

STAR-RIS 辅助的 CR-SWIPT 系统 安全波束成形算法

李国权^{1,2}, 胡 航¹, 王玥涛¹, 谢宗霖¹, 林金朝^{1,2}

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 光电信息感测与微系统重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘 要: 为解决认知无线电(Cognitive Radio, CR)系统动态开放性带来的信息传输安全问题, 本文提出了一种同时透射和反射的可重构智能表面(Simultaneously Transmitting And Reflecting Reconfigurable Intelligent Surface, STAR-RIS)辅助 CR 系统安全波束成形算法. 在考虑认知基站(Cognitive Base Station, CBS)发射功率、次用户(Secondary User, SU)能量收集等约束下, 联合优化 SU 功率分配(Power Splitting, PS)系数等耦合变量, 以最大化 SU 最差保密率. 通过连续凸逼近(Successive Convex Approximation, SCA)算法将其转化为凸问题, 利用半定松弛(Semi-Definite Relaxation, SDR)等算法求解耦合变量. 仿真结果表明, 所提出的联合优化算法相较于其他方案具有更高的 SU 保密率, 且引入人工噪声(Artificial Noise, AN)可以进一步提升系统的安全性.

关键词: 同时透射和反射的可重构智能表面; 认知无线电; 无线携能通信; 物理层安全; 保密率

基金项目: 国家自然科学基金(No.U21A20447); 重庆市自然科学基金(No.cstc2020jcyj-cxttX0002, No.CSTB2023NSCQ-LZX0105)

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)12-4002-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20231098

Secure Beamforming Algorithm for STAR-RIS Assisted Cognitive Radio Systems with SWIPT

LI Guo-quan^{1,2}, HU Hang¹, WANG Yue-tao¹, XIE Zong-lin¹, LIN Jin-zhao^{1,2}

(1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Optoelectronic Information Sensing and Microsystems, Chongqing 400065, China)

Abstract: To solve the problems of information transmission security caused by the dynamic openness of cognitive radio (CR), a beamforming optimization algorithm is proposed for STAR-RIS assisted CR system. Considering the constraints such as the transmit power of cognitive base station (CBS) and SU energy harvesting, variables such as SU power splitting (PS) coefficients are jointly optimized to maximize the SU worst secrecy rate. It is transformed into a convex problem by the SCA algorithm, and the coupling variables are solved by the SDR algorithm. The simulation results show that the proposed optimization algorithm has higher SU secrecy rate compared with others, and the introduction of artificial noise (AN) can further improve the security of the system.

Key words: simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface; cognitive radio; simultaneous wireless information and power transfer; physical layer security; secrecy rate

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.U21A20447); Natural Science Foundation of Chongqing (No.cstc2020jcyj-cxttX0002, No.CSTB2023NSCQ-LZX0105)

1 引言

随着第六代移动通信技术的发展, 频谱效率成为影响无线通信系统性能的重要因素. 而认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术能够在不影响主用户使用

(Primary User, PU)的前提下, 使次用户(Secondary User, SU)共享被PU授权的频谱资源^[1], 从而有效缓解频谱资源紧缺的问题. 但由于CR网络的动态开放性, 其物理层安全一直是研究的焦点^[2].

传统可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)只能反射有限入射范围内的信号,为克服这一困难,文献[3]提出了同时透射和反射可重构智能表面(Simultaneously Transmitting And Reflecting Reconfigurable Intelligent Surface, STAR-RIS).为解决信道估计误差等不确定性带来的系统传输性能恶化问题,文献[4]提出了一种存在窃听的RIS辅助多输入单输出系统的鲁棒波束成形算法,具有更好的用户保密率和鲁棒性.文献[5]研究了STAR-RIS辅助上行NOMA系统中的安全传输问题,根据窃听用户(Eavesdropper, Eve)信道状态信息(Channel State Information, CSI)不同获取程度提出了一种混合波束成形算法,有效提升了用户的保密率.对于STAR-RIS辅助下行NOMA系统,文献[6]以块坐标下降法为框架,采用S-procedure算法解决窃听用户不完美CSI问题,随后借助连续凸逼近(Successive Convex Approximation, SCA)算法最大化用户的最差保密率.

同样的,将STAR-RIS引入到CR、无线携能通信(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)系统中以提高系统安全性具有重要的研究意义.文献[7]提出了基于空间调制的多输入多输出NOMA系统,将其扩展到广义空间调制场景,通过减少射频链来实现更高的频谱效率.文献[8]针对STAR-RIS辅助CR-NOMA通信系统,从中断概率、各态历经容量和能效全面分析了其系统性能.文献[9]构建了一个存在内部窃听的RIS辅助SWIPT通信系统,通过平滑逼近辅助逐次凸逼近算法最大化用户平均保密率.文献[10]采用功率分配(Power Splitting, PS)架构以同时收集能量和传输信息,通过半定松弛(Semi-Definite Relaxation, SDR)算法和交替优化(Alternating Optimization, AO)算法解耦变量,有效提升了用户安全速率.为解决RIS辅助NOMA系统中用户间干扰大的问题,文献[11]通过增加优化变量的维数将非凸约束转化为仿射约束进行优化,使得系统具有更低的功耗.文献[12]提出了一种STAR-RIS辅助SWIPT通信网络,通过联合优化信息解码接收器的PS系数、STAR-RIS相移矩阵,同时考虑传输速率和能量收集约束,最大限度地提高了用户的总和速率.为处理RIS辅助CR-SWIPT系统中多变量耦合的问题,文献[13]采用不精确块坐标下降法对基站发射波束成形矢量和RIS相移矩阵进行优化,以最大化系统保密率.以上工作表明,在CR中应用SWIPT会给合法用户带来安全隐患,因此安全通信在SWIPT系统中至关重要.

