技术对 C23 进行松弛后使用 CVX 求解, 再通过高斯随机技术获得满足  $\text{Rank}(\mathbf{E}_h) = 1$  且使  $K$  个用户收集能量总和最大的解  $\mathbf{e}_h^*$ 。

算法 1 描述了 P1 的求解步骤。通过步骤 3)~步骤 5) 可以获得  $\Theta_g$ 、 $\Theta_f$  和  $\Theta_h$  的局部最优解, 通过步骤 6) 可以获得  $\mathbf{p}, \mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}$  和  $\mathbf{R}$  的全局最优解。因此每次迭代后, P1 的目标函数值是非递减的<sup>[24]</sup>。同时, 系统吞吐量最大化问题 (即 P1) 的目标函数值存在一个有限的上界, 因此算法 1 是收敛的。求解 P1

的计算复杂度主要取决于步骤 3)~步骤 5), 根据文献[20], 求解 P4.1、P5 和 P6 的计算复杂度分别为  $O\left(N_1^{4.5} \log \frac{1}{\xi} + M\right)$ 、 $O\left(N_2^{4.5} \log \frac{1}{\xi} + M\right)$  和  $O\left(\max(K, N_1)^4 N_1^{0.5} \log \frac{1}{\xi} + MK\right)$ , 其中,  $\xi$  表示 CVX 的计算精度,  $M$  表示高斯随机的次数。故算法 1 的计算复杂度为  $O\left(nK(N_1^{4.5} + N_2^{4.5}) \log \frac{1}{\xi} + 3nKM + n \max(K, N_1)^4 N_1^{0.5} \log \frac{1}{\xi}\right)$ 。

**算法 1** 交替迭代优化算法

- 1) 给定  $\Theta_h, \Theta_g$  和  $\Theta_f$ , 令  $n = 0$ , 求解 P3 得到  $\mathbf{p}, \mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}$  和  $\mathbf{R}$  的初始值计算,  $R^{(n)} = \sum_{k=1}^K R_k$ 。
- 2) 重复
- 3) 给定  $\mathbf{p}, \mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{R}, \Theta_h$  和  $\Theta_f$ , 求解 P4.1 获得  $\Theta_g$ ;
- 4) 给定  $\mathbf{p}, \mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{R}, \Theta_h$  和  $\Theta_g$ , 求解 P5 获得  $\Theta_f$ ;
- 5) 给定  $\mathbf{p}, \mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{R}, \Theta_f$  和  $\Theta_g$ , 求解 P6 获得  $\Theta_h$ ;
- 6) 给定  $\Theta_h, \Theta_g$  和  $\Theta_f$ , 令  $n = n + 1$ , 求解 P3 更新  $\mathbf{p}, \mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}$  和  $\mathbf{R}$ , 计算  $R^{(n)}$ ;
- 7) 循环直至  $|R^{(n)} - R^{(n-1)}| \leq \varepsilon$ ,  $\varepsilon$  为迭代结果允许的误差系数。

### 3 结果分析

本节对仿真实验的结果进行分析。考虑系统的带宽和载波频率分别为 1 MHz 和 750 MHz<sup>[18]</sup>, 仿真的网络拓扑为二维坐标系, 构成系统的 BS、IRS<sub>2</sub>、HRN 和 IRS<sub>1</sub> 分别位于 (-100,0)、(-50,-1)、(0,0) 和 (3,1) 处。K 个用户随机分布在圆心为 (8,0)、半径为 2 m 的圆内。假设大尺度衰落信道建模为  $A \left(\frac{d}{d_0}\right)^{-\alpha}$ , 其中,  $A$  表示参考距离  $d_0 = 1$  m 时的路径损耗, 且  $A = -10$  dB;  $d$  表示发送端和接收端之间的距离;  $\alpha$  表示路损因子。HRN 与  $U_k$  (或 BS) 链路间的路损因子设为 3.5, 其余链路间的路损因子设为 2.2<sup>[22]</sup>。各反射链路的小尺度衰落服从莱斯衰落<sup>[23]</sup>, 例如 HAN 和 IRS<sub>1</sub> 间的小尺度信道表示为

$$\bar{h}_r = \sqrt{\frac{\beta_{\text{hm,irs}_1}}{\beta_{\text{hm,irs}_1} + 1}} \bar{h}_r^{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{\beta_{\text{hm,irs}_1} + 1}} \bar{h}_r^{\text{NLoS}}, \text{ 其中, } \beta_{\text{hm,irs}_1}$$

