

基于 IRS 辅助的 SWIPT 物联网系统安全波束成形设计

朱政宇^{1,2,3,4}, 徐金雷¹, 孙钢灿^{1,2,4}, 王宁^{2,3}, 郝万明^{2,3,4}

(1. 郑州大学河南先进技术研究院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学信息工程学院, 河南 郑州 450001;
3. 郑州大学河南省智能网络和数据分析国际联合实验室, 河南 郑州 450001; 4. 郑州大学产业技术研究院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为满足绿色万物互联的智能信号处理部署和物理层安全的新要求, 针对基于智能反射面辅助的无线携能通信物联网系统中可持续能量供应紧缺问题, 提出了一种安全波束成形设计方法。考虑保密速率、发射功率和 IRS 反射相移约束, 以最大化能量采集器采集功率为目标, 联合优化基站发射波束成形矩阵和干扰机协方差矩阵以及 IRS 相移, 将优化问题建模为具有二次型约束的非凸二次型规划问题。利用松弛变量、半定松弛法、辅助变量和序列参数凸逼近法将非凸的二次型问题转化为等价的凸问题, 并提出一种交替迭代优化算法获取原问题的可行解。仿真结果表明, 所提算法能够快速收敛, 且与基准方案相比能有效地提升性能。

关键词: 智能反射面; 物联网; 无线携能通信系统; 安全波束成形; 能量采集

中图分类号: TN92

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021060

Secure beamforming design for IRS-assisted SWIPT Internet of things system

ZHU Zhengyu^{1,2,3,4}, XU Jinlei¹, SUN Gangcan^{1,2,4}, WANG Ning^{2,3}, HAO Wanming^{2,3,4}

1. Henan Institute of Advanced Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

2. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

3. Joint International Laboratory of Intelligent Network and Data Analysis in Henan Province, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

4. China Industrial Technology Research Institute, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: In order to meet the new requirements of intelligent signal processing deployment and physical layer security for green interconnection of things, a design method of secure beamforming was proposed to solve the problem of the shortage of sustainable energy supply in the information and energy transmission at the same time Internet of things (IoT) system assisted by intelligent reflecting surface (IRS). Considering the constraints of secrecy rate, transmit power and IRS reflection phase shift, the optimization problem was modeled as a non-convex quadratic programming problem with quadratic constraints, aiming at maximizing the acquisition power of energy collector, and jointly optimizing the base station transmit beamforming matrix, jammer covariance matrix and IRS phase shift. The non-convex quadratic problem was transformed into an equivalent convex problem by using the relaxation variable, semidefinite relaxation method, auxiliary variable and sequence parameter convex approximation method, and an alternative iterative optimization algorithm was proposed to obtain the feasible solution of the original problem. Simulation results show that the proposed al-

收稿日期: 2020-08-26; 修回日期: 2020-11-16

通信作者: 孙钢灿, iegcsun@zzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61801434, No.61801435, No.61771431); 中国博士后科学基金资助项目 (No.2020M682345); 河南省科技攻关计划基金资助项目 (No.192102310178); 郑州市重大科技创新专项基金资助项目 (No.2019CXZX0037); 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2019QY0302, No.2019YFB1803200)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61801434, No.61801435, No.61771431), China Postdoctoral Science Foundation Project (No.2020M682345), The Science and Technology Research Project of Henan Province (No.192102310178), The Science and Technology Innovation Project of Zhengzhou (No.2019CXZX0037), The National Key Research and Development Program of China (No.2019QY0302, No.2019YFB1803200)

gorithm can converge quickly and improve performance effectively compared with the benchmark scheme.

Keywords: intelligent reflecting surface, Internet of things, simultaneous wireless information and power transfer system, secure beamforming, energy harvest

1 引言

6G 技术的进一步研究和发展,可以满足未来泛在物联网 (IoT, Internet of things) 的需求,但 6G & IoT 的体系结构存在设备之间的资源分配、可持续通信、信息安全等一系列问题^[1]。随着信息传输速率和移动终端数量迅速增加,信息传输的安全性和可靠性尤其重要。

大规模 IoT 的应用发展极大地增加了无线设备的功耗,文献[2]设计了一种 6G 蜂窝 IoT 的大规模接入方案,以促进在有限频谱资源内实现高效的大规模接入,提高能量效率。针对接入 IoT 设备高级别安全保护产生的高能耗问题,文献[3]提出一种基于人工智能的自适应安全规范方法,该方法能匹配相应业务需求,避免能量耗尽,提高工作时间。然而,如何为海量 IoT 设备提供可持续的能量供应仍是一个巨大的挑战。对 IoT 设备进行有线供电不适合大规模部署,而电池供电方式的储能能力有限,限制了整个 IoT 的可持续运转^[4]。更换电池可以解决网络中设备能源短缺的问题,但受大规模 IoT 设备部署的环境制约,其成本高昂^[5]。

近年来,作为 IoT 设备供电的可靠方案之一,无线功率传输 (WPT, wireless power transfer) 技术自提出以来就受到学术界和工业界的广泛关注。文献[6]给出了集成能量、计算和通信的 6G 蜂窝 IoT 理论框架,探讨使用 WPT 对海量 IoT 设备持续性供电的可能性,提出了一种收发双方的联合波束成形设计方案。文献[7]提出了一种谐振束充电方法,能实现远程 WPT。无线携能通信 (SWIPT, simultaneous wireless information and power transfer)^[8-10]作为 WPT 技术的应用之一,也是一种射频能量采集技术,即无线信息与能量同时传输。与 WPT 不同之处在于,SWIPT 的无线设备进行能量交互的同时传输信息。文献[8]研究了一个具有全双工 IoT 节点的 SWIPT 系统,提出联合混合预编码器、译码规则和功率分配的优化方案,实现总传输功率最小化。因此,基于无线信号包含信息与能量这一特性,SWIPT 技术能够同时实现无线 IoT 中设备的持续性供能和有效通信,符合新一代 IoT 绿色通信的基本

要求^[9]。

另一方面,新兴的智能反射面 (IRS, intelligent reflecting surface)^[10-13]技术被认为是 6G 系统的前景技术之一。IRS 是由大量低成本、亚波长结构和独立可控的无源电磁反射元件集成的均匀阵列平面^[10-11],其主要功能是根据信号传播反馈的通信链路信息,通过软件编程的方式调整反射信号的幅度和相位,使反射信号与其他路径的信号构造性相加,从而增强接收端期望信号功率,提高通信质量^[12-13]。文献[14]针对 IRS 辅助多用户 SWIPT 系统最小采集能量的最大化问题,通过联合优化发射波束成形以及 IRS 反射相移,提出一种基于最大最小准则的波束成形设计方法。文献[15]考虑一个 IRS 辅助的多输入单输出 (MISO, multiple input single output) SWIPT 系统,提出一种交替迭代和半定松弛 (SDR, semidefinite relaxation) 算法优化发射/反射波束成形,最大化能量采集器 (EHR, energy harvesting receiver) 加权和功率。