为解决CR-SWIPT中的安全传输问题,本文利用STAR-RIS增强CR-SWIPT系统安全性,提出了一种安全波束成形算法以提升SU保密率.贡献如下:

(1)建立STAR-RIS辅助的CR-SWIPT的无线传输

系统模型.通过联合优化认知基站(Cognitive Base Station, CBS)发射波束成形矢量、STAR-RIS相移矩阵和PS系数,以最大化SU的最差保密率.

(2)首先通过变量代换将优化问题转化为便于计算的形式,然后采用SCA将问题转为凸优化问题,并通过SDR算法放松矩阵 W, V 的秩一约束,最后对矩阵进行特征值分解以及高斯随机化恢复近似解.

(3)对本文方案所提算法进行了仿真验证,仿真结果表明本文算法收敛性更好,方案安全性更高.

2 系统模型

本文模型如图1所示.该场景由2个SU、2个PU和2个Eve组成,分别位于STAR-RIS的透射区域和反射区域. SU、PU和Eve均采用单天线, CBS天线数量和STAR-RIS反射元件数量分别为 N 和 M .

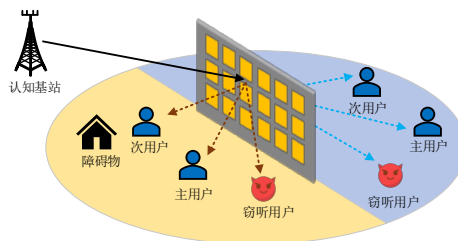


图1 STAR-RIS辅助CR-SWIPT系统模型

本文采用的STAR-RIS相移矩阵可以表示为 $\Theta_p = \text{diag}(\sqrt{\beta_1^p} e^{j\theta_1^p}, \sqrt{\beta_2^p} e^{j\theta_2^p}, \dots, \sqrt{\beta_M^p} e^{j\theta_M^p}) \in \mathbb{C}^{M \times M}$, 其中 $\beta_m^p \in [0, 1]$, $\theta_m^p \in [0, 2\pi)$ 和 $p \triangleq \{r, t\}$ 分别表示第 m 个元件的幅度和相移, STAR-RIS反射和透射区域. 本文假设STAR-RIS工作在理想状态下,不存在能量损耗,即 $\beta_m^t + \beta_m^r = 1$. 从CBS到STAR-RIS, STAR-RIS到SU、PU和Eve的等效信道增益可以分别表示为 $F_{BR} \in \mathbb{C}^{M \times N}$, $r_{SU_p} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$, $r_{PU_p} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 和 $r_{E_p} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$.

CBS所发送信号可以表示为 $x = \omega_1 s + \omega_2 a$, 其中 $\omega_1 \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, $\omega_2 \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 表示CBS发射波束成形矢量, $s \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 和 $a \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 分别表示数据符号和AN. CBS最大发射功率为 P_{\max} , 则 $\|\omega_1\|^2 + \|\omega_2\|^2 \leq P_{\max}$.

因此SU、PU和Eve接收到的信号可以表示为 $y_{SU_p} = h_{SU_p}^H x + n_{SU_p}$, $y_{PU_p} = h_{PU_p}^H x + n_{PU_p}$, $y_{E_p} = h_{E_p}^H x + n_{E_p}$ 其中 $h_{SU_p}^H = r_{SU_p}^H \Theta_p F_{BR}$, $h_{PU_p}^H = r_{PU_p}^H \Theta_p F_{BR}$, $h_{E_p}^H = r_{E_p}^H \Theta_p F_{BR}$ 分别表示CBS到SU、PU和Eve之间的等效信道增益, $n_s \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 表示用户处的加性高斯白噪声.

SU使用功率分配器将信号分配给信息解码器和能量收集器,同时实现能量收集和传输^[14]. 假设用于信息解码和能量收集的PS系数分别为 $\sqrt{\rho}$ 和 $\sqrt{1-\rho}$. 则分配后的信号可以分别表示为

$$\begin{aligned} y_{\text{SU}_p}^{\text{ID}} &= \sqrt{\rho} \mathbf{h}_{\text{SU}_p}^{\text{H}} \mathbf{x} + \sqrt{\rho} n_{\text{SU}_p} + n_1 \\ y_{\text{SU}_p}^{\text{EH}} &= \sqrt{1-\rho} \mathbf{h}_{\text{SU}_p}^{\text{H}} \mathbf{x} + \sqrt{1-\rho} n_{\text{SU}_p} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $n_1 \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_1^2)$ 为 PS 过程中产生的噪声. 则 SU 和 Eve 的信噪比 (Signal-Noise Ratio, SNR) 表示为

$$\gamma_{\text{SU}_p} = \frac{\rho \left| \mathbf{h}_{\text{SU}_p}^{\text{H}} \boldsymbol{\omega}_1 \right|^2}{\rho \left| \mathbf{h}_{\text{SU}_p}^{\text{H}} \boldsymbol{\omega}_2 \right|^2 + \rho \sigma^2 + \sigma_1^2}, \quad \gamma_{\text{E}_p} = \frac{\left| \mathbf{h}_{\text{E}_p}^{\text{H}} \boldsymbol{\omega}_1 \right|^2}{\left| \mathbf{h}_{\text{E}_p}^{\text{H}} \boldsymbol{\omega}_2 \right|^2 + \sigma^2}.$$