表示 HAP 与 IRS<sub>1</sub> 间反射链路的莱斯因子,  $\bar{h}_r^{\text{LoS}}$  表示视距信道分量,  $\bar{h}_r^{\text{NLoS}}$  表示瑞利衰落分量。其他链路间小尺度信道与 HAN 和 IRS<sub>1</sub> 间的小尺度信道的定义类似, 其中 IRS 与 BS (或 HRN 与  $U_k$ ) 间的莱斯因子设为 3, HRN 与 BS (或  $U_k$ ) 链路间莱斯因子设为 0<sup>[22]</sup>。其余仿真参数如表 1 所示。将随机能量传输 IRS 相位方案、随机信息传输 IRS 相位方案、信息传输无 IRS 辅助方案和等分信息传输时间方案<sup>[11-12]</sup>作为参照方案。对于等分信息传输时间方案, 使  $U_k$  到 HRN 的数据传输与 HRN 到 BS 的数据转发的时间相等即  $\tau_{k,1} = \tau_{k,2} = \frac{t_k}{2}$ , 优化 IRS 的相位、信息传输的时间以及发送功率; 对于 IRS 随机相位方案, 能量或信息传输阶段 IRS 的相位随机生成, 优化剩余变量。

表 1 仿真参数		
参数	含义	数值
$K$	用户数量	4
$\rho$	IRS 反射效率系数	0.8
$\eta$	用户能量传输效率	0.8
$p_{f,k}/\text{mW}$	用户能量传输饱和功率	5
$p_{c,k}/\text{mW}$	用户数据传输电路损耗系数	1
$N_1$	IRS <sub>1</sub> 反射单元数量	30
$N_2$	IRS <sub>2</sub> 反射单元数量	30
$\delta_h^2/\text{dBm}$	HRN 处噪声功率	-90
$\delta_b^2/\text{dBm}$	BS 处噪声功率	-90
$P_{hu}/\text{dBm}$	HRN 能量传输功率	40
$p_{hd}/\text{dBm}$	HRN 数据转发功率	40
$\varepsilon$	迭代结果允许的误差系数	$10^{-3}$
$M$	高斯随机的次数	200

系统吞吐量随 HRN 发送功率  $P_h$  的变化如图 3 所示。从图 3 可以看出,  $P_h$  较小时, 随着  $P_h$  的增大, 系统吞吐量增长较快;  $P_h$  较大时, 系统吞吐量的增长趋势变缓。这是因为随着 HRN 的发送功率不断增加,  $U_k$  的接收功率趋近饱和, 收集能量的效率降低, 故当  $P_h$  从 35 dBm 不断增加时, 系统吞吐量增长趋势变缓。另外, 从图 3 中可以观察到, 最优传输方案的系统吞吐量优于其他传输方案。相较于等分信息传输时间方案, 当  $P_h$  较小时, 优化信息传输时间  $t_k$  可以平衡  $U_k$  数据传输和 HRN 数据转发的时间进而提高系统性能; 当  $P_h$  较大时,  $U_k$  能量充足,

数据传输和转发的时间近似相同。相较于随机信息传输 IRS 相位方案, 优化 IRS 的相位能够进一步改善信道条件从而提高系统性能。相较于随机能量传输 IRS 相位方案, 优化 IRS 的相位可以增加  $U_k$  的接收功率从而提高系统性能, 但是当  $P_h \geq 40$  dBm 时,  $U_k$  接收功率饱和,  $U_k$  能量充足, 系统性能近似最优传输方案。相较于信息传输无 IRS 辅助方案, IRS 可以为数据传输和转发提供反射链路进而提高系统性能, 同时当  $U_k$  的接收功率饱和, 信息传输没有 IRS 的辅助, 即使增加 HRN 数据转发时的发送功率也不会提高系统性能。

