



大规模天线 SWIPT 的安全速率性能分析

鲍慧, 张敏敏, 姚亚青, 王辉
(华北电力大学, 河北 保定 071003)

摘要: 多入单出广播系统中, 现有研究均是在完整信道状态信息下来优化单用户安全速率, 而实际上, 系统中不可能只存在一个用户, 基站往往接收到的也是不完整信道状态信息。针对此问题, 提出了一种顽健性波束成形方案。在多用户情况下, 考虑信道估计误差对系统安全速率的影响, 采用粒子群算法来联合优化发射波束成形矢量、人工噪声协方差和功率分流比, 从而在确保用户收集一定能量的同时最大化安全传输速率。仿真结果表明, 所提方案相对于理想情况下的安全速率略微降低, 但考虑到存在窃听用户和估计误差的情况, 对实际系统具有指导意义。

关键词: SWIPT; 人工噪声; 估计误差; 安全速率; 波束成形

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017210

Performance analysis of secrecy rate for SWIPT in massive antenna

BAO Hui, ZHANG Minmin, YAO Yaqing, WANG Hui
North China Electric Power University, Baoding 071003, China

Abstract: In the multi-drop broadcast system, the existing research is to optimize the single-user security rate in the complete channel state information. In fact, it's impossible that there exists only one user in the system. The base station often receives incomplete channel state information. Aiming at this problem, a robust beamforming scheme was proposed. In the multi-user case, considering the influence of channel estimation error on the system security rate, the particle swarm optimization algorithm was used to optimize the emission beamforming vector, artificial noise covariance and power split ratio to ensure that the user collects a certain energy while maximizing the safe transmission rate. The simulation results show that the proposed scheme is slightly lower than the security rate in the ideal case, but it is meaningful to the actual system, taking into account the existence of eavesdropping users and the estimation error.

Key words: simultaneous wireless information and power transfer, artificial noise, estimation error, safety rate, beamforming

收稿日期: 2017-04-20; 修回日期: 2017-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61501185, No.61302105); 北京市自然科学基金资助项目 (No.4164101); 河北省自然科学基金资助项目 (No.F2016502062)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61501185, No.61302105), Beijing Natural Science Foundation of China (No.4164101), Hebei Provincial Natural Science Foundation of China (No.F2016502062)

1 引言

无线信息和能量同时传输(simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)是通过射频信号同时传输信息和能量^[1]。然而,由于无线信道的开放性,信息有可能遭到拦截或窃听;又由于传输信道存在衰落性,长距离的传输可能会影响能量的收集效率。因此如何在信息传输安全和能量收集效率之间保持平衡是SWIPT面临的挑战。大规模天线波束成形技术因其空间分辨率高而常被用在各种SWIPT场景下来提高无线通信的保密性能,使合法用户收到信号,同时避免窃听用户接收到信号。

目前,关于SWIPT系统安全速率的研究主要体现以下几点。SWIPT系统采用物理层安全理念,在完全信道状态信息(channel state information, CSI)下,针对单用户研究最大化加权和能量收集问题^[2]。然而基站不可能获取完全CSI,且实际服务用户不只一个,为此考虑了信道估计误差,研究了多个用户同时存在情况下的最大化发射功率问题,但并未对安全速率进行分析^[3]。多数关于最大化安全速率问题的研究是在完全信道状态信息下针对单用户进行分析^[4,5]。除此之外,物理层安全技术的应用在其他SWIPT网络中也得到研究,如认知无线网络^[6]、两跳中继网络^[7]、正交频分多址(OFDMA)网络^[8]等。而对于系统安全

速率问题的求解,一维搜索算法^[9]因其搜索范围大、计算复杂度高和收敛速度慢而逐渐被粒子群优化算法所替代,但传统的粒子群优化算法又易陷入局部最优问题^[10]。

针对上述存在的问题,本文在多个用户同时存在的情况下,增加多个被动的窃听用户(其中其他接收用户相对于合法用户来说也是潜在的窃听者),研究了系统的安全性能。为了提高系统的保密性能,引入了人工噪声技术,在大规模天线下分析SWIPT系统的安全速率问题。其次在非完美CSI条件下考虑了信道估计误差,提出了一种顽健性波束成形设计方案。然后采用半正定松弛(semi-definite relaxation, SDR)技术和S程序处理技术将非凸优化问题转换成凸优化问题,并用改进的粒子群优化算法求得最优解。最后仿真验证所提方案的有效性。