基于 IRS 的主被动互惠传输技术是 6G&IoT 系统物理层解决方案之一,同时也带来了新的物理层安全 (PLS, physical layer security)^[16-17]问题。文献[18]在 IRS 辅助的高斯多输入多输出 (MIMO, multiple input multiple output) 系统窃听信道状态信息 (CSI, channel state information) 未知情况下,提出了一种联合 barrier 法和逐项优化法的交替迭代方法提高保密速率。文献[19]针对 IRS 辅助的多天线保密传输系统中的发射功率最小化问题,提出了一种基于 SDR 的交替迭代算法,并推导出安全波束成形的闭式表达式,提高功率分配方案的有效性。文献[20]针对 IRS 辅助的 SWIPT 系统中的能效最大化问题,在非线性能量采集模型下,通过采用人工噪声 (AN, artificial noise) 辅助形式,提出一种交替迭代法获得次优解。考虑窃听者的 CSI 未知和不存在视距通信链路的情况,针对分布式 IRS 辅助的多用户 MIMO 传输系统的保密和速率最大化问题,文献[21]采用罚函数法、连续凸近似 (SCA, successive convex approximation) 和 SDR 的联合优化策略,提出了一种稳健波束成形和 AN 联合设计方案。然而上述文献中,文献[14-15]只考虑了 IRS 辅助的 SWIPT 系统模型,文

献[18-21]的工作主要集中在研究传统的保密传输系统，而可有效提高保密速率和能量传输的干扰机技术^[22-23]尚未得到研究。基于 IRS 辅助的 SWIPT 通信系统通过利用外部干扰机发射干扰信号来对抗窃听，提高通信安全性，同时增强系统能量采集能力。

针对以上所述能量传输和信息安全问题，考虑基于干扰机和 IRS 辅助 SWIPT IoT 系统的 PLS 问题具有重要理论意义和现实价值。本文具体研究工作如下。

1) 建立了一个基于干扰机和 IRS 同时辅助的 SWIPT IoT 系统保密通信链路。同时满足保密速率、发射功率和 IRS 反射相移约束条件下，通过联合优化基站发射波束成形矩阵、干扰机协方差矩阵和 IRS 相移，给出了 EHR 模型。该问题是一个二次型约束的非凸二次型规划问题，难以直接求解。

2) 针对上述非凸二次型规划问题，提出了一种交替迭代优化算法。首先，针对非凸的保密约束条件，采用序列参数凸逼近（SPCA, sequential parametric convex approximation）将其转换为凸约束条件；然后，通过一阶泰勒展开、松弛变量、半定松弛法和辅助变量，将原非凸目标函数转化为凸近似形式；最后，提出基于 SDR 的交替迭代算法求得原非凸问题的可行解。

3) 仿真结果验证了所提算法的收敛性，证明了基于 IRS 辅助的 SWIPT IoT 系统可以显著提升 EHR 的能量采集性能。与传统方案相比，使用 IRS 在提高系统安全性和能量采集方面有很大优势。

2 系统模型

基于 IRS 辅助的 SWIPT IoT 系统模型如图 1 所示，包括一个多天线基站、一个单天线合法 IoT 设备和一个窃听设备 Eve。假设 Eve 比 IoT 设备更靠近基站，则其具备窃听节点外信息的便利条件。在考虑信息安全传输时，将 Eve 作为潜在的窃听设备是合理的。在传输的过程中，在 IRS 附近部署一个 EHR 来采集射频信号的能量。为提高信息传输的安全性，采用一台干扰机来发射干扰信号^[22]。假设基站和干扰机均配置 M 根天线，IRS 配置 N 个反射单元。该系统考虑从基站到接收设备的典型下行链路传输，假设通过基于接收信号强度（RSS, received signal strength）、到达角度（AoA, angle of arrival）、到达时间（ToA, time of arrival）和到达时间差（TDoA, time difference of arrival）来获取 Eve 的位置^[24-26]。

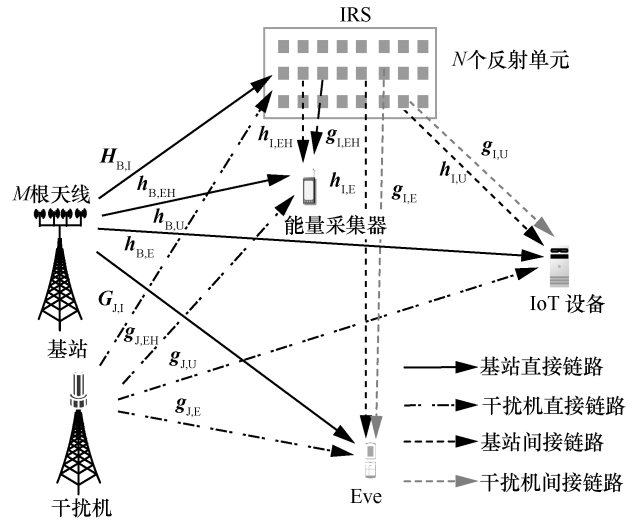


图 1 基于 IRS 辅助的 SWIPT IoT 系统模型

为了实现 SWIPT 系统在 MIMO 窃听信道下的安全传输，假设基站到 IRS、IoT 设备、EHR 和 Eve 的信道增益分别为 $H_{B,I} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 、 $h_{B,U} \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ 、 $h_{B,EH} \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ 和 $h_{B,E} \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ ，干扰机到 IRS、IoT 设备、EHR 和 Eve 的信道增益分别为 $G_{J,I} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 、 $g_{J,U} \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ 、 $g_{J,EH} \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ 和 $g_{J,E} \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ ，IRS 反射基站信号到 IoT 设备、EHR 和 Eve 的信道增益分别为 $h_{I,U} \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 、 $h_{I,EH} \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 和 $h_{I,E} \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ ，IRS 反射干扰机信号到 IoT 设备、EHR 和 Eve 的信道增益分别为 $g_{I,U} \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 、 $g_{I,EH} \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 和 $g_{I,E} \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 。IRS 调整其反射元素相位角以最大化用户组合方式入射信号。IRS 的对角相移矩阵表示为 $\Theta = \text{diag}[e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N}]$ ，主对角线 $\theta_n = (0, 2\pi)$ 表示组合入射信号第 n 个元素的相移，其中， $n=1, 2, \dots, N$ 。假设所有的信道增益均采用理想 CSI 模式，且均采用准静态平坦衰落信道模型^[27]。基站的发射信号为

$$x_1 = f_1 s_1 \quad (1)$$

干扰机的发射信号为

$$x_2 = f_2 s_2 \quad (2)$$

其中， $s_1 \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 和 $s_2 \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 分别为独立同分布的复高斯随机变量， $f_1 \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 和 $f_2 \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 分别为波束成形矢量与干扰预编码矢量， P_B 为基站的发射功率， P_J 为干扰机的发射功率，可得 $|f_1^H f_1| \leq P_B$ 和 $|f_2^H f_2| \leq P_J$ 。IoT 设备的接收信号为

$$y_U = (h_{I,U}^H \Theta H_{B,I} + h_{B,U}^H) f_1 s_1 + (g_{I,U}^H \Theta G_{J,I} + g_{J,U}^H) f_2 s_2 + n_U \quad (3)$$