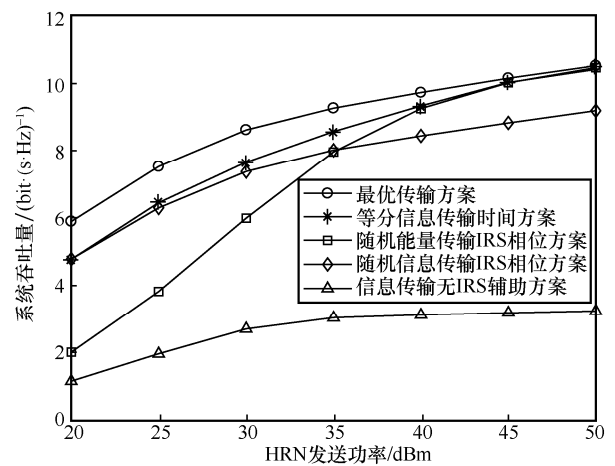


图 3 系统吞吐量随 HRN 发送功率  $P_h$  的变化

系统吞吐量随 IRS 反射单元数量  $N$  的变化如图 4 所示。从图 4 可以看出, 最优传输方案下的系统吞吐量优于其他方案, 随着 IRS 反射单元数量  $N$  的增加, 系统吞吐量也逐渐增大。  $N$  增加时, 系统能量传输、数据传输和数据转发的反射链路就会增多, 从而系统吞吐量增大。但是对于无 IRS 辅助方案, 给定 HRN 发送功率  $P_h = 40$  dBm 的情况下, 能量传输阶段 IRS<sub>1</sub> 的反射单元数量  $N$  逐渐增加到 30 时,  $U_k$  的接收功率已经达到饱和, 而信息传输阶段没有 IRS 辅助, 因此系统吞吐量就会趋于稳定。另外, 当  $N$  的初始值较小时, 随机能量传输 IRS 相位方案下的系统性能低于随机信息传输 IRS 相位方案; 随着  $N$  的增大, 随机能量传输 IRS 相位方案下的系统性能优于随机信息传输 IRS 相位方案。这也表明 IRS 不仅能在  $U_k$  能量较少的情况下提高 HRN 到  $U_k$  的能量传输效率, 还能在  $U_k$  能量充足的情况下提高系统信息传输效率。

系统吞吐量与用户数  $K$  的关系如图 5 所示。从

图5可以看出，最优传输方案下的系统吞吐量优于其他对比方案；随着用户数量的增多，系统吞吐量逐渐增大后趋于平缓，分析原因如下。在适当的范围内，用户数量越多则收集的能量就越多，故系统吞吐量就越大；但是当 $K$ 增长到一定值，例如 $K=8$ 时，每个用户分配用以传输信息的时间变短，影响了各个用户的信息传输效率，进而导致系统吞吐量增加缓慢。因此，增长的用户数量产生的正向增益和减短信息传输时间导致的负向增益使系统吞吐量会趋近于有限的上界值。