2 系统模型

系统模型如图1所示,考虑一个SWIPT系统的下行广播信道,其中基站配置了 N_t 根天线,发射机同时发射 K 个独立的保密信息给 K 个单天线接收用户,同时还存在着 L 个单天线外部窃听用户。除了这些被动窃听用户之外,对于合法用户来说,其他接收用户也是潜在的窃听者。同时,每个用户具有能量捕获的能力,用户采用功率分配器将接收到的信号分成能量捕获(energy harvesting, EH)信号和

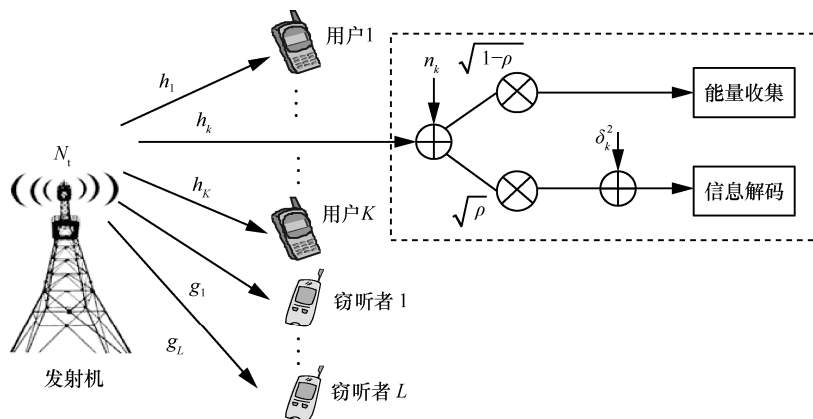


图1 系统模型



信息解码 (information decoding, ID) 信号。功率分配器在信号处理过程中会产生噪声, 且为加性噪声, 并服从 $CN(0, \sigma^2)$, 定义传输信号功率的比率 ρ_k , 且 $0 < \rho_k < 1$; 而传输能量链路的比重是 $0 < 1 - \rho_k < 1$ 。基站到合法用户 k 之间的信道为主信道, 定义 $h_k \in \mathbb{C}^{N_k \times 1}$, 而基站到窃听用户 l 之间的信道为窃听信道, 定义 $g_l \in \mathbb{C}^{N_l \times 1}$ 。假设信道模型为瑞利块衰落模型, 在这种假设条件下, 主信道和窃听信道的信道系数都服从独立同分布的复杂高斯随机分布, 其均值为 0、方差为 1, 且在同一传输块中信道系数为定值, 而不同传输块的信道系数相互独立、大小不一。那么, 第 k 个用户和第 l 个外部窃听者接收到的信号分别为:

$$y_k = h_k x + n_k, \forall k \quad (1)$$

$$y_l^e = g_l x + n_l, \forall l \quad (2)$$

其中, $n_k \sim CN(0, \sigma_k^2)$ 和 $n_l \sim CN(0, \sigma_l^2)$ 都是加性高斯白噪声, 分别代表第 k 个接收用户和第 l 个外部窃听者的天线噪声。

对于信道状态信息的获得, 本文考虑频分双工的情况, 基站可以通过反馈链路从用户处获取信道 h 的 CSI。然而, 由于窃听者是被动的, 基站就不能从窃听者处获取任何信道 g 的 CSI。由于基站在 CSI 获取过程中受到有限资源的限制, 发射机只能通过一个有限训练序列获取主信道的部分 CSI。假设用户在每一块传输的开始完成估计信道状态信息, 然后在相干块传输中将 CSI 反馈给发射机。最后基站根据获取的信道状态信息进行波束成形, 其波束成形矢量为 $w_k \in \mathbb{C}^{N_k \times 1}$ 。假设用户对主信道采用线性 MMSE (minimum mean square error, 最小均方误差) 估计, 由于信道估计会引入误差, 因此, 本文研究了估计误差对系统安全速率的影响:

$$h_k = \bar{h}_k + \tilde{h}_k \quad (3)$$

其中, $\bar{h}_k$ 为估计信道, $\tilde{h}_k$ 为信道估计误差, 且满足 $\|\tilde{h}_k\|_2^2 \leq \zeta_{kb}^2$ 。