因此, SU 的最差保密率可以定义为

$$R_{\text{sec}} \triangleq \min_p \left(\left[\log_2(1 + \gamma_{\text{SU}_p}) - \log_2(1 + \gamma_{\text{E}_p}) \right]^+ \right) \quad (2)$$

此外, 用 η 表示 EH 的接收效率, 为了方便对比分析, 本文设置为 $0.7^{[10]}$. 则 SU 能量收集和 PU 上的干扰功率表示为

$$E_{\text{SU}_p} = \eta(1-\rho) \left[\left| \mathbf{h}_{\text{SU}_p}^{\text{H}} \boldsymbol{\omega}_1 \right|^2 + \left| \mathbf{h}_{\text{SU}_p}^{\text{H}} \boldsymbol{\omega}_2 \right|^2 + \sigma^2 \right] \quad (3)$$

$$\Gamma_{\text{PU}_p} = \left| \mathbf{h}_{\text{PU}_p}^{\text{H}} \boldsymbol{\omega}_1 \right|^2 + \left| \mathbf{h}_{\text{PU}_p}^{\text{H}} \boldsymbol{\omega}_2 \right|^2 \leq \Gamma_{\text{max}}$$

本文目标是最大化 SU 最差保密率, 所以优化问题可以表示为

$$\begin{aligned} & \max_{\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2, \rho, \boldsymbol{\theta}_p} R_{\text{sec}} \\ \text{s.t.} & \quad \text{C1: } \|\boldsymbol{\omega}_1\|^2 + \|\boldsymbol{\omega}_2\|^2 \leq P_{\text{max}} \\ & \quad \text{C2: } E_{\text{SU}_p} \geq E_{\text{min}}, \forall p \\ & \quad \text{C3: } \Gamma_{\text{PU}_p} \leq \Gamma_{\text{max}}, \forall p \\ & \quad \text{C4: } 0 < \rho < 1 \\ & \quad \text{C5: } 0 \leq \theta_m^p < 2\pi, \forall m, \forall p \\ & \quad \text{C6: } \beta_m^t + \beta_m^r = 1, \beta_m^p \in [0, 1], \forall m, \forall p \end{aligned} \quad (4)$$

C1~C6 分别是 CBS 的发射功率约束, SU 能量收集约束, PU 容忍干扰功率约束, SU 功率分配系数约束, STAR-RIS 相移约束.

3 算法设计

3.1 优化功率分配系数

在优化 ρ 时, 首先固定 $\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2$ 和 $\boldsymbol{\theta}_p$, 然后再定义 $\mathbf{G}_{\text{SU}_p} = \text{diag}(\mathbf{r}_{\text{SU}_p}^{\text{H}}) \mathbf{F}_{\text{BR}}$ 和 $\mathbf{G}_{\text{E}_p} = \text{diag}(\mathbf{r}_{\text{E}_p}^{\text{H}}) \mathbf{F}_{\text{BR}}$, 则 SU 和 Eve 的 SNR 可以分别表示为

$$\gamma_{\text{SU}_p} = \frac{\rho \left| \left(\mathbf{v}^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{SU}_p} \right) \boldsymbol{\omega}_1 \right|^2}{\rho \left| \left(\mathbf{v}^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{SU}_p} \right) \boldsymbol{\omega}_2 \right|^2 + \rho \sigma^2 + \sigma_1^2}, \quad (5)$$

$$\gamma_{\text{E}_p} = \frac{\left| \left(\mathbf{v}^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{E}_p} \right) \boldsymbol{\omega}_1 \right|^2}{\left| \left(\mathbf{v}^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{E}_p} \right) \boldsymbol{\omega}_2 \right|^2 + \sigma^2}$$

令 $\mathbf{W}_1 = \boldsymbol{\omega}_1 \boldsymbol{\omega}_1^{\text{H}}, \mathbf{W}_2 = \boldsymbol{\omega}_2 \boldsymbol{\omega}_2^{\text{H}}$, 则 $\mathbf{W}_1 \succeq 0, \mathbf{W}_2 \succeq 0$. 再令

$$\mathbf{H}_{\text{SU}_p} = \left(\mathbf{G}_{\text{SU}_p}^{\text{H}} \mathbf{v} \right) \left(\mathbf{v}^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{SU}_p} \right), \mathbf{H}_{\text{E}_p} = \left(\mathbf{G}_{\text{E}_p}^{\text{H}} \mathbf{v} \right) \left(\mathbf{v}^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{E}_p} \right).$$

对式(4)目标函数展开后, 对第二项进行一阶泰勒展开得到其上界, 然后用 SCA 迭代求解. 由于第三项和第四项不包含 ρ , 故可以省略, 然后可得:

$$\begin{aligned} & \max_{\rho} \min_p \left\{ \log_2 \left(\rho \left[\text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_1 + \mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_2 \right) + \sigma^2 \right] + \sigma_1^2 \right) \right. \\ & \quad \left. - \log_2 \left(\rho^{(k)} \left[\text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_2 \right) + \sigma^2 \right] + \sigma_1^2 \right) \right. \\ & \quad \left. - \frac{\left[\text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_2 \right) + \sigma^2 \right] \left(\rho - \rho^{(k)} \right)}{\ln 2 \left(\left[\text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_2 \right) + \sigma^2 \right] \rho^{(k)} + \sigma_1^2 \right)} \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

s.t.