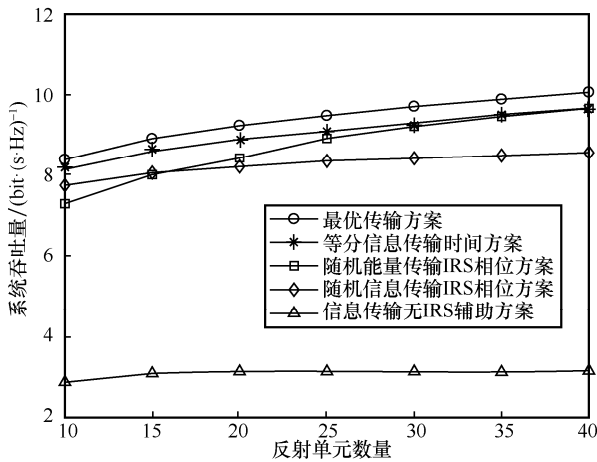


图4 系统吞吐量随 IRS 反射单元数量  $N$  的变化

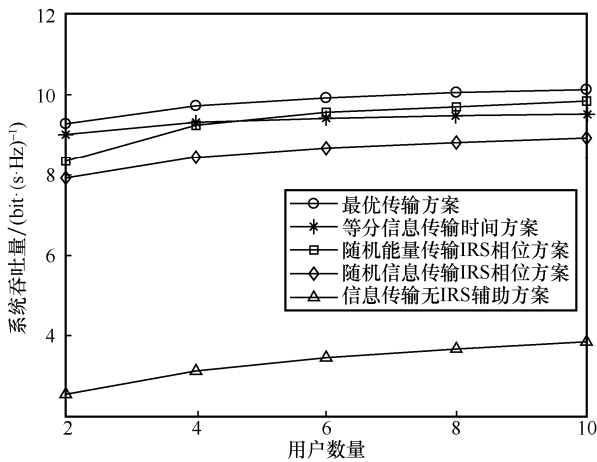


图5 系统吞吐量与用户数量  $K$  的关系

系统吞吐量随  $IRS_2$  位置的变化如图6所示。从图6可以看出，当 BS 和 HRN 距离  $IRS_2$  相等时，系统吞吐量最小；当  $IRS_2$  偏向 HRN 或 BS 时，系统吞吐量会逐渐增加。另外，随机能量传输 IRS 相位方案下的系统吞吐量优于随机信息传输 IRS 相位方案和信息传输无 IRS 辅助方案，这表明用户在能量充足的情况下进行信息传输时， $IRS_2$  能够提供更多的信息传输链路从而提高系统性能。

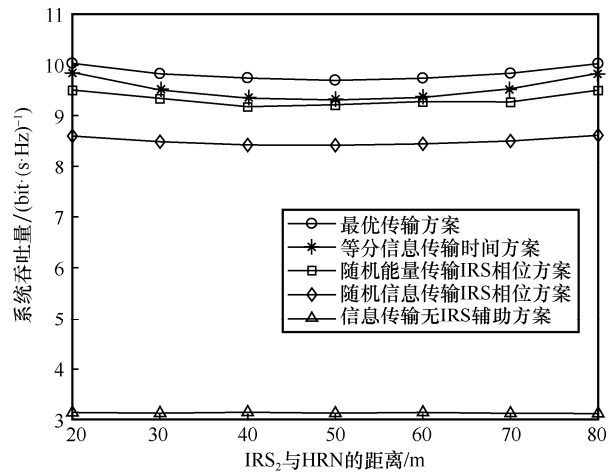


图6 系统吞吐量随  $IRS_2$  位置的变化

系统吞吐量随  $IRS_1$  位置的变化如图7所示。从图7可以看出，当 HRN 和  $U_k$  距离  $IRS_1$  相等时，系统吞吐量最小；当  $IRS_1$  偏向 HRN 或  $U_k$  时，系统吞吐量会逐渐增加。另外，在等分信息传输时间方案下， $IRS_1$  位置发生变化时，系统吞吐量基本保持不变。同时，对比随机能量传输 IRS 相位方案与等分信息传输时间方案下系统吞吐量随  $IRS_1$  与 HRN 间距离的变化趋势可以得出，当  $IRS_1$  位置固定时，合理分配数据传输和数据转发的时间也是至关重要的。