基站端发送数据流到合法用户, 而窃听用户也同时接收到信号, 为了迷惑窃听用户, 提高保密性, 基站在发射信号时加入了人工噪声 $V \in \mathbb{C}^{N_k \times 1}$ 。设发送信号矢量为 $x = \sum_{j=1}^K w_j s_j$, 那么合法用户 k 的 ID 端和 EH 端接收到的信号表达式分别为:

$$y_k^{\text{ID}} = \sqrt{\rho_k} [h_k \sum_{j=1}^K w_j s_j + h_k V + \sigma_k^2] + \delta_k^2, \forall k \quad (4)$$

$$y_k^{\text{EH}} = \sqrt{1 - \rho_k} [h_k \sum_{j=1}^K w_j s_j + h_k V + \sigma_k^2], \forall k \quad (5)$$

第 l 个窃听用户接收到的信号为:

$$y_l^e = g_l \sum_{j=1}^K w_j s_j + g_l V + \sigma_l^2, \forall l \quad (6)$$

因此, 基于能量收集模型, 法定用户收集到的能量为:

$$E = \eta_k (1 - \rho_k) (\sum_{j=1}^K |h_k w_j|^2 + \text{Tr}(h_k h_k^H V) + \sigma_k^2) \quad (7)$$

其中, $\eta_k \in (0, 1]$ 为接收用户 k 的能量收集效率。由于信道估计会产生估计误差, 导致信干噪比减小, 进而影响系统的安全速率。于是法定用户 k 在 ID 端接收到的信干噪比以及第 m 个潜在窃听用户和第 l 个外部窃听用户接收的相应信干噪比分别为:

$$\text{SINR}_k = \frac{\rho_k |h_k w_k|^2}{\rho_k (\sum_{j \neq k} |h_k w_j|^2 + \text{Tr}(h_k h_k^H V) + \sigma_k^2) + \delta^2} \quad (8)$$

$$\text{SINR}_{m,p} = \frac{|h_m w_k|^2}{\sum_{j \neq k} |h_m w_j|^2 + \text{Tr}(h_m h_m^H V) + \sigma_m^2}, \forall k, \forall m \quad (9)$$

$$\text{SINR}_{l,e} = \frac{|g_l w_k|^2}{\sum_{j \neq k} |g_l w_j|^2 + \text{Tr}(g_l g_l^H V) + \sigma_l^2}, \forall k, \forall l \quad (10)$$

本文的研究目标是在保证能量收集和发射总功率满足约束条件下最大化系统安全速率, 因此,

安全速率优化问题为:

$$\begin{aligned} & \max_{V, \{w_k\}, \rho_k} \left[\ln(1 + \text{SINR}_k) - \ln(1 + \max_{\forall m, \forall l} \{ \text{SINR}_{m,p}, \text{SINR}_{l,e} \}) \right] \\ \text{s.t. } & \sum_{i=1}^K \|w_k\|^2 + \text{Tr}(V) \leq P_t, \forall k \\ & \eta_k(1 - \rho_k) \sum_{j=1}^K |h_k w_j|^2 + \text{Tr}(h_k h_k^H V) + \sigma_k^2 \geq e_k \\ & \|\tilde{h}_k\|_2^2 \leq \varsigma_{kb}^2, \quad 0 \leq \rho_k \leq 1, \forall k \end{aligned} \quad (11)$$

其中, P_t 为发射机发射的能量阈值, e_k 为 EH 接收机要收集的能量阈值。可以证明总会存在一个 γ_e^k 使得式 (11) 的最优解与式 (12) 等同^[9]。定义 $\hat{U} = \{\hat{V}, \hat{w}_k, \hat{\rho}_k\}$ 作为式 (11) 的最优解集, 同时定义 $\hat{e}_k = \min_{\tilde{h}_k} \eta_k(1 - \hat{\rho}_k) \left(\sum_{j=1}^K |\hat{h}_k \hat{w}_j|^2 + \text{Tr}(h_k h_k^H \hat{V}) + \sigma_k^2 \right)$, 那么当 $e_k = \hat{e}_k, \forall k$ 时, $\hat{U}$ 也是式 (12) 的最优解集。考虑信道估计误差、功率分流比和人工噪声对系统保密性能的影响, 系统的最终优化目标为:

$$\begin{aligned} & \max_{V, \tilde{h}_k, \{w_k\}, \rho_k} \frac{\rho_k |h_k w_k|^2}{\rho_k \left(\sum_{j \neq k} |h_k w_j|^2 + \text{Tr}(h_k h_k^H V) + \sigma_k^2 \right) + \delta^2} \\ \text{s.t. } & \max_{\tilde{h}_k} \frac{|h_m w_k|^2}{\sum_{j \neq k} |h_m w_j|^2 + \text{Tr}(h_m h_m^H V) + \sigma_m^2} \leq \gamma_e^k, \forall k, \forall m \\ & \max \frac{|g_l w_k|^2}{\sum_{j \neq k} |g_l w_j|^2 + \text{Tr}(g_l g_l^H V) + \sigma_l^2} \leq \gamma_e^k, \forall k, \forall l \\ & \max \sum_{i=1}^K \|w_k\|^2 + \text{Tr}(V) \leq P_t, \forall k \\ & \min_{\tilde{h}_k} \eta_k(1 - \rho_k) \left(\sum_{j=1}^K |h_k w_j|^2 + \text{Tr}(h_k h_k^H V) + \sigma_k^2 \right) \geq e_k, \forall k \\ & \|\tilde{h}_k\|_2^2 \leq \varsigma_{kb}^2, \quad 0 \leq \rho_k \leq 1, \forall k \end{aligned} \quad (12)$$

3 最大化安全速率性能分析

由于式 (12) 为一个非凸优化问题且很难进行求解, 因此, 本文通过 SDR 技术和 S 程序处理技术将非凸优化问题转化为凸优化问题, 进而采用粒子群算法求解, 获得最优解集。首先按照分式规划求解方案对式 (12) 进行变形, 将分式规

划问题转化成一个可行性问题进行求解。

$$\begin{aligned} & \max_{V, \tilde{h}_k, \{w_k\}, \rho_k} 0 \\ \text{s.t. } & \min_{\tilde{h}_m} |h_k w_k|^2 - t \left[\sum_{j \neq k} |h_k w_j|^2 + \text{Tr}(h_k h_k^H V) + \sigma_k^2 + \frac{\delta^2}{\rho_k} \right] \geq 0 \\ & \max_{\tilde{h}_k} \frac{|h_m w_k|^2}{\sum_{j \neq k} |h_m w_j|^2 + \text{Tr}(h_m h_m^H V) + \sigma_m^2} \leq \gamma_e^k, \forall k, \forall m \\ & \max \frac{|g_l w_k|^2}{\sum_{j \neq k} |g_l w_j|^2 + \text{Tr}(g_l g_l^H V) + \sigma_l^2} \leq \gamma_e^k, \forall k, \forall l \\ & \max \sum_{i=1}^K \|w_k\|^2 + \text{Tr}(V) \leq P_t, \forall k \\ & \min_{\tilde{h}_k} \eta_k(1 - \rho_k) \left(\sum_{j=1}^K |h_k w_j|^2 + \text{Tr}(h_k h_k^H V) + \sigma_k^2 \right) \geq e_k, \forall k \\ & \|\tilde{h}_k\|_2^2 \leq \varsigma_{kb}^2, \quad 0 \leq \rho_k \leq 1, \forall k \end{aligned} \quad (13)$$

存在一个最小的 t 值使得式 (12) 的最优解与式 (13) 相等^[9]。对于安全速率在不完整 CSI 下的最大化问题, 本文采用 SDR 技术和 S 程序处理技术对式 (13) 进行处理, 将其转为凸优化问题进行求解。对式 (13) 中的第一个约束条件进行处理, 第一个条件可以表示为:

$$\begin{aligned} & |(\bar{h}_k + \tilde{h}_k) w_k|^2 - t \left[\sum_{j \neq k} |(\bar{h}_k + \tilde{h}_k) w_j|^2 + \right. \\ & \left. \text{Tr}((\bar{h}_k + \tilde{h}_k)(\bar{h}_k + \tilde{h}_k)^H V) + \sigma_k^2 + \frac{\delta^2}{\rho_k} \right] \geq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

定义 $S = w_k w_k^H$, $Q = \sum_{j=1, j \neq k}^K w_j w_j^H$, $D_k = S - tQ - tV$, 因此式 (14) 可以写为:

$$(\bar{h}_k + \tilde{h}_k) D_k (\bar{h}_k + \tilde{h}_k)^H - t \sigma_k^2 - t \frac{\delta^2}{\rho_k} \geq 0 \quad (15)$$

