

能量收集型高斯窃听信道安全速率的优化

谢显中* 张秀娟 雷维嘉
(重庆邮电大学个人通信研究所 重庆 400065)

摘要: 针对无线网络存在安全威胁和能量受限的问题, 该文研究了基于 ST(Save-then-Transmit)协议的能量收集型高斯窃听信道的安全通信。首先, 对系统安全速率最大化进行研究; 其次, 为进一步提高系统安全速率, 给出了协作抗干扰方案, 并讨论了该方案提高安全速率的充分必要条件, 且提出了该方案下安全速率的迭代优化算法; 最后, 给出了一种复杂度低的单辅助端的选择方案。仿真结果表明, 第 1 种优化方案明显提高了系统的安全速率; 第 2 种协作抗干扰方案可进一步提高系统的安全速率且收敛速度较快; 当原能量收集型高斯窃听信道不能进行安全通信时, 协作抗干扰方案可在一定条件下实现安全传输。

关键词: 无线通信; 高斯窃听信道; 安全速率; 协作抗干扰; ST(Save-then-Transmit)协议; 能量收集

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)11-2678-07

DOI: 10.11999/JEIT150227

Optimization of Secrecy Rate for Energy Harvesting Gaussian Wiretap Channel

Xie Xian-zhong Zhang Xiu-juan Lei Wei-jia

(Institute of Personal Communications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: To solve the problems of security threats and energy constrained in wireless networks, this paper studies secure communication of energy harvesting Gaussian wiretap channel based on Save-then-Transmit (ST) protocol. Firstly, the optimization of the system secrecy rate is studied. Next, to further improve the system secrecy rate, a Cooperative Jamming (CJ) scheme is given. Besides, the sufficient and necessary conditions for this scheme to achieve a higher secrecy rate are discussed. Then, an iterative optimization algorithm of the secrecy rate in this scheme is proposed. Finally, a low complexity selection scheme for single helper is given. Simulation results show that, the first optimization scheme obviously improves the system secrecy rate. The second cooperative jamming scheme can further enhance the system secrecy rate and has fast convergence rate. When the original energy harvesting Gaussian wiretap channel can not operate secure communication, the cooperative jamming scheme can achieve secure transmission under certain conditions.

Key words: Wireless communication; Gaussian wiretap channel; Secrecy rate; Cooperative Jamming (CJ); Save-then-Transmit (ST) protocol; Energy harvesting

1 引言

由于无线传输的广播特性, 无线通信存在被窃听的威胁。随着计算机处理能力的增强, 传统的高层加密方式无法保证无线通信的安全性, 因此, 物理层安全作为安全通信的补充方案应运而生。文献[1]分析并总结了现有的物理层安全方法, 包括基于

信息论的理论分析法、信道方法(例如射频指纹、MIMO 传输系数随机化等)、编码方法、功率分配法以及信号检测法。

物理层安全中高斯窃听信道是一个典型模型, 而安全容量或安全自由度是其重要的性能指标。文献[2-5]研究了单天线配置下系统的安全容量或安全自由度。文献[2]首次提出并研究了窃听信道, 并给出了安全容量的定义。文献[3]通过引入结构化的干扰信号, 并利用干扰对齐技术, 得到了存在辅助端的条件下高斯窃听信道的安全自由度。文献[4]进一步讨论了窃听信道的信道状态信息未知的情况, 并证明了该情况下文献[3]中的结论仍然成立。文献[5]研究中继辅助下高斯窃听信道的安全容量。文献[6-10]讨论了 MIMO 高斯窃听信道的安全容量。文献[6]利用信道增强理论, 证明了系统的安全容量。文献[7]利用最小均方误差与信息熵的关系, 得到了存在多个接收端的情况下系统的安全容量。文献[8]

收稿日期: 2015-02-09; 改回日期: 2015-06-03; 网络出版: 2015-07-17

*通信作者: 谢显中 xiexzh@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61271259, 61301123); 重庆市自然科学基金(CTSC2011JJA40006); 重庆市教委科学技术研究(KJ120501, KJ120502, KJ130535); 重庆市科委重点实验室专项经费; 长江学者和创新团队发展计划(IRT1299)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61271259, 61301123); The Chongqing Natural Science Foundation (CTSC2011JJA40006); The Research Project of Chongqing Education Commission (KJ120501, KJ120502, KJ130535); The Special Fund of Chongqing Key Laboratory (CSTC); The Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT1299)