$$\begin{aligned} \widetilde{\text{C1}}: & \eta(1-\rho) \left[\text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_1 + \mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_2 \right) + \sigma^2 \right] \geq E_{\text{min}} \\ \widetilde{\text{C2}}: & 0 < \rho < 1 \end{aligned}$$

其中, $\rho^{(k)}$ 是 ρ 在第 k 次迭代时的值. 当 $\rho^{(k)}$ 给定时, 式(6)是关于 ρ 的凸问题, 可使用 CVX 求解. 为得到其闭式解, 可采用 KKT 条件求其最优解 $\rho^{*[10]}$:

$$\rho_1 = \frac{\left[\text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_2 \right) + \sigma^2 \right] \rho^{(k)} + \sigma_1^2}{\text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_2 \right) + \sigma^2} \quad (7)$$

$$\rho_2 = 1 - \frac{E_{\text{min}}}{\eta \left[\text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_1 + \mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_2 \right) + \sigma^2 \right]} \quad (8)$$

综上, 最优解为 $\rho^* = \max\{\rho_1, \rho_2\}$

3.2 优化波束成形矢量

固定 STAR-RIS 相移矩阵, 并将求得的 ρ^* 带入原问题中, 再采用 SDR 松弛 \mathbf{W}_1 和 \mathbf{W}_2 的秩一约束可得:

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2} \min_p \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{\rho^* \text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_1 \right)}{\rho^* \text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_2 \right) + \rho^* \sigma^2 + \sigma_1^2} \right) \right. \\ & \quad \left. - \log_2 \left(1 + \frac{\text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{E}_p} \mathbf{W}_1 \right)}{\text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{E}_p} \mathbf{W}_2 \right) + \sigma^2} \right) \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

s.t.

$$\begin{aligned} \widehat{\text{C1}}: & \text{Tr} \left(\mathbf{W}_1 + \mathbf{W}_2 \right) \leq P_{\text{max}} \\ \widehat{\text{C2}}: & \eta(1-\rho^*) \left[\text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_1 + \mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_2 \right) + \sigma^2 \right] \geq E_{\text{min}} \\ \widehat{\text{C3}}: & \text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{PU}_p} \mathbf{W}_1 + \mathbf{H}_{\text{PU}_p} \mathbf{W}_2 \right) \leq \Gamma_{\text{max}}, \forall p \\ \widehat{\text{C4}}: & \mathbf{W}_1 \succeq 0, \mathbf{W}_2 \succeq 0 \end{aligned}$$

由于上式非凸无法求解,引入松弛变量 t 可得:

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2} \min_p \left(R_{\text{SU}_p} - t \right) \\ & \text{s.t.} \\ & \quad \widehat{\text{C}}1 - \widehat{\text{C}}4 \\ & \quad \widehat{\text{C}}5: R_{\text{E}_p}(\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2) \leq t, t > 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)可使用SCA迭代求解^[15].

首先将 $R_{\text{SU}_p}(\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2)$ 重写为以下形式:

$$\begin{aligned} R_{\text{SU}_p}(\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2) &= s_p(\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2) - s_p(\mathbf{W}_2) \\ &= \log_2 \left(\rho^* \left[\text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_1 + \mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_2 \right) + \sigma^2 \right] + \sigma_1^2 \right) \\ &\quad - \log_2 \left(\rho^* \left[\text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_2 \right) + \sigma^2 \right] + \sigma_1^2 \right) \end{aligned} \quad (11)$$

因此,在第 i 次迭代中,通过一阶泰勒展开求得 $s_p(\mathbf{W}_2)$ 在局部点 $(\mathbf{W}_2^{(i)})$ 的上界:

$$s_p(\mathbf{W}_2) \leq s_p(\mathbf{W}_2^{(i)}) + \text{Tr} \left[\mathbf{S} (\mathbf{W}_2 - \mathbf{W}_2^{(i)}) \right] = \tilde{s}_p(\mathbf{W}_2) \quad (12)$$

其中, $\mathbf{S} = \frac{\rho^* \mathbf{H}_{\text{SU}_p}}{\ln 2 \rho^* \left[\text{Tr} \left(\mathbf{H}_{\text{SU}_p} \mathbf{W}_2^{(i)} \right) + \sigma^2 \right] + \sigma_1^2}$.

对 $R_{\text{E}_p}(\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2)$ 进行同样的处理. 因此,在给定点 $(\mathbf{W}_1^{(i)}, \mathbf{W}_2^{(i)})$ 的情况下,优化波束成形矢量的子问题可以通过SCA求解并且表示为:

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2} \min_p \left[s_p(\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2) - \tilde{s}_p(\mathbf{W}_2) - t \right] \\ & \text{s.t.} \\ & \quad \widehat{\text{C}}1 - \widehat{\text{C}}4 \\ & \quad \widehat{\text{C}}6: \tilde{r}_p(\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2) - r_p(\mathbf{W}_2) \leq t, t > 0 \end{aligned} \quad (13)$$

至此,原问题已转化为凸优化问题,可使用CVX求解得到 \mathbf{W}_1^* 和 \mathbf{W}_2^* . 由于使用了SDR算法松弛秩一约束,所以不能保证解的秩为一. 因此当秩不为一时,需使用高斯随机化构造秩为一的近似解^[16].