展开式 (15) 就得到式 (16):

$$\tilde{h}_k D_k \tilde{h}_k^H + 2 \text{Re} \{ \bar{h}_k D_k \tilde{h}_k^H \} + \bar{h}_k D_k \bar{h}_k^H - t \sigma_k^2 - t \frac{\delta^2}{\rho_k} \geq 0 \quad (16)$$

又由于要满足式 (13) 的要求:

$$\tilde{h}_k \tilde{h}_k^H - \varsigma_{kb}^2 \leq 0 \quad (17)$$

采用 S 程序处理技术^[10], 当且仅当存在一个



$\mathcal{G}_k \geq 0$ 使得 $\tilde{h}_k$ 同时满足式 (16) 和式 (17) :

$$\begin{bmatrix} -D_k & -D_k \bar{h}_k^H \\ -\bar{h}_k^H D_k & -\bar{h}_k^H D_k \bar{h}_k^H + t\sigma_k^2 + \frac{t\delta^2}{\rho_k} \end{bmatrix} \leq \mathcal{G}_k \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & -\zeta_{kb}^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

第 1 个约束条件转化为式 (19) :

$$\begin{bmatrix} \mathcal{G}_k I + D_k & D_k \bar{h}_k^H \\ \bar{h}_k^H D_k & \bar{h}_k^H D_k \bar{h}_k^H - t\sigma_k^2 - \frac{t\delta^2}{\rho_k} - \mathcal{G}_k \zeta_{kb}^2 \end{bmatrix} \geq 0 \quad (19)$$

以此类推, 对问题 (13) 的其他约束条件进行处理, 其结果依次是:

$$\begin{bmatrix} \mu_k^m I - A_k & -A_k \bar{h}_m^H \\ -\bar{h}_m^H A_k & \gamma_e^k \sigma_m^2 - \bar{h}_m^H A_k \bar{h}_m^H - \mu_k^m \zeta_{kb}^2 \end{bmatrix} \geq 0 \quad (20)$$

$$\gamma_e^k [Tr(G_l Q) + Tr(G_l V)] + \gamma_e^k \sigma_l^2 - Tr(G_l S) \geq 0 \quad (21)$$

$$P_l - [Tr(S) + Tr(Q) + Tr(V)] \geq 0 \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \chi_k I + B_k & B_k \bar{h}_k^H \\ \bar{h}_k^H B_k & \bar{h}_k^H B_k \bar{h}_k^H + \sigma_k^2 - \frac{e_k}{\eta_k(1-\rho_k)} - \chi_k \zeta_{kb}^2 \end{bmatrix} \geq 0 \quad (23)$$

其中, $A_k = S - \gamma_e^k Q - \gamma_e^k V$, $B_k = S + Q + V$; 而 $\mathcal{G}_k \geq 0$, $\mu_k^m \geq 0$, $\chi_k \geq 0$ 均为松弛变量。按照式 (19)~式 (23) 的变形, 问题 (13) 在忽略 $Rank(S)=1$ 这一条件之后得到问题 (24) :

$$\begin{aligned} & \max_{V, \{w_k\}, \rho_k} 0 \\ & \text{s.t.} \quad (19), (20), (21), (22), (23) \\ & \quad V \geq 0, 0 \leq \rho_k \leq 1, \forall k \end{aligned} \quad (24)$$

由于问题 (24) 的所有约束条件为矩阵范数和矩阵迹的和的形式且都是凸的, $\frac{1}{\rho_k}$ 和 $\frac{1}{1-\rho_k}$ 也均为关于 ρ_k 的凸函数, 此外最优解 S 的秩等于 1, 因此它就是一个可行性凸优化问题。对问题 (24) 的求解, 本文采用一种基于粒子群的低复杂度启发式算法获取最优解 $\hat{U} = \{\hat{V}, \hat{w}_k, \hat{\rho}_k\}$ 。问题 (12)

的最优解等同:

$$\max_{(e_1 \cdots e_K) \in \{C_1 \times \cdots \times C_K\}} \phi(e_1 \cdots e_K) \quad (25)$$

其中, C_k 代表对应 $e_k, \forall k$ 的指定搜索范围。

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法首先要从 C_k 中随机产生一群粒子 $\{e_i^{(n)}\}_{i=1}^M$,