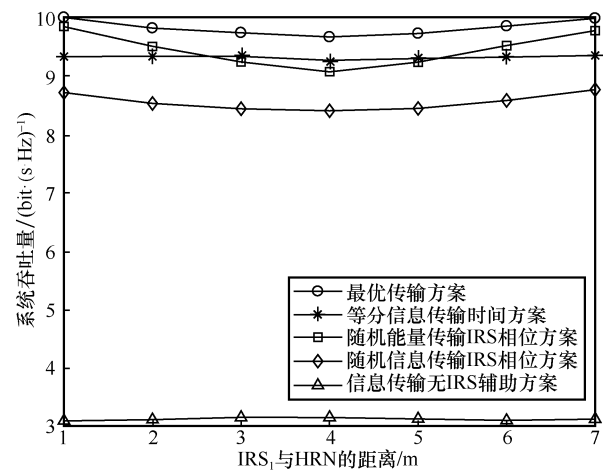


图7 系统吞吐量随  $IRS_1$  位置的变化

系统吞吐量随 BS 与 HRN 的距离的变化如图8所示。从图8可以看出，当 BS 与 HRN 之间距离逐渐增大时，系统吞吐量逐渐降低。这是因为 BS 与 HRN 相距较远时， $IRS_2$  的反射作用会降低，导致 BS 处接收信号较弱。此时，用户与 BS 信息传输阶段的系统吞吐量主要取决于 HRN 到 BS 的数据转发，因此系统吞吐量会随着 HRN 和 BS 的距离的增大而降低。另外，等分信息传输时间方案下系统性能

能随着距离的增加逐渐低于其他 IRS 传输方案, 这表明当 BS 与 HRN 相距较远时, 优化系统数据传输和转发的时间能够显著提高系统性能。

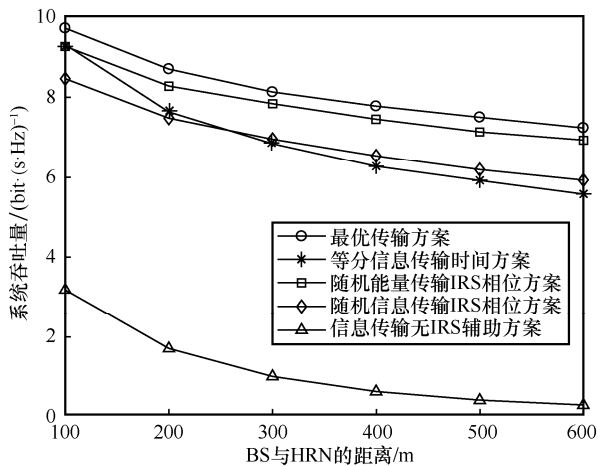


图 8 系统吞吐量随 BS 与 HRN 的距离的变化

#### 4 结束语

本文提出了 IRS 辅助的基于中继的 WPCN 传输方案, 有效提高了 HRN、用户和 BS 构成的无线供电通信网络中能量和信息传输的效率。为了最大化系统吞吐量, 研究了能量传输和数据传输、数据转发、IRS 反射相位和用户发送功率的联合优化问题, 并利用交替优化算法有效求得了吞吐量最大化问题的次优解。同时, 对所提算法的收敛性和复杂度进行了分析。最后, 仿真结果表明, IRS 能有效提高基于稳定电源供电的中继 WPCN 系统的性能。

#### 参考文献:

[1] CHEN X M, NG D W K, CHEN H H. Secrecy wireless information and power transfer: challenges and opportunities[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(2): 54-61.

[2] CHETTRI L, BERA R. A comprehensive survey on Internet of things (IoT) toward 5G wireless systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(1): 16-32.

[3] AOKI T, YUAN Q W, QUANG-THANG D, et al. Maximum transfer efficiency of MIMO-WPT system[C]//*Proceedings of IEEE Wireless Power Transfer Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-3.

[4] BI S Z, ZENG Y, ZHANG R. Wireless powered communication networks: an overview[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(2): 10-18.

[5] BOSHKOVSKA E, NG D W K, ZLATANOV N, et al. Robust resource allocation for MIMO wireless powered communication networks based on a non-linear EH model[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(5): 1984-1999.

[6] 张广驰, 曾志超, 崔苗, 等. 无线供电混合多址接入网络的资源

源分配[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(12): 3013-3019.

ZHANG G C, ZENG Z C, CUI M, et al. Resource allocation for wireless powered hybrid multiple access networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(12): 3013-3019.

[7] ALSABA Y, RAHIM S K A, LEOW C Y. Beamforming in wireless energy harvesting communications systems: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(2): 1329-1360.

[8] JU H, ZHANG R. User cooperation in wireless powered communication networks[C]//*Proceedings of IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1430-1434.

[9] CHEN H, LI Y H, LUIZ REBELATTO J, et al. Harvest-then-cooperate: wireless-powered cooperative communications[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(7): 1700-1711.