3.3 优化相移矩阵

将上述得到的 $\rho^*, \omega_1^*, \omega_2^*$ 带入原问题,并定义

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{\text{SU}_p}^{\text{H}} \boldsymbol{\Theta}_p \mathbf{F}_{\text{BR}} &= \mathbf{v}_p^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{SU}_p}, \\ \mathbf{g}_{\text{E}_p}^{\text{H}} \boldsymbol{\Theta}_p \mathbf{F}_{\text{BR}} &= \mathbf{v}_p^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{E}_p} \tilde{\mathbf{H}}_{\text{SU}_p} = \mathbf{G}_{\text{SU}_p} \boldsymbol{\omega}_1 \boldsymbol{\omega}_1^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{SU}_p}^{\text{H}}, \\ \hat{\mathbf{H}}_{\text{SU}_p} &= \mathbf{G}_{\text{SU}_p} \boldsymbol{\omega}_2 \boldsymbol{\omega}_2^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{SU}_p}^{\text{H}} \tilde{\mathbf{H}}_{\text{E}_p} = \mathbf{G}_{\text{E}_p} \boldsymbol{\omega}_1 \boldsymbol{\omega}_1^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{E}_p}^{\text{H}}, \\ \hat{\mathbf{H}}_{\text{E}_p} &= \mathbf{G}_{\text{E}_p} \boldsymbol{\omega}_2 \boldsymbol{\omega}_2^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{E}_p}^{\text{H}} \tilde{\mathbf{H}}_{\text{PU}_p} = \mathbf{G}_{\text{PU}_p} \boldsymbol{\omega}_1 \boldsymbol{\omega}_1^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{PU}_p}^{\text{H}}, \\ \hat{\mathbf{H}}_{\text{PU}_p} &= \mathbf{G}_{\text{PU}_p} \boldsymbol{\omega}_2 \boldsymbol{\omega}_2^{\text{H}} \mathbf{G}_{\text{PU}_p}^{\text{H}}. \end{aligned}$$

其中, $\mathbf{G}_{\text{SU}_p} = \text{diag} \left(\mathbf{r}_{\text{SU}_p}^{\text{H}} \right) \mathbf{F}_{\text{BR}}, \mathbf{G}_{\text{E}_p} = \text{diag} \left(\mathbf{r}_{\text{E}_p}^{\text{H}} \right) \mathbf{F}_{\text{BR}}, \mathbf{V}_p = \mathbf{v}_p \mathbf{v}_p^{\text{H}}$.

需要满足 $\text{rank}(\mathbf{V}_p) = 1, \mathbf{V}_p \geq 0$.

则式(4)可重新表示为如下形式:

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{V}_p} \min_p \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{\rho^* \text{Tr} \left(\tilde{\mathbf{H}}_{\text{SU}_p} \mathbf{V}_p \right)}{\rho^* \text{Tr} \left(\hat{\mathbf{H}}_{\text{SU}_p} \mathbf{V}_p \right) + \rho^* \sigma^2 + \sigma_1^2} \right) \right. \\ & \quad \left. - \log_2 \left(1 + \frac{\text{Tr} \left(\tilde{\mathbf{H}}_{\text{E}_p} \mathbf{V}_p \right)}{\text{Tr} \left(\hat{\mathbf{H}}_{\text{E}_p} \mathbf{V}_p \right) + \sigma^2} \right) \right\} \\ & \text{s.t.} \\ & \quad \bar{\text{C}}1: \eta(1 - \rho^*) \left[\text{Tr} \left(\tilde{\mathbf{H}}_{\text{SU}_p} \mathbf{V}_p + \hat{\mathbf{H}}_{\text{SU}_p} \mathbf{V}_p \right) + \sigma^2 \right] \geq E_{\min}, \forall p \\ & \quad \bar{\text{C}}2: \text{Tr} \left(\tilde{\mathbf{H}}_{\text{PU}_p} \mathbf{V}_p + \hat{\mathbf{H}}_{\text{PU}_p} \mathbf{V}_p \right) \leq \Gamma_{\max}, \forall p \\ & \quad \bar{\text{C}}3: \text{rank}(\mathbf{V}_p) = 1, \forall p \\ & \quad \bar{\text{C}}4: \mathbf{V}_p \geq 0, \forall p \\ & \quad \bar{\text{C}}5: \text{diag} \left(\sum_p \mathbf{V}_p \right) = \beta^p, \forall p \end{aligned} \quad (14)$$

将SU传输速率 $R_{\text{SU}_p}(\mathbf{V}_p)$ 改写为

$$\begin{aligned} R_{\text{SU}_p}(\mathbf{V}_p) &= p_1(\mathbf{V}_p) - p_2(\mathbf{V}_p) \\ &= \log_2 \left(\rho^* \left[\text{Tr} \left(\tilde{\mathbf{H}}_{\text{SU}_p} \mathbf{V}_p + \hat{\mathbf{H}}_{\text{SU}_p} \mathbf{V}_p \right) \right] + \sigma_1^2 \right) \\ &\quad - \log_2 \left(\rho^* \left[\text{Tr} \left(\hat{\mathbf{H}}_{\text{SU}_p} \mathbf{V}_p \right) + \sigma^2 \right] + \sigma_1^2 \right) \end{aligned} \quad (15)$$

因此,在第 i 次迭代中,通过一阶泰勒展开求得 $p_2(\mathbf{V}_p)$ 在局部点 $(\mathbf{V}_p^{(i)})$ 的上界:

$$p_2(\mathbf{V}_p) \leq p_2(\mathbf{V}_p^{(i)}) + \text{Tr} \left[\mathbf{P} (\mathbf{V}_p - \mathbf{V}_p^{(i)}) \right] = \tilde{p}_2(\mathbf{V}_p) \quad (16)$$

其中, $\mathbf{P} = \frac{\rho^* \hat{\mathbf{H}}_{\text{SU}_p}}{\ln 2 \rho^* \left[\text{Tr} \left(\hat{\mathbf{H}}_{\text{SU}_p} \mathbf{V}_p^{(i)} \right) + \sigma^2 \right] + \sigma_1^2}$.