M 为粒子群大小, n 为迭代次数。然后计算出可以解决问题 (24) 的每个粒子 $e_i^{(n)}$ 中合适的值。在迭代中找到所有粒子群中最合适的值, 定义为 $Ze^{(n)}$ 。进而, 每个粒子 $e_i^{(n)}$ 都会记录之前获得最优性能的位置, 定义为 $Pe_i^{(n)}$, 最后算法在每次迭代中更新第 i 个粒子的速度和位置, 发现这两个最优值:

$$F_i^{(n+1)} = \omega(n)F_i^{(n)} + a_1\varphi_1(Pe_i^{(n)} - e_i^{(n)}) + a_2\varphi_2(Ze_i^{(n)} - e_i^{(n)}) \quad (26)$$

$$e_i^{(n+1)} = e_i^{(n)} + F_i^{(n+1)} \quad (27)$$

其中, ω 为惯性因子, a_1 和 a_2 为两个定值加速度, φ_1 和 φ_2 为均匀分布 $[0,1]$ 中的随机数, J 为最大迭代次数。惯性因子 ω 表明粒子原先的速度能在多大程度上得到保留, 体现了局部搜索能力和全局搜索能力的比例关系。较大的 ω 可以增强 PSO 算法的全局搜索能力, 而较小的 ω 能加强 PSO 算法的局部搜索能力。随着迭代次数的增加, 惯性因子 ω 应不断减小。因此, 不同于以往固定的惯性因子, 本文采用了线性自适应惯性因子:

$$\omega(n) = \frac{J-n}{J}(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \quad (28)$$

当迭代次数达到最大或满足最终标准时, 计算过程结束, 得到问题 (25) 的最优解 $\hat{e}_k$, 一旦得到这个最优的 $\hat{e}_k$ 值, 当 $e_k = \hat{e}_k$ 时就得到了问题 (12) 的最优解 $\hat{U} = \{\hat{V}, \hat{w}_k, \hat{\rho}_k\}$ 。

算法 1 针对问题 (25) 的粒子群算法

初始化: $n=0$, J , $\{e_i^{(0)}\}_{i=1}^M$, $\{F_i^{(0)}\}_{i=1}^M$, ω ,

a_1 , a_2

while ($n \leq J$ or $e_i^{(n+1)} - e_i^{(n)} > o$) do

for $i=1:M$ do

```

if 对于给定的  $e_i^{(n)}$  问题 (24) 可行
     $P_i^{(n)}$  = 问题(24)的最优值
else
     $P_i^{(n)}$  = 一个足够大的数(1, ..., 1 000)
end
end for
发现  $(\phi_i, \phi_n) = \arg \max_{\forall i, n} P_i^{(n)}$ , 设定  $Ze^{(n)} = e_{\phi_i}^{(\phi_n)}$ 
发现  $p_i^n = \arg \max_{\forall n} P_i^{(n)}$ , 设定  $Pe_i^{(n)} = e_i^{(p_i^n)}$ 
按照式 (26) ~ 式 (28) 更新  $e_i^{(n)}$ 
 $n = n + 1$ 
end while
输出:  $e_{\phi_i}^{(\phi_n)}$ ,  $P_{\phi_i}^{(\phi_n)}$ 

```

4 仿真分析

考虑一个 SWIPT 系统网络, 其由一个基站、 K 个接收用户、 L 个被动窃听用户组成, 其中, 相对于合法接收用户来讲, 其他的接收用户也是潜在的窃听者。在存在信道估计误差的情况下, 研究所提安全通信方案的性能。通过 MATLAB 搭建 SWIPT 系统仿真环境, 其主要仿真参数设置见表 1。

表 1 仿真参数

参数	参数描述	参数设置
σ_k^2 /dB	第 k 个用户接收的天线噪声	-50
σ_l^2 /dB	第 l 个窃听者接收的天线噪声	-50
δ^2 /dB	信号处理过程导致的噪声	-70
η_k	能量收集效率	0.8
K	接收用户数	3
L	窃听用户数	2
J	最大迭代次数	1 000
e_k	能量收集阈值	未确定
ρ_k	功率分流比	未确定
P_t	总发射功率阈值	未确定
ζ_{kb}^2	信道估计误差	未确定