[10] YANG F, XU W J, LEE C H, et al. Joint beamforming and time duration optimization for battery-free-multi-antenna-relay-assisted WPCN[C]//*Proceedings of IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.

[11] LIU M Y, LIU Y. Charge-then-forward: wireless-powered communication for multiuser relay networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(11): 5155-5167.

[12] YANG F, XU W J, ZHANG Z, et al. Energy efficiency maximization for relay-assisted WPCN: joint time duration and power allocation[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 78297-78307.

[13] ZLATANOV N, NG D W K, SCHOBBER R. Capacity of the two-hop relay channel with wireless energy transfer from relay to source and energy transmission cost[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(1): 647-662.

[14] CHEN H, ZHOU X Y, LI Y H, et al. Wireless-powered cooperative communications via a hybrid relay[C]//*Proceedings of IEEE Information Theory Workshop*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 666-670.

[15] HUANG C W, ZAPPONE A, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(8): 4157-4170.

[16] 徐勇军, 高正念, 王茜竹, 等. 基于智能反射面辅助的无线供电通信网络鲁棒能效最大化算法[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(7): 2317-2324.

XU Y J, GAO Z N, WANG Q Z, et al. Robust energy efficiency maximization algorithm for intelligent reflecting surface-aided wireless powered-communication networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(7): 2317-2324.

[17] HU S, CHITTI K, RUSEK F, et al. User assignment with distributed large intelligent surface (LIS) systems[C]//*Proceedings of IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.

[18] WU Q Q, ZHANG R. Joint active and passive beamforming optimization for intelligent reflecting surface assisted SWIPT under QoS constraints[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1735-1748.

[19] WU Q Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(1): 106-112.

[20] DI B Y, ZHANG H L, SONG L Y, et al. Hybrid beamforming for reconfigurable intelligent surface based multi-user communications: achievable rates with limited discrete phase shifts[J]. *IEEE Journal on*

- Selected Areas in Communications, 2020, 38(8): 1809-1822.
- [21] GE Y M, FAN J C. Beamforming optimization for intelligent reflecting surface assisted MISO: a deep transfer learning approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(4): 3902-3907.
- [22] ZHANG Y T, DI B Y, ZHANG H L, et al. Beyond cell-free MIMO: energy efficient reconfigurable intelligent surface aided cell-free MIMO communications[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(2): 412-426.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] WANG J, KANG X, SUN S M, et al. Throughput maximization for peer-assisted wireless powered IoT NOMA networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(8): 5278-5291.
- [26] TAO Y, LI Q, GE X H. Sum rate optimization for IRS-aided two-way AF relay systems[C]//Proceedings of IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 823-828.
- [27] WANG X H, SHU F, SHI W P, et al. Beamforming design for IRS-aided decode-and-forward relay wireless network[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2022, 6(1): 198-207.
- [28] SUN Q, QIAN P P, DUAN W, et al. Ergodic rate analysis and IRS configuration for multi-IRS dual-hop DF relaying systems[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(10): 3224-3228.
- [29] DONG Y J, HOSSAIN M J, CHENG J L. Performance of wireless powered amplify and forward relaying over Nakagami-m fading channels with nonlinear energy harvester[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(4): 672-675.
- [30] SHAFIE E A, NIYATO D, AL-DHAHIR N. Security of an ordered-based distributive jamming scheme[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(1): 72-75.
- [31] PEJOSKI S, HADZI-VELKOV Z, SCHOBER R. Optimal power and time allocation for WPCNs with piece-wise linear EH model[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(3): 364-367.
- [32] ZHOU F H, HU R Q. Computation efficiency maximization in wireless-powered mobile edge computing networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(5): 3170-3184.

#### [作者简介]



杨震 (1961- )，男，江苏武进人，博士，南京邮电大学教授，主要研究方向为无线通信与网络信号处理、语音处理与现代语音通信等。



冯璇 (1998- )，男，山西忻州人，南京邮电大学硕士生，主要研究方向为无线供电通信网络、智能反射面等。



吕斌 (1989- )，男，江苏连云港人，博士，南京邮电大学副教授，主要研究方向为网络性能优化、无线供电通信等。