由此,在第 i 次迭代中给定点 $\mathbf{V}_p^{(i)}$,优化相移矩阵的子问题可以通过SCA求解并且表示为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{V}_p} \min_p \left[p_1(\mathbf{V}_p) - \tilde{p}_2(\mathbf{V}_p) - \tau \right] \\ & \text{s.t.} \\ & \quad \bar{\text{C}}1 - \bar{\text{C}}5 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\bar{\text{C}}6: \tilde{q}_1(\mathbf{V}_p) - q_2(\mathbf{V}_p) \leq \tau, \tau > 0$$

其中, τ 是引入的松弛变量.

$\text{rank}(\mathbf{V}_p) = 1$ 的等价条件为 $\|\mathbf{V}_p\|_* - \|\mathbf{V}_p\|_2 = 0$. 通过

一阶泰勒展开得到 $\|\mathbf{V}_p\|_2$ 下界:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{V}_p\|_2 &\geq \|\mathbf{V}_p^{(i)}\|_2 + \text{Tr} \left[\boldsymbol{\mu}_{\max}(\mathbf{V}_p^{(i)}) (\mathbf{V}_p^{(i)})^{\text{H}} (\mathbf{V}_p - \mathbf{V}_p^{(i)}) \right] \\ &= \left(\|\mathbf{V}_p\|_2 \right)^{\text{LB}} \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $\boldsymbol{\mu}_{\max}(\cdot)$ 是最大特征值对应的特征向量. 用惩罚函数代替秩一约束. 则问题可表示为

$$\begin{aligned} & \max_{V_p} \min_p \left\{ p_1(V_p) - \tilde{p}_2(V_p) - \tau - \beta \left[\left(\|V_p\|_* \right) - \left(\|V_p\|_2 \right)^{\text{LB}} \right] \right\} \\ & \text{s.t. } \overline{\text{C1}} \sim \overline{\text{C6}} \end{aligned} \quad (19)$$

至此优化相移矩阵的子问题已变成凸优化问题, 可以借助凸优化工具 CVX 来求解. 交替优化计算过程如算法 1 所示.

算法 1 交替优化算法

- 输入: $P_{\max}, i_{\max}, \Gamma_{\max}, E_{\min}, \beta, \varepsilon$
 输出: $\omega_1, \omega_2, V_p, \rho^*$
- (1) 设置迭代次数 $i=1$, 初始化 $W_1^{(0)}, W_2^{(0)}, V_p^{(0)}$
 - (2) FOR $i=1, 2, \dots, i_{\max}$
 - (3) 固定 $W_1^{(i-1)}, W_2^{(i-1)}, V_p^{(i-1)}$, 求解 $\rho^{(i)}$;
 - (4) 固定 $\rho^{(i)}, V_p^{(i-1)}$, 根据式(40)求解 $W_1^{(i)}, W_2^{(i)}$, 并且特征值分解获得 $\omega_1^{(i)}, \omega_2^{(i)}$
 - (5) 固定 $\rho^{(i)}, \omega_1^{(i)}, \omega_2^{(i)}$, 根据式(59)求解得到 $V_p^{(i)}$
 - (6) 计算 $R_{\text{sec}}^{(i)}$
 - (7) IF $|R_{\text{sec}}^{(i+1)} - R_{\text{sec}}^{(i)}| \leq \varepsilon$ or $i > i_{\max}$
 - (8) BREAK
 - (9) ELSE
 - (10) $i=i+1$
 - (11) END
 - (12) END

4 仿真分析

4.1 收敛性分析

由算法 1 可知, 假设问题的可行解为 $(\omega_1^{(i)}, \omega_2^{(i)}, \rho^{(i)}, V_p^{(i)})$. 在给定 (ρ, V_p) 的情况下, 经过 $i+1$ 次迭代, 可得到式(13)的最优解 $(\omega_1^{(i+1)}, \omega_2^{(i+1)}, \rho^{(i)}, V_p^{(i)})$. 因为 $(\omega_1^{(i+1)}, \omega_2^{(i+1)})$ 是在给定 $(\rho^{(i)}, V_p^{(i)})$ 的最优解, 于是:

$$R_{\text{sec}}(\omega_1^{(i)}, \omega_2^{(i)}, \rho^{(i)}, V_p^{(i)}) < R_{\text{sec}}(\omega_1^{(i+1)}, \omega_2^{(i+1)}, \rho^{(i)}, V_p^{(i)}) \quad (20)$$

此外, 假设式(19)在第 $i+1$ 次迭代最优解为 $(\omega_1^{(i+1)}, \omega_2^{(i+1)}, \rho^{(i+1)}, V_p^{(i+1)})$. 同样的可以得到:

$$R_{\text{sec}}(\omega_1^{(i+1)}, \omega_2^{(i+1)}, \rho^{(i)}, V_p^{(i)}) < R_{\text{sec}}(\omega_1^{(i+1)}, \omega_2^{(i+1)}, \rho^{(i+1)}, V_p^{(i+1)}) \quad (21)$$

结合两式可得:

$$R_{\text{sec}}(\omega_1^{(i)}, \omega_2^{(i)}, \rho^{(i)}, V_p^{(i)}) < R_{\text{sec}}(\omega_1^{(i+1)}, \omega_2^{(i+1)}, \rho^{(i+1)}, V_p^{(i+1)}) \quad (22)$$

式(22)表明, 在迭代过程中目标函数始终是非递减的, 因而算法 1 是收敛的.