Eve 的接收信号为

$$y_E = (\mathbf{h}_{1,E}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{B,I} + \mathbf{h}_{B,E}^H) \mathbf{f}_1 s_1 + (\mathbf{g}_{1,E}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G}_{J,I} + \mathbf{g}_{J,E}^H) \mathbf{f}_2 s_2 + n_E \quad (4)$$

其中, $n_U \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 和 $n_E \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 是复加性白高斯噪声。因此, IoT 设备的信干噪比 (SINR, signal to interference plus noise ratio) 表示为

$$r_U = \frac{|(\mathbf{h}_{1,U}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{B,I} + \mathbf{h}_{B,U}^H) \mathbf{f}_1|^2}{|(\mathbf{g}_{1,U}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G}_{J,I} + \mathbf{g}_{J,U}^H) \mathbf{f}_2|^2 + \sigma^2} \quad (5)$$

Eve 的 SINR 表示为

$$r_E = \frac{|(\mathbf{h}_{1,E}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{B,I} + \mathbf{h}_{B,E}^H) \mathbf{f}_1|^2}{|(\mathbf{g}_{1,E}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G}_{J,I} + \mathbf{g}_{J,E}^H) \mathbf{f}_2|^2 + \sigma^2} \quad (6)$$

IoT 设备的可达保密速率可表示为

$$R_s = \text{lb}(1+r_U) - \text{lb}(1+r_E) \quad (7)$$

另外, 采用文献[15]的线性能量采集模型, EHR 能够采集的功率为

$$E = \xi \left(|(\mathbf{h}_{B,EH}^H + \mathbf{h}_{1,EH}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{B,I}) \mathbf{f}_1|^2 + |(\mathbf{g}_{J,EH}^H + \mathbf{g}_{1,EH}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G}_{J,I}) \mathbf{f}_2|^2 \right) \quad (8)$$

其中, ξ 为能量转换效率。

3 安全波束成形设计方案

本节通过联合优化安全发射波束成形矢量、干扰协方差矩阵和 IRS 相移, 以实现在基站发射功率、干扰发射功率和 IoT 可达保密速率约束条件下 EHR 的能量采集最大化。

3.1 问题建模

能量采集最大化问题可以表述为 P1。

$$\text{P1: } \max_{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \boldsymbol{\Theta}} |(\mathbf{h}_{B,EH}^H + \mathbf{h}_{1,EH}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{B,I}) \mathbf{f}_1|^2 +$$

$$|(\mathbf{g}_{J,EH}^H + \mathbf{g}_{1,EH}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G}_{J,I}) \mathbf{f}_2|^2 \quad (9a)$$

$$\text{s.t. } |\mathbf{f}_1^H \mathbf{f}_1| \leq P_b \quad (9b)$$

$$|\mathbf{f}_2^H \mathbf{f}_2| \leq P_j \quad (9c)$$

$$R_s \geq R_{th} \quad (9d)$$

$$0 \leq \theta_n \leq 2\pi, \forall n \in N \quad (9e)$$

其中, R_{th} 为保密速率阈值。由于目标函数以及约束条件的非凸性^[27], P1 是一个具有二次型约束的非凸二次型规划问题 (QCQP, quadratically constrained

quadratic program), 也是 NP-hard 问题, 求解困难。但是当 $\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2$ 和 $\boldsymbol{\Theta}$ 中的一个变量已知时, P1 可以利用交替迭代算法有效地求解。

令 $\mathbf{u} = [e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_n}]^H$, $\mathbf{v} = [\mathbf{u}^H, 1]$, $\mathbf{h}_U = [\text{diag}\{\mathbf{h}_{1,U}^H\}, \mathbf{H}_{B,I}; \mathbf{h}_{B,U}^H]$, $\mathbf{h}_E = [\text{diag}\{\mathbf{h}_{1,E}^H\}, \mathbf{H}_{B,I}; \mathbf{h}_{B,E}^H]$, $\mathbf{g}_U = [\text{diag}\{\mathbf{g}_{1,U}^H\}, \mathbf{G}_{J,I}; \mathbf{g}_{J,U}^H]$, $\mathbf{g}_E = [\text{diag}\{\mathbf{g}_{1,E}^H\}, \mathbf{G}_{J,I}; \mathbf{g}_{J,E}^H]$, $\mathbf{h}_B = [\text{diag}\{\mathbf{h}_{1,EH}^H\}, \mathbf{H}_{B,I}; \mathbf{h}_{B,EH}^H]$, $\mathbf{g}_J = [\text{diag}\{\mathbf{g}_{1,EH}^H\}, \mathbf{G}_{J,I}; \mathbf{g}_{J,EH}^H]$, 代入 P1 并化简, 可得到 P2。

$$\text{P2: } \max_{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{v}} |\mathbf{v}^H \mathbf{h}_B \mathbf{f}_1|^2 + |\mathbf{v}^H \mathbf{g}_J \mathbf{f}_2|^2 \quad (10)$$

s.t. 式(9b), 式(9c), 式(9d), 式(9e)

由于保密速率约束条件式(9d)是非凸的, 可以采用松弛变量和 SPCA 进行凸近似。为使约束条件式(9d)易于处理, 首先引入 2 个松弛变量 $r_1 > 0$ 和 $r_2 > 0$, 式(9d)可以等价转化为

$$\text{lb}(r_1 r_2) \geq R_{th} \quad (11a)$$

$$1 + \frac{|\mathbf{v}^H \mathbf{h}_U \mathbf{f}_1|^2}{|\mathbf{v}^H \mathbf{g}_U \mathbf{f}_2|^2 + \sigma^2} \geq r_1 \quad (11b)$$

$$1 + \frac{|\mathbf{v}^H \mathbf{h}_E \mathbf{f}_1|^2}{|\mathbf{v}^H \mathbf{g}_E \mathbf{f}_2|^2 + \sigma^2} \leq \frac{1}{r_2} \quad (11c)$$

进一步化简式(11)可得

$$r_1 r_2 \geq 2^{R_{th}} \quad (12a)$$

$$\frac{|\mathbf{v}^H \mathbf{h}_U \mathbf{f}_1|^2}{|\mathbf{v}^H \mathbf{g}_U \mathbf{f}_2|^2 + \sigma^2} \geq r_1 - 1 \quad (12b)$$

$$\frac{|\mathbf{v}^H \mathbf{g}_E \mathbf{f}_2|^2 + \sigma^2}{|\mathbf{v}^H \mathbf{g}_E \mathbf{f}_2|^2 + \sigma^2 + |\mathbf{v}^H \mathbf{h}_E \mathbf{f}_1|^2} \geq r_2 \quad (12c)$$

约束条件式(12a)等价于

$$2^{R_{th}+2} + (r_1 - r_2)^2 \leq (r_1 + r_2)^2$$

进一步转化为二次曲线二次函数表示形式, 可得

$$\left\| \left[\sqrt{2^{R_{th}+2}}, r_1 - r_2 \right] \right\| \leq r_1 + r_2 \quad (13)$$