4.1 人工噪声对保密速率的影响

当 $e_k = -30$ dBm 时, 图 2 为系统保密速率随

总发射功率的趋势变化, 分别研究不同发射天线数在有人工噪声情况下, 系统保密速率的变化趋势。

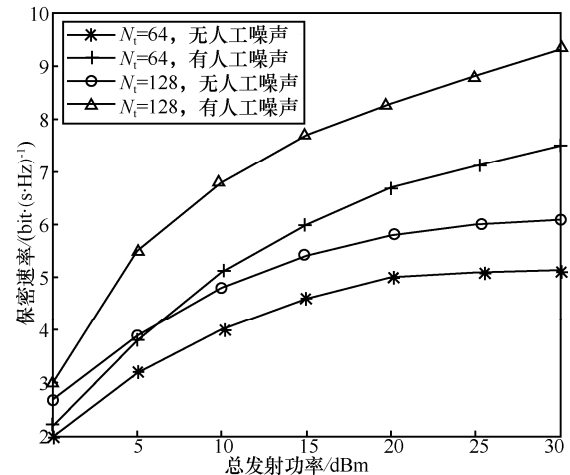


图 2 人工噪声对保密速率的影响

由图 2 可以看出, 在相同发射天线数下, 随着总发射功率的增加, 有人工噪声与无人工噪声情况下保密速率之间的差距加大。发射天线数越多, 系统的保密速率越高。对比无人工噪声情况, 随着总发射功率的增加, 保密速率呈现先增加后稳定的趋势; 而有人工噪声情况下, 保密速率随总发射功率的增加而提高。这表明, 大规模天线有利于提高系统的保密速率, 人工噪声也会对保密速率产生更加积极的影响。

4.2 信号功率分流比对保密速率的影响

在引入人工噪声后, 系统安全传输速率得到初步的改善。为了进一步提高通信服务质量, 如何选择功率分流器的分流比成为研究的重点。如图 3 所示, 基站发射天线为 128 时, 信号功率分流比对系统保密速率的影响。对比了完美 CSIT (channel state information at the transmitter, 发射端信道状态信息) 条件、平均功率分流比和优化的功率分流比 3 种情况下保密速率的性能, 其中, $\rho_k = 0.5$ 情况下, 系统的可达保密速率较低; 优化功率分流比情况下, 通信保密速率更接近于完美 CSIT 条件下的保密速率。

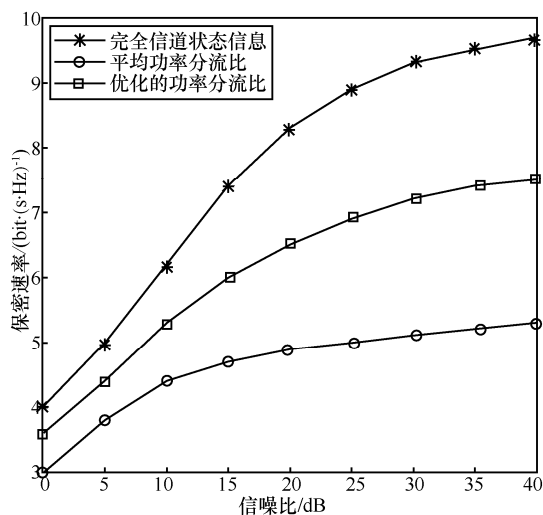


图3 信号功率分流比对保密速率的影响

4.3 信道估计误差对保密速率的影响

设定 $P_t = 25$ dBm, 发射天线数为 128, 系统可达保密速率随用户收集能量的变化关系如图 4 所示, 同时对比了在不同估计误差情况下保密速率的性能。观察图 4 可知, 随着用户收集能量的增加, 可达保密安全传输速率随之降低, 因此需要在保密速率与收集能量之间找到一个平衡点, 实现双赢。同时, 随着估计误差的增加, 系统保密速率也在减小, 这表明, 信道估计误差会对系统的安全产生一定的影响。

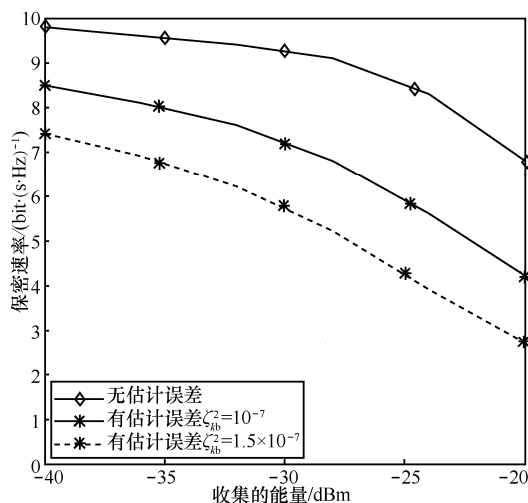


图4 信道估计误差对保密速率的影响

最后, 由于人工噪声、功率分配器的分流比和信道估计误差对 SWIPT 系统的保密速率有不同

程度的影响, 因此设定发射天线数为 128、信道估计误差 $\zeta_{kb}^2 = 10^{-7}$ 、功率分流比为最优解, 设计的顽健性波束成形方案仿真结果如图 5 所示。可以看出, 系统安全速率随发射功率的增加而增加, 本文所提的方案与完全信道状态信息下的保密速率非常接近。此外, 顽健性设计方案的保密速率性能要优于非顽健设计方案, 人工噪声协助设计方案比无人工噪声协助设计的保密速率更好。