4.2 参数设置

模拟设置如图 2 所示. 从 CBS 到 STAR-RIS 的路径损耗模型被建模为 Rician 衰落信道^[6,17]:

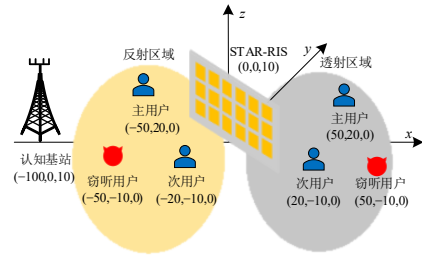


图2 模拟设置

$$\mathbf{G}_{\text{BR}} = \sqrt{\frac{C_0}{d^{a_{\text{BR}}}}} \sqrt{\frac{\kappa_{\text{BR}}}{1 + \kappa_{\text{BR}}}} \mathbf{G}_{\text{BR}}^{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{1 + \kappa_{\text{BR}}}} \mathbf{G}_{\text{BR}}^{\text{MLoS}} \quad (23)$$

除非特别说明, 模拟仿真参数如表 1 所示^[14,17].

表 1 仿真参数设置

参数	值	参数	值
N	2	P_{\max}	30 dBm
M	40	E_{\min}	-40 dBm
σ^2	-110 dBm	Γ_{\max}	-30 dBm
σ_1^2	-110 dBm	$\alpha_{\text{BR}}, \alpha_{\text{RU}}, \alpha_{\text{RE}}$	2.2
C_0	-30 dB	$\kappa_{\text{BR}}, \kappa_{\text{RU}}, \kappa_{\text{RE}}$	3 dB
η	0.7	ε	0.001

4.3 对比设置

为了验证所提算法的有效性, 本文与三种算法进行对比.

(1) 传统 RIS (Conventional RIS, C-RIS): 假设 M 为偶数, 将一个具有 $M/2$ 个元件的仅反射 RIS 和一个具有 $M/2$ 个元件的仅透射 RIS 并列部署在与 STAR-RIS 相同的位置^[3].

(2) 没有 AN 辅助 (W/o AN): 在 CBS 发射波束成形中不引入 AN 辅助安全通信.

(3) 随机相位的 STAR-RIS: STAR-RIS 随机生成符合相移约束的反射和透射相位, 且不进行优化.

5 结果分析

图 3 展示了 SU 保密率与 CBS 最大发射功率 P_{\max} 的关系. 随着 P_{\max} 的增加, 所有方案下的 SU 保密率均有

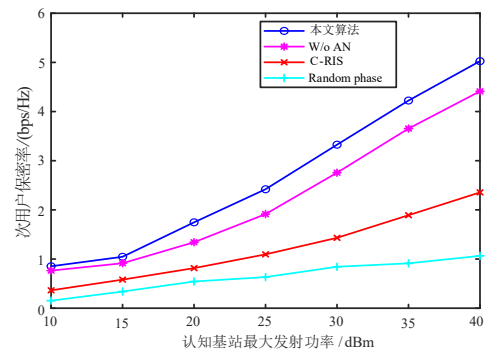


图3 次用户保密率与认知基站最大发射功率的关系

提升. 但本文算法在提升保密率方面优于其他对比算法. 当达到能量收集阈值时, 增加 P_{\max} 可以调配更多的功率用于SU的安全传输. 相较于C-RIS, STAR-RIS可灵活调整反射和透射元件的幅度和相位, 为系统提供更多自由度以增强所需信号的强度.

图4展示了SU保密率与能量收集阈值 E_{\min} 的关系. 随着 E_{\min} 的增加, 保密率呈下降趋势. 这是因为当 E_{\min} 增加时, 所接收的能量需要分配更多去满足能量收集的需求, 从而减少用于信息传输的能量. 因此, 在应用PS架构时需要考虑能量收集阈值的设置以保证信息传输安全.

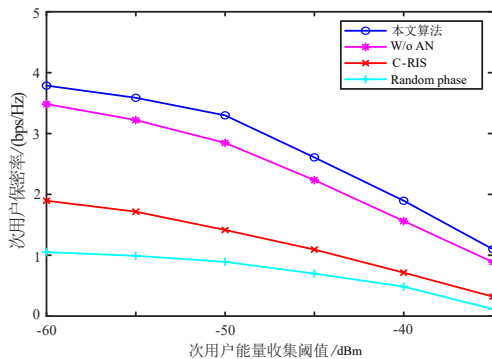


图4 次用户保密率与能量收集阈值的关系

图5展示了SU保密率与PU最大容忍干扰功率 Γ_{\max} 的关系. 随着干扰约束的放宽, 所有方案下的保密率均呈上升趋势. 本文提出的算法性能持续优于对比算法. 然而当 Γ_{\max} 增大到一定数值时, 继续增加 Γ_{\max} 并不会显著提高保密率. 这是因为此时干扰约束已经足够宽松, 不再是限制SU保密率的主要约束.