定义 $\mathbf{v} \triangleq \mathbf{v}^H$, 整理式(12b)和式(12c)分别为

$$\mathbf{f}_2^H \mathbf{g}_U^H \mathbf{V} \mathbf{g}_U \mathbf{f}_2 + \sigma^2 \leq \frac{\mathbf{f}_1^H \mathbf{h}_U^H \mathbf{V} \mathbf{h}_U \mathbf{f}_1}{r_1 - 1} \quad (14a)$$

$$\mathbf{f}_2^H \mathbf{g}_E^H \mathbf{V} \mathbf{g}_E \mathbf{f}_2 + \mathbf{f}_1^H \mathbf{h}_E^H \mathbf{V} \mathbf{h}_E \mathbf{f}_1 + \sigma^2 \leq \frac{\mathbf{f}_2^H \mathbf{g}_E^H \mathbf{V} \mathbf{g}_E \mathbf{f}_2 + \sigma^2}{r_2} \quad (14b)$$

根据凸优化理论^[28], 约束条件式(14a)和式(14b)仍为非凸的, 但其右半部分分别是关于变量 \mathbf{f}_1 和 \mathbf{f}_2 的二次型除以线性的凸函数形式。根据文献[29]中的 SPCA^[28]的思想, 二次型除以线性函数的形式能够等价转化为一阶泰勒展开式。

引理 1^[30] 定义一个关于变量 (\mathbf{w}, q) 的函数 $f_{A,a}(\mathbf{w}, q)$

$$f_{A,a}(\mathbf{w}, q) = \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{A} \mathbf{w}}{q - a} \quad (15)$$

其中, $\mathbf{A} \succeq 0$, $q \geq a$, 函数 $f_{A,a}(\mathbf{w}, q)$ 在以 $(\tilde{\mathbf{w}}, \tilde{q})$ 为中心点的一阶泰勒展开式为

$$F_{A,a}(\mathbf{w}, q, \tilde{\mathbf{w}}, \tilde{q}) = \frac{2\Re\{\tilde{\mathbf{w}}^H \mathbf{A} \mathbf{w}\}}{\tilde{q} - a} - \frac{\tilde{\mathbf{w}}^H \mathbf{A} \tilde{\mathbf{w}}}{(\tilde{q} - a)^2} (q - a) \quad (16)$$

根据引理 1 的结论, 分别以 $(\tilde{\mathbf{f}}_1, \tilde{r}_1)$ 和 $(\tilde{\mathbf{f}}_2, \tilde{r}_2)$ 为中心点, 能够将约束条件式(14a)和式(14b)的右半部分分别转化为

$$F_{H_U}(\mathbf{f}_1, r_1, \tilde{\mathbf{f}}_1, \tilde{r}_1) = \frac{2\Re\{\tilde{\mathbf{f}}_1^H \mathbf{h}_U^H \mathbf{V} \mathbf{h}_U \mathbf{f}_1\}}{\tilde{r}_1 - 1} - \frac{\tilde{\mathbf{f}}_1^H \mathbf{h}_U^H \mathbf{V} \mathbf{h}_U \tilde{\mathbf{f}}_1}{(\tilde{r}_1 - 1)^2} (r_1 - 1) \quad (17a)$$

$$F_{G_E}(\mathbf{f}_2, r_2, \tilde{\mathbf{f}}_2, \tilde{r}_2) = \frac{2\Re\{\tilde{\mathbf{f}}_2^H \mathbf{g}_E^H \mathbf{V} \mathbf{g}_E \mathbf{f}_2\}}{\tilde{r}_2} - \frac{\tilde{\mathbf{f}}_2^H \mathbf{g}_E^H \mathbf{V} \mathbf{g}_E \tilde{\mathbf{f}}_2}{\tilde{r}_2^2} r_2 \quad (17b)$$

另外, $\frac{\sigma^2}{r_2}$ 的一阶泰勒展开式为

$$\sigma^2 \left(\frac{2}{\tilde{r}_2} - \frac{r_2}{\tilde{r}_2^2} \right) \quad (18)$$

结合式(17a)、式(17b)和式(18), 可将式(14a)和式(14b)分别转化为以下凸的约束条件

$$\sigma^2 + \mathbf{f}_2^H \mathbf{g}_U^H \mathbf{V} \mathbf{g}_U \mathbf{f}_2 \leq F_{H_U}(\mathbf{f}_1, r_1, \tilde{\mathbf{f}}_1, \tilde{r}_1) \quad (19a)$$

$$\begin{aligned} & \sigma^2 + \mathbf{f}_2^H \mathbf{g}_E^H \mathbf{V} \mathbf{g}_E \mathbf{f}_2 + \mathbf{f}_1^H \mathbf{h}_E^H \mathbf{V} \mathbf{h}_E \mathbf{f}_1 \leq \\ & \sigma^2 \left(\frac{2}{\tilde{r}_2} - \frac{r_2}{\tilde{r}_2^2} \right) + F_{G_E}(\mathbf{f}_2, r_2, \tilde{\mathbf{f}}_2, \tilde{r}_2) \end{aligned} \quad (19b)$$

最后, 定义 $\mathbf{H}_B \triangleq \mathbf{h}_B^H \mathbf{V} \mathbf{h}_B$ 和 $\mathbf{G}_J \triangleq \mathbf{g}_J^H \mathbf{V} \mathbf{g}_J$, 根据式(10)~式(19), 可将 P2 转化为 P3。

$$\text{P3: } \max_{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{V}} \mathbf{f}_1^H \mathbf{H}_B \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2^H \mathbf{G}_J \mathbf{f}_2 \quad (20a)$$

$$\text{s.t. } \|\mathbf{f}_1\| \leq \sqrt{P_B}, \|\mathbf{f}_2\| \leq \sqrt{P_J} \quad (20b)$$

$$\mathbf{V}_{n,n} = 1, \forall n \in N \quad (20c)$$

$$\mathbf{V} \succeq 0 \quad (20d)$$

$$\text{rank}(\mathbf{V}) = 1 \quad (20e)$$

式(13), 式(19a), 式(19b)

由于组合变量 $(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2)$ 与 \mathbf{V} 仍然存在耦合, P3 的目标函数式(20a)仍然非凸。采用交替迭代算法^[24], 将 P3 转化为 2 个子问题, 再分别利用 SPCA 和 SDR 求得子问题的解。

3.2 交替迭代算法

首先, 根据文献[15], SPCA 算法将 $\mathbf{f}_1^H \mathbf{H}_B \mathbf{f}_1$ 和 $\mathbf{f}_2^H \mathbf{G}_J \mathbf{f}_2$ 在点 $\tilde{\mathbf{f}}_1$ 以及点 $\tilde{\mathbf{f}}_2$ 的一阶泰勒展开分别表示为

$$\mathbf{f}_1^H \mathbf{H}_B \mathbf{f}_1 \geq 2\Re\{\tilde{\mathbf{f}}_1^H \mathbf{H}_B \mathbf{f}_1\} - \tilde{\mathbf{f}}_1^H \mathbf{H}_B \tilde{\mathbf{f}}_1 \quad (21)$$

$$\mathbf{f}_2^H \mathbf{G}_J \mathbf{f}_2 \geq 2\Re\{\tilde{\mathbf{f}}_2^H \mathbf{G}_J \mathbf{f}_2\} - \tilde{\mathbf{f}}_2^H \mathbf{G}_J \tilde{\mathbf{f}}_2 \quad (22)$$