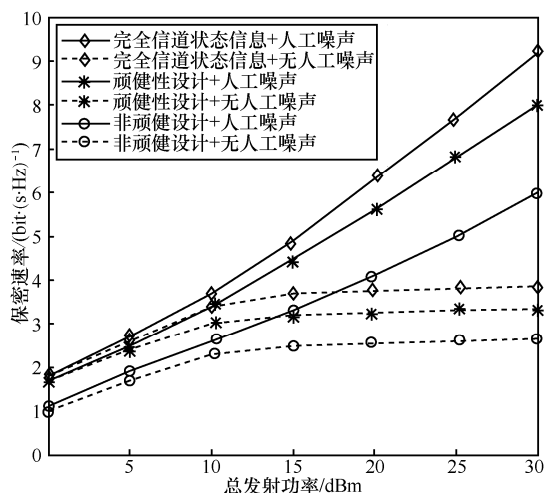


图5 顽健性波束成形方案对保密速率的影响

5 结束语

在不完美信道状态信息情况下, 本文为 SWIPT 系统设计了一种顽健性波束成形方案。该方案在满足能量收集和发射总功率的约束条件下实现了最大化保密信息传输速率。通过在基站加入人工噪声, 提高了系统的保密性。此外, 研究了存在多个窃听用户和合法用户的情况下, 信道估计误差对系统安全的影响, 对实际系统具有指导意义。本文研究的是 MISO 广播网络中的系统保密性, 该模型分析较方便, 但在未来的工作中, 可以研究更加复杂的 MIMO 网络模型, 考虑估计误差和量化误差同时对系统保密性的影响。

参考文献:

- [1] CHEN X, NG D W K, CHEN H H. Secrecy wireless informa-

- tion and power transfer: challenges and opportunities[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(2): 54-61.
- [2] LIU L. Secrecy wireless information and power transfer with MISO beamforming[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(7): 1850-1863.
- [3] ZHANG H, HUANG Y, LI C, et al. Secure beamforming design for SWIPT in MISO broadcast channel with confidential messages and external eavesdroppers[C]//Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Sept 6-9, 2015, Boston, MA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015.
- [4] SHI Q, XU W, WU J, et al. Secure beamforming for MIMO broadcasting with wireless information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(5): 2841-2853.
- [5] FENG R, LI Q, ZHANG Q, et al. Robust secure transmission in MISO simultaneous wireless information and power transfer system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(1): 400-405.
- [6] FANG B, QIAN Z, ZHONG W, et al. An-aided secrecy precoding for SWIPT in cognitive MIMO broadcast channels[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(9): 1632-1635.
- [7] LI Q, ZHANG Q, QIN J. Secure relay beamforming for simultaneous wireless information and power transfer in nonregenerative relay networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(5): 2462-2467.
- [8] HUANG X, LI Q, ZHANG Q, et al. Power allocation for secure OFDMA systems with wireless information and power transfer[J]. Electronics Letters, 2014, 50(3): 229-230.
- [9] 喻晓春. 无线携能通信系统中基于节能和信息安全的资源分配算法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2015.
YU X C. Research on resource allocation algorithm based on energy saving and information security in wireless portable communication system[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [10] LI Q, MA W K. Optimal and robust transmit designs for MISO channel secrecy by semidefinite programming[J].

IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 59(8): 3799-3812.

[作者简介]



鲍慧 (1962-), 女, 华北电力大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线通信、宽带网络。



张敏敏 (1989-), 女, 华北电力大学硕士生, 主要研究方向为无线通信、SWIPT、大规模天线。



姚亚青 (1992-), 女, 华北电力大学硕士生, 主要研究方向为无线通信、大规模天线。



王辉 (1991-), 女, 华北电力大学硕士生, 主要研究方向为无线通信、大规模天线。