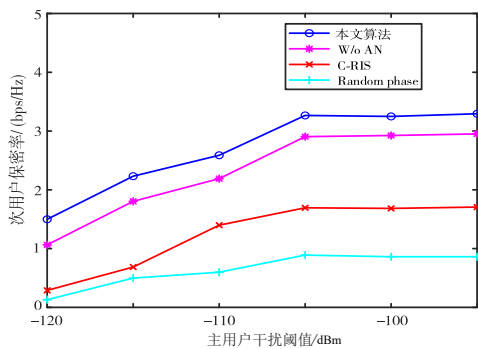


图5 次用户保密率与主用户干扰阈值的关系

为评估人工噪声功率与有用信号功率分配的影响, 将有用信号功率与BS发射总功率比值定义为 χ , 并进行了仿真. 图6为在某一随机信道参数设置下保密率与 χ 的关系. 可以发现本文算法优化结果具有最优的性能. 随着分配比在0.85的基础上增大或者减小, 系

统的保密率均下降, 且与 χ 不成线性关系.

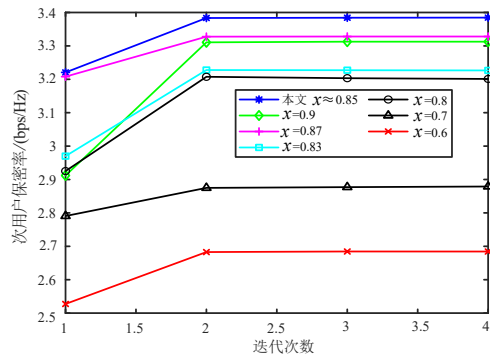


图6 次用户保密率与分配比 χ 的关系

6 结语

为解决通信系统中的安全传输问题, 本文使用STAR-RIS和AN辅助CR-SWIPT系统, 旨在最大化SU的最差保密率. 在考虑CBS最大发射功率约束等情况下, 构建了一个多变量耦合的保密率优化问题. 通过采用SCA, SDR等方法, 联合优化了CBS的发射波束成形矢量、STAR-RIS的相移矩阵和SU的PS系数. 仿真结果表明所提算法可以有效提升STAR-RIS辅助CR-SWIPT系统中SU的保密率.

参考文献

- [1] WANG C, WANG H M. On the secrecy throughput maximization for MISO cognitive radio network in slow fading channels[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2014, 9(11): 1814-1827.
- [2] CHEN P, OUYANG J, ZHU W P, et al. Artificial-noise-aided energy-efficient secure beamforming for multi-eavesdroppers in cognitive radio networks[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3): 3801-3812.
- [3] LIU Y, MU X, XU J, et al. STAR: Simultaneous transmission and reflection for 360° coverage by intelligent surfaces[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(6): 102-109.
- [4] 李国权, 党刚, 林金朝, 等. RIS辅助的MISO系统安全鲁棒波束成形算法[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(8): 2867-2875.
- [5] LI G Q, DANG G, LIN J Z, et al. Secure and robust beamforming algorithm for RIS assisted MISO systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(8): 2867-2875. (in Chinese)
- [6] ZHANG Z, CHEN J, LIU Y, et al. On the secrecy design of STAR-RIS assisted uplink NOMA networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(12):

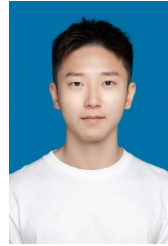
- 11207-11221.
- [6] JIA H, MA L, VALAEE S. STAR-RIS enabled downlink secure NOMA network under imperfect CSI of eavesdroppers[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(3): 802-806.
- [7] LI G, HONG Z, PANG Y, et al. Resource allocation for sum-rate maximization in NOMA-based generalized spatial modulation[J]. Digital Communications and Networks, 2022, 8(6): 1077-1084.
- [8] LI X, GAO X, YANG L, et al. Performance analysis of STAR-RIS-CR-NOMA based consumer IoT networks for resilient industry 5.0[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2023, 70(1): 1380-1391.
- [9] ZHAO M M, XU K, CAI Y, et al. Secrecy rate maximization of RIS-assisted SWIPT systems: A two-timescale beamforming design approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 22(7): 4489-4504.
- [10] LI B, SI F, HAN D, et al. IRS-aided SWIPT systems with power splitting and artificial noise[J]. China Communications, 2022, 19(4): 108-120.
- [11] LI G, ZHANG H, WANG Y, et al. QoS guaranteed power minimization and beamforming for IRS-assisted NOMA systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 12(3): 391-395.
- [12] ZHAO P, ZUO J, WEN C. Power allocation and beamforming vectors optimization in STAR-RIS assisted SWIPT[C]//2022 IEEE 22nd International Conference on Communication Technology (ICCT). Piscataway: IEEE, 2022: 1174-1178.
- [13] DUY V T, KHA H H. Secrecy rate optimization for IRS-aided MIMO cognitive radio systems with SWIPT[C]//2022 IEEE Ninth International Conference on Communications and Electronics (ICCE). Piscataway: IEEE, 2022: 139-144.
- [14] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 1989-2001.
- [15] ALVARADO A, SCUTARI G, PANG J S. A new decomposition method for multiuser DC-programming and its applications[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(11): 2984-2998.
- [16] SIDIROPOULOS N D, DAVIDSON T N, Luo Z Q. Transmit beamforming for physical-layer multicasting[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(6): 2239-2251.

- [17] MU X, LIU Y, GUO L, et al. Simultaneously transmitting and reflecting (STAR) RIS aided wireless communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(5): 3083-3098.

作者简介



李国权 男, 1980年生, 河南方城人. 重庆邮电大学教授、博士生导师. 主要研究方向为无线资源管理、智能反射面优化等.
E-mail: ligq@cqupt.edu.cn



胡航 男, 1997年生, 重庆人. 重庆邮电大学硕士研究生. 主要研究方向为智能反射面优化.
E-mail: s220101047@stu.cqupt.edu.cn