利用式(21)和式(22), 目标函数式(20a)可以表示为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{V}} 2\Re\{\tilde{\mathbf{f}}_1^H \mathbf{H}_B \mathbf{f}_1\} - \tilde{\mathbf{f}}_1^H \mathbf{H}_B \tilde{\mathbf{f}}_1 + \\ & 2\Re\{\tilde{\mathbf{f}}_2^H \mathbf{G}_J \mathbf{f}_2\} - \tilde{\mathbf{f}}_2^H \mathbf{G}_J \tilde{\mathbf{f}}_2 \end{aligned} \quad (23)$$

假设给定一个已知向量 \mathbf{V} , 可将 P3 转换为子问题 P4。

$$\begin{aligned} \text{P4: } \max_{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2} & 2\Re\{\tilde{\mathbf{f}}_1^H \mathbf{H}_B \mathbf{f}_1\} - \tilde{\mathbf{f}}_1^H \mathbf{H}_B \tilde{\mathbf{f}}_1 + \\ & 2\Re\{\tilde{\mathbf{f}}_2^H \mathbf{G}_J \mathbf{f}_2\} - \tilde{\mathbf{f}}_2^H \mathbf{G}_J \tilde{\mathbf{f}}_2 \end{aligned} \quad (24)$$

s.t. 式(13), 式(19a), 式(19b), 式(20b)

根据文献[28], P4 是二阶锥规划问题, 可以通过 CVX 工具^[31]直接求解。因此, 本文提出一种 SPCA 迭代算法求解子问题 P4, 具体流程如算法 1 所示。

算法 1 SPCA 迭代算法

1) 初始化: 迭代次数 $t = 0$, 随机产生一组问题 P4 的可行解 $\{\tilde{\mathbf{f}}_1(0), \tilde{\mathbf{f}}_2(0), \tilde{r}_1(0), \tilde{r}_2(0)\}$, 容错误差 $\xi > 0$

2) for 循环

3) 采用可行解求得 P4 的最优解, 并记为 $\{\tilde{\mathbf{f}}_1(t), \tilde{\mathbf{f}}_2(t), \tilde{r}_1(t), \tilde{r}_2(t)\}$

4) 更新可行解, $\tilde{\mathbf{f}}_1(t+1) = \tilde{\mathbf{f}}_1(t)$, $\tilde{\mathbf{f}}_2(t+1) =$

$$\tilde{\mathbf{f}}_2(t), \tilde{r}_1(t+1)=\tilde{r}_1(t), \tilde{r}_2(t+1)=\tilde{r}_2(t)$$

5) 更新迭代次数 $t=t+1$

6) 当同时满足 $|\tilde{\mathbf{f}}_1(t+1)-\tilde{\mathbf{f}}_1(t)| \leq \xi$, $|\tilde{\mathbf{f}}_2(t+1)-\tilde{\mathbf{f}}_2(t)| \leq \xi$, $|\tilde{r}_1(t+1)-\tilde{r}_1(t)| \leq \xi$ 和 $|\tilde{r}_2(t+1)-\tilde{r}_2(t)| \leq \xi$ 时, 退出循环

7) 否则继续迭代, 直到 for 循环结束

假设 $\{\tilde{\mathbf{f}}_1(t), \tilde{\mathbf{f}}_2(t), \tilde{r}_1(t), \tilde{r}_2(t)\}$ 是第 t 次迭代的最优解。由于近似算法可能导致问题发散, 所提 SPCA 迭代算法可能存在收敛性问题。因此, 在定理 1 中证明算法 1 的收敛性。

定理 1 定义 $f(t)$ 作为第 t 次迭代的最佳目标, 则有 $f(t+1) \geq f(t)$ 。定义 $\|\Delta\| = f(t+1) - f(t)$ 。随着 t 值增长, $\|\Delta\|$ 的值逐渐接近 0, 算法收敛。

证明 定义 $\mathbf{H}_E \triangleq \mathbf{h}_E^H \mathbf{V} \mathbf{h}_E$ 和 $\mathbf{G}_E \triangleq \mathbf{g}_E^H \mathbf{V} \mathbf{g}_E$, 根据文献[32]和式(15)~式(22), 能够得到 t 次迭代的不等式为

$$\sigma^2 + \mathbf{f}_2^H \mathbf{g}_U^H \mathbf{V} \mathbf{g}_U \mathbf{f}_2 \leq \frac{2\Re\left\{\tilde{\mathbf{f}}_1^H(t) \mathbf{h}_U^H \mathbf{V} \mathbf{h}_U \tilde{\mathbf{f}}_1(t)\right\}}{\tilde{r}_1(t)-1} - \frac{\tilde{\mathbf{f}}_1^H(t) \mathbf{h}_U^H \mathbf{V} \mathbf{h}_U \tilde{\mathbf{f}}_1(t)}{(\tilde{r}_1(t)-1)^2} (r_1-1) \quad (25)$$

$$\sigma^2 + \mathbf{f}_2^H \mathbf{G}_E \mathbf{f}_2 + \mathbf{f}_1^H \mathbf{H}_E \mathbf{f}_1 \leq \sigma^2 \left(\frac{2}{\tilde{r}_2(t)} - \frac{r_2}{\tilde{r}_2^2(t)} \right) + \frac{2\Re\left\{\tilde{\mathbf{f}}_2^H(t) \mathbf{g}_E^H \mathbf{V} \mathbf{g}_E \tilde{\mathbf{f}}_2(t)\right\}}{\tilde{r}_2(t)} - \frac{\tilde{\mathbf{f}}_2^H(t) \mathbf{g}_E^H \mathbf{V} \mathbf{g}_E \tilde{\mathbf{f}}_2(t)}{\tilde{r}_2^2(t)} r_2 \quad (26)$$

$$\mathbf{f}_1^H \mathbf{H}_B \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2^H \mathbf{G}_J \mathbf{f}_2 \geq 2\Re\left\{\tilde{\mathbf{f}}_1^H(t) \mathbf{H}_B \tilde{\mathbf{f}}_1(t)\right\} - \tilde{\mathbf{f}}_1^H(t) \mathbf{H}_B \tilde{\mathbf{f}}_1(t) + 2\Re\left\{\tilde{\mathbf{f}}_2^H(t) \mathbf{G}_J \tilde{\mathbf{f}}_2(t)\right\} - \tilde{\mathbf{f}}_2^H(t) \mathbf{G}_J \tilde{\mathbf{f}}_2(t) \quad (27)$$

由于式(25)~式(27)中采用了线性近似方法, 算法 1 中的更新规则确保在第 t 次迭代中 $\{\tilde{\mathbf{f}}_1(t), \tilde{\mathbf{f}}_2(t), \tilde{r}_1(t), \tilde{r}_2(t)\}$ 是优化问题的解。因此, $f(t+1) \geq f(t)$ 成立。算法 1 产生目标值的非递减序列, 由于基站发射功率约束和干扰机发射功率约束, P4 的目标函数是有界的, 因此, 算法 1 能保证收敛到局部最优解, 即 $\|\Delta\| = 0$ 和 $f(t) = f(t+1)$ 。

证毕。

给定组合变量 $(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2)$, 优化向量 \mathbf{V} 。P3 可转

化为 P5。

$$P5: \max_{\mathbf{V}} \mathbf{f}_1^H \mathbf{h}_B^H \mathbf{V} \mathbf{h}_B \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2^H \mathbf{g}_J^H \mathbf{V} \mathbf{g}_J \mathbf{f}_2 \quad (28)$$

s.t. 式(13), 式(19a), 式(19b), 式(20c), 式(20d), 式(20e)

由于存在秩一约束, P5 仍然非凸。采用 SDR 算法^[30], 忽略 $\text{Rank}(\mathbf{V})=1$ 的约束条件, P5 可转化为 P6。

$$P6: \max_{\mathbf{V}} \mathbf{f}_1^H \mathbf{h}_B^H \mathbf{V} \mathbf{h}_B \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2^H \mathbf{g}_J^H \mathbf{V} \mathbf{g}_J \mathbf{f}_2 \quad (29)$$

s.t. 式(13), 式(19a), 式(19b), 式(20c), 式(20d)

根据文献[28], P6 是一个 SDP 问题, 可采用凸优化求解器 CVX^[31]进行求解。然而, 一般来说, 松弛问题 P6 不一定得到秩一解, 即 $\text{Rank}(\mathbf{V}) \neq 1$, P6 的最优目标函数值仅服务于 P5 的上界。因此, 从 P6 的最优高阶解中构造秩一解需要额外步骤。具体来讲, 首先通过对 $\mathbf{V} = \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{U}^H$ 进行奇异值分解, 其中, $\mathbf{U} = [\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_{N+1}]$ 和 $\boldsymbol{\Sigma} = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_{N+1})$ 分别是一个酉矩阵和对角矩阵。然后, 获得 P5 的次优解 $\mathbf{v}^* = \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma}^{\frac{1}{2}} \mathbf{r}$ 。其中, $\mathbf{r} \in \mathbb{C}^{(N+1) \times 1}$ 是根据 $\mathbf{r} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_{N+1})$ 生成的随机向量。 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_{N+1})$ 表示均值为零的圆对称复高斯分布, 协方差矩阵为 \mathbf{I}_{N+1} 。利用独立生成的高斯随机向量 \mathbf{r} , 将 P6 的目标函数的值近似为所有 \mathbf{r} 中最优 \mathbf{v} 所得到的最大值。最后, \mathbf{v} 可以通过式(30)获得。

$$\mathbf{v} = \mathbf{e}^{\text{jarg} \left[\begin{matrix} \mathbf{v}_n^* \\ \mathbf{v}_{N+1}^* \end{matrix} \right]} , n=1, 2, \dots, N \quad (30)$$

结果表明, SDR 加上多次执行随机化保证了 P6 目标值的最大化^[33]。

使用交替迭代算法的思想求解原优化问题 P3, 迭代过程中 EHR 采集到的功率单调递增, 但由于发射功率的有界性, 所提的交替迭代算法最终将收敛于一个恒定值。然而, 由于原优化问题 P1 非凸, 该算法不能保证获得全局最优解, 所提交替迭代方法逐渐逼近最优解。定义 $\mathbf{V}(t), \tilde{\mathbf{f}}_1(t), \tilde{\mathbf{f}}_2(t), \tilde{r}_1(t), \tilde{r}_2(t)$ 和 $E(t)$ 分别为交替迭代算法中第 t 次迭代后的解。具体交替迭代算法流程如算法 2 所示。

算法 2 交替迭代算法

1) 参数设置: 初始化 $P_B, P_J, \sigma^2, R_{th}, E(0), \mathbf{V}(0)$, 设置容错误差 $\epsilon > 0$, 最大迭代次数 T , 迭代次数 $t=0$, 随机产生一组 P4 的可行解为

$$\{\tilde{\mathbf{f}}_1(0), \tilde{\mathbf{f}}_2(0), \tilde{\mathbf{r}}_1(0), \tilde{\mathbf{r}}_2(0)\}$$

2) for $t=1:T$

3) 给定 \mathbf{V} ，求解优化问题 P4，获得的最优解记为 $\{\tilde{\mathbf{f}}_1(t), \tilde{\mathbf{f}}_2(t), \tilde{\mathbf{r}}_1(t), \tilde{\mathbf{r}}_2(t)\}$

4) 给定 $\{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2\}$ ，求解优化问题 P6，获得的最优解记为 $\mathbf{V}(t)$

5) 更新迭代次数 $t=t+1$ 和可行解 $\tilde{\mathbf{f}}_1(t+1)=\tilde{\mathbf{f}}_1(t)$ 、 $\tilde{\mathbf{f}}_2(t+1)=\tilde{\mathbf{f}}_2(t)$ 、 $\tilde{\mathbf{r}}_1(t+1)=\tilde{\mathbf{r}}_1(t)$ 、 $\tilde{\mathbf{r}}_2(t+1)=\tilde{\mathbf{r}}_2(t)$ 、 $\mathbf{V}(t+1)=\mathbf{V}(t)$

6) 如果 $|E(t)-E(t-1)| \leq \epsilon$ ，得到最优的发射波束成形 $\mathbf{f}_1^{\text{opt}}=\tilde{\mathbf{f}}_1(t)$ ，干扰协方差矢量 $\mathbf{f}_2^{\text{opt}}=\tilde{\mathbf{f}}_2(t)$ 和反射相移 $\mathbf{V}^{\text{opt}}=\mathbf{V}(t)$ ，退出循环

7) 否则继续迭代，直到 for 循环结束

4 仿真测试与分析

本节通过仿真分析评估所提方案的性能。采用以下 3 种基准方案进行对比。1) 使用 IRS，随机相移，即从区间中随机选取 θ_n ；2) 不采用 IRS，即 $\theta_n=0$ ；3) 使用 IRS，不采取协同干扰，即非 Jammer 方案。在仿真中，假设所有信道均采用瑞利衰落信道模型，IRS 的位置通常要避免阻塞来自基站的信号；假设基站/干扰机至 EHR、Eve、IoT 的距离分别为 5 m、90 m、100 m；基站/干扰机至 IRS 信道为视距链路，距离设为 7 m；IRS 至 EHR、Eve、IoT 的信道也为视距链路，且距离分别为 3 m、85 m、95 m^[34]。该系统的具体部署如图 2 所示，其他仿真参数如表 1 所示。

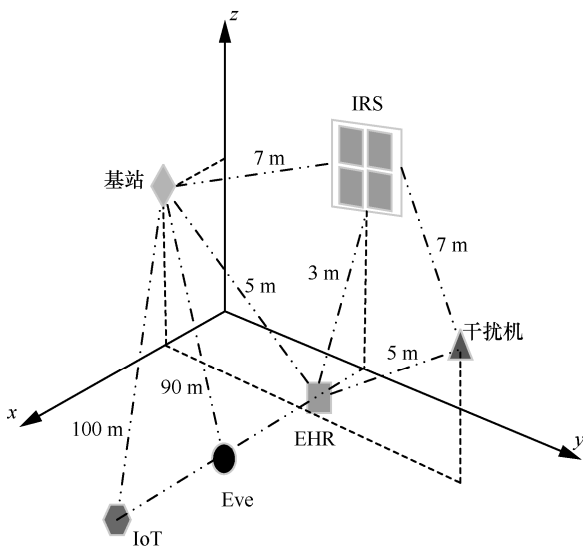


图 2 系统具体部署

表 1	仿真参数设置	取值
参数名称		取值
每米的路径损耗 L/dB		30
基站、干扰机与 IRS 间路径损耗指数		2.4
IRS 与 EHR、Eve、IoT 设备间路径损耗指数		2.4
基站、干扰机与 EHR、Eve、IoT 设备间路径损耗指数噪声方差 σ^2/dBm		3
采集效率 ξ		-105
基站发射功率 P_B/W		0.5
干扰机发射功率 P_I/W		15

图 3 给出了所提交迭代算法获得的 EHR 的采集能量随迭代次数变化曲线。从图 3 中可知，所提交迭代算法的收敛速度快，在不同 P_B 下仅需 5 次迭代就能获得最大的采集能量，达到收敛。

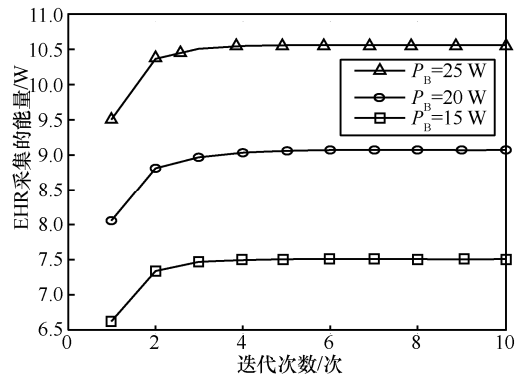


图 3 EHR 的采集能量随迭代次数变化

图 4 给出了 EHR 采集的能量与保密速率的对比关系。在 $M=8$ 和 $N=40$ 时，从图 4 中可得，随着保密速率的提高，EHR 采集的能量会逐渐下降；将本文所提方案的能量采集与 3 种基准方案进行对比，在 IRS 的辅助下采集的能量优于非 IRS 方案约 2.88 dB，主要原因是 IRS 为系统提供了新的自由度和分集增益，通过优化 IRS 的相移提高了 EHR 采集的能量。本文所提方案优于非 IRS 方法和随机相移的方法。对比非 Jammer 方案，图 4 验证了本文所提方案的有效性，在相同保密速率情况下，本文所提方案采集的能量更多。

图 5 给出了 EHR 采集的能量与 IRS 反射元素数量 N 的关系曲线。显然，当本文所提方案优于其他基准方案。假设 $R_{\text{th}}=3\text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ ，当 IRS 反射元素数量从 10 个增加到 70 个时，本文所提方案中 EHR 采集的能量随着反射元素数量 N 的增加单调增加。主要原因是，随着 IRS 反射元素数量 N 的增加，IRS 所获取空间自由度和分集增益将 N 变大。

当 $N=10$ 时,非 Jammer 方案采集的能量略低于随机相移方案,原因在于非 Jammer 方案总功率低于随机相移方案;当 $N>15$ 时,非 Jammer 方案优于随机相移方案。与非 IRS 方案相比,随机相移方案仅获得微小的性能增益,随着 N 的增加,性能提升较慢。

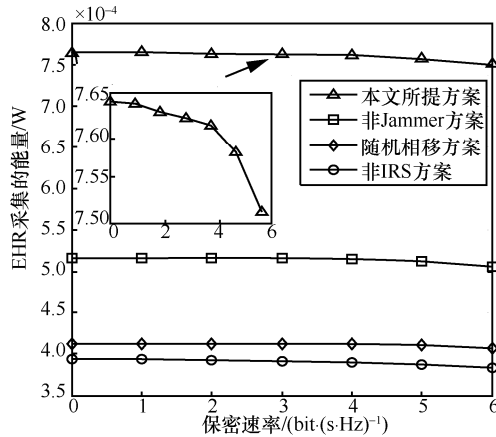


图 4 EHR 采集的能量与保密速率的关系

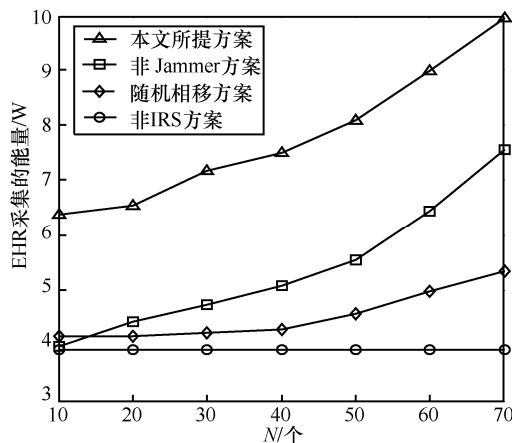


图 5 EHR 采集的能量与 IRS 反射元素数量 N 的关系

图 6 给出了 EHR 采集的能量与基站发射功率的关系曲线。从图 6 中可以看出,随着基站发射功率的增加,EHR 采集的能量关于基站发射功率单调递增。基站功率相同情况下,本文所提方案优于非 Jammer 方案约 1.74 dB。对比分析可知,IRS 辅助的系统带来能量采集性能的增益优于非 IRS 方案,本文所提方案显著优于随机相移方案。另外,随 PB 增加,IRS 方案与非 IRS 方案的性能差异以及 IRS 相移优化方案与随机相移方案的性能差异逐渐增大,原因在于本文所提方案会定向增强期望反射信号,进而增大了 IRS 带来的空间自由度和分集增益。

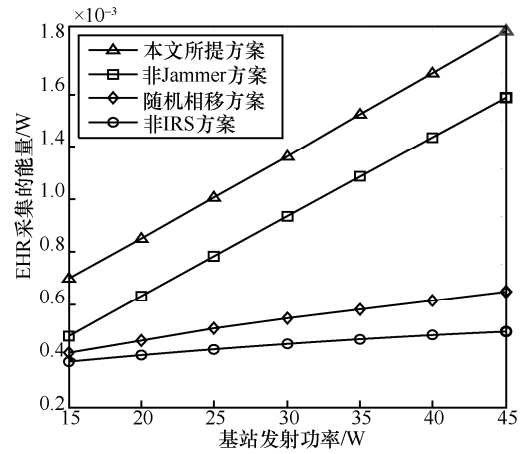


图 6 EHR 采集的能量与基站发射功率的关系

5 结束语

根据 IRS 定向增强反射信号以及干扰机的特点,针对基于 IRS 辅助的 SWIPT IoT 系统,本文提出一种安全波束成形设计方案。在满足保密速率、发射功率和 IRS 反射相移约束下,通过联合优化发射波束成形矩阵、干扰协方差矩阵和 IRS 反射相移矩阵,最大化 EHR 的能量采集;利用交替迭代算法、松弛变量、辅助变量、分式优化理论将原优化问题转化为 2 个子问题,并采用 SPC 和 SDR 求得子问题的可行解;提出一种 SPCA 迭代算法和交替迭代算法。最后,通过仿真结果验证以下 3 个结论: 1) 所提的交替迭代算法仅需 5 次迭代就能达到最大采集能量; 2) IRS 辅助的系统方案能量采集性能要优于非 IRS 方案; 3) 对 IRS 反射相移的优化能够显著提升系统的能量采集性能。

参考文献:

- [1] 张平,牛凯,田辉,等. 6G 移动通信技术展望[J]. 通信学报, 2019, 40(1): 141-148.
ZHANG P, NIU K, TIAN H, et al. Technology prospect of 6G mobile communications[J]. Journal on Communications, 2019, 40(1): 141-148.
- [2] 田飞燕,陈晓明,钟财军,等. 6G 蜂窝物联网的大规模接入技术[J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 92-103.
TIAN F Y, CHEN X M, ZHONG C J, et al. Massive access technology of 6G cellular Internet of things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(1): 92-103.
- [3] MAO B M, KAWAMOTO Y, KATO N. AI-based joint optimization of QoS and security for 6G energy harvesting Internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(8): 7032-7042.
- [4] NILSSON E, SVENSSON C. Power consumption of integrated low-power receivers[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2014, 4(3): 273-283.
- [5] LIU X L, ANSARI N. Toward green IoT: energy solutions and key challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(3): 104-110.

- [6] QI Q, CHEN X M, ZHONG C J, et al. Integration of energy, computation and communication in 6G cellular Internet of things[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(6): 1333-1337.
- [7] WANG W, ZHANG Q Q, LIN H, et al. Wireless energy transmission channel modeling in resonant beam charging for IoT devices[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 3976-3986.
- [8] ZHAO X W, ZHANG Y, GENG S Y, et al. Hybrid precoding for an adaptive interference decoding SWIPT system with full-duplex IoT devices[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(2): 1164-1177.
- [9] HUANG J, MENG Y, GONG X H, et al. A novel deployment scheme for green Internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2014, 1(2): 196-205.
- [10] 姚建文, 王楠. 智能反射面: 大有前景的 6G 技术[J]. 电信快报, 2020, 4(7): 8-13.
YAO J W, WANG N. Intelligent reflecting surface: a promising technique for 6G[J]. Telecommunications Information, 2020, 4(7): 8-13.
- [11] 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.
- [12] 伍明江, 类先富, 李里, 等. 面向 6G 物联网的主被动互惠传输关键技术[J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 45-51.
WU M J, LEI X F, LI L, et al. Key technologies of symbiotic reciprocal transmission for 6G Internet of things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(1): 45-51.
- [13] 王兆瑞, 刘亮, 李航, 等. 面向 6G 物联网的智能反射表面设计[J]. 物联网学报, 2020, 4(2): 84-95.
WANG Z R, LIU L, LI H, et al. Intelligent reflecting surface design for 6G-assisted Internet of things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(2): 84-95.
- [14] TANG Y, MA G, XIE H, et al. Joint transmit and reflective beamforming design for IRS-assisted multiuser MISO SWIPT systems[C]//IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [15] WU Q Q, ZHANG R. Weighted sum power maximization for intelligent reflecting surface aided SWIPT[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(5): 586-590.
- [16] 桂冠, 王禹, 黄浩. 基于深度学习的物理层无线通信技术: 机遇与挑战[J]. 通信学报, 2019, 40(2): 19-23.
GUI G, WANG Y, HUANG H. Deep learning based physical layer wireless communication techniques: opportunities and challenges[J]. Journal on Communications, 2019, 40(2): 19-23.
- [17] YANG N, WANG L F, GERACI G, et al. Safeguarding 5G wireless communication networks using physical layer security[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(4): 20-27.
- [18] DONG L M, WANG H M. Secure MIMO transmission via intelligent reflecting surface[J]. Wireless Communications Letters, 2020, 9(6): 787-790.
- [19] CHU Z, HAO W M, XIAO P, et al. Intelligent reflecting surface aided multi-antenna secure transmission[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(1): 108-112.
- [20] LIU J X, XIONG K, LU Y, et al. Energy efficiency in secure IRS-aided SWIPT[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(11): 1884-1888.
- [21] YU X H, XU D F, SUN Y, et al. Robust and secure wireless communications via intelligent reflecting surfaces[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(11): 2637-2652.
- [22] CAO K R, WANG B H, DING H Y, et al. Adaptive cooperative jamming for secure communication in energy harvesting relay networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(5): 1316-1319.
- [23] LIU W C, ZHOU X Y, DURRANI S, et al. Secure communication with a wireless-powered friendly jammer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(1): 401-415.
- [24] LIU C X, YANG N, YUAN J H, et al. Location-based secure transmission for wiretap channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(7): 1458-1470.
- [25] BOHIDAR S, BEHERA S, TRIPATHY C R. A comparative view on received signal strength (RSS) based location estimation in WSN[C]//2015 IEEE International Conference on Engineering and Technology. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-7.
- [26] NUR-A-ALAM M, HAQUE M M. A least square approach for TDoA/AoA wireless location in WCDMA system[C]//2008 11th International Conference on Computer and Information Technology. Piscataway: IEEE Press, 2008: 686-690.
- [27] GUAN X R, WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface assisted secrecy communication: Is artificial noise helpful or not?[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(6): 778-782.
- [28] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [29] WANG Y, SUN R J, WANG X S. Transceiver design to maximize the weighted sum secrecy rate in full-duplex SWIPT systems[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(6): 883-887.
- [30] SMOAL A J, VISHWANATHAN S V N, HOFMANN T. Kernel methods for missing variables[C]//Tenth International Workshop on Artificial Intelligence & Statistics.[S.l.:sn.], 2005: 325-332.
- [31] GRANT M, BOYD S. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming[B]. version 2.0 beta.
- [32] BECK A, BEN-TAL A, TETRUASHVILI L. A sequential parametric convex approximation method with applications to nonconvex truss topology design problems[J]. Journal of Global Optimization, 2010, 47(1): 29-51.
- [33] WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: Joint active and passive beamforming design[C]//IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [34] WANG Q, ZHOU F H, HU R Q, et al. Energy-efficient beamforming and cooperative jamming in IRS-assisted MISO networks[C]//IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-7.

[作者简介]



朱政宇 (1988—), 男, 河南周口人, 博士, 郑州大学讲师, 主要研究方向为智能反射面技术、物理层安全技术、无线通信与信号处理等。

徐金雷 (1996—), 男, 河南郑州人, 郑州大学硕士生, 主要研究方向为物理层安全技术与无线携能传输。

孙钢灿 (1977—), 男, 河南濮阳人, 博士, 郑州大学教授, 主要研究方向为深度学习、机器学习、无线通信、物理层安全技术等。

王宁 (1982—), 男, 河南郑州人, 博士, 郑州大学教授, 主要研究方向为无线资源管理、物理层安全技术、通信信号处理等。

郝万明 (1988—), 男, 河南林州人, 博士, 郑州大学讲师, 主要研究方向为毫米波通信、大规模 MIMO 技术、物理层安全技术等。