提出了基于最小均方误差的传输方案，并得到了系统的安全容量。文献[9]分析了基于广义奇异值分解的波束赋形方案，并以系统的安全容量为目标函数对发送功率进行分配。文献[10]讨论了存在多个窃听端的情况，并对发送协方差矩阵进行优化以提高系统的安全容量。

然而，文献[1~10]没有考虑发送端的能源供给问题，也没有重视能量效率。但是，在无线传感网络等电能受限的系统中，为了延长电池的寿命，最近已开始采用能量收集型的设备，此时能量效率成为其重要的性能指标。不同于传统的电池供电系统，能量收集型的无线网络可以从周围的无线环境中收集能量，并成为近来的一个研究热点。

文献[11]介绍了无线环境中可收集的能量，包括太阳能、风能、机械能、射频能量等，并分析了一些能量收集型无线通信系统的性能。文献[12]介绍了无线射频能量收集的原则和要求，分析了影响系统性能的因素及相应的优化方案，从而证明了射频能量收集技术是一种有效的能量自供给技术。文献[13]对射频能量收集技术进行了更深入的分析，并分析了采用该技术的能量收集型无线通信系统的性能。鉴于全双工方式对发射机的复杂性要求较高，且收集能量的不可靠性将会导致较高的传输中断，文献[14]假设发射端工作在半双工模式下，即能量收集和传输是交错进行，并给出了一种 ST(Save-then-Transmit)协议，即在每个时隙内，一段时间用于能量收集，另一段时间进行数据传输，且研究了系统性能的优化。

但是，文献[11~14]没有考虑系统的安全性，而实际中无线通信系统容易受到安全威胁。

为同时考虑无线系统的安全性和能量有限性，本文研究基于 ST 协议的能量收集型高斯窃听信道的安全传输问题。首先，分析了系统安全速率的最大化问题；其次，为了进一步提高系统的安全速率，给出了协作抗干扰方案，并讨论了该方案提高安全速率的充分必要条件，且提出了以安全速率为目标函数的迭代优化算法；最后，提出了一种复杂度低的单辅助端的选择方案。仿真结果表明，原能量收集型高斯窃听信道下的优化算法明显优于半能量吸收比算法；协作抗干扰方案下的迭代优化算法可以进一步提高系统的安全速率且收敛速度较快，并且当原能量收集型高斯窃听信道无法进行安全通信时，协作抗干扰方案可在一定条件下保证系统的安全传输。

2 系统模型

能量收集型高斯窃听信道的系统模型如图 1 所示，假设所有节点均配备单根天线。在图 1 中， W

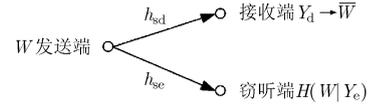


图 1 能量收集型高斯窃听信道的系统模型

表示发送端发送给接收端的机密消息， \bar{W} 表示接收端对消息的估计， $H(W|Y_e)$ 表示已知接收信号 Y_e 的条件下窃听端到对消息的不确定度。假设发送端为能量收集型的发射机，并采用图 2 所示的 ST 协议^[14]进行安全通信。

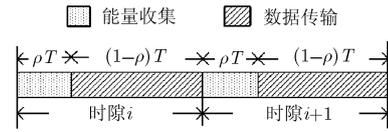


图 2 ST 协议模型

按照 ST 协议，在每个时隙 T 内，一部分的时间(假设其所占比例为 ρ ($0 < \rho < 1$))，并简称“能量吸收比”)用来吸收周围无线环境中的能量，而剩下的时间则用来进行数据传输，具体包含下面两个阶段：

能量收集：在 $(0, \rho T]$ 的时间段内，能量收集器从周围的无线环境中吸收能量并将其存储到存储设备中，此时发送设备停止工作；

数据传输：在 $(\rho T, T]$ 的时间段内，能量收集设备停止工作，传输设备利用存储的能量进行数据传输。

假设发送端工作在饱和模式下，即发送端在数据传输阶段将存储的能量全部耗尽。因此，在每个时隙的初始阶段，能量存储设备中的能量为零。记发送端的能量吸收速率为 v_s (J/s)，且满足最大能量吸收速率的限制，即 $0 \leq v_s \leq v_{s,max}$ 。假设传输设备采用平均功率供给，则发送端在数据传输阶段的平均功率为

$$P_s = \frac{v_s \rho T}{(1 - \rho) T} = \frac{v_s \rho}{1 - \rho} \quad (1)$$

3 系统的安全速率及优化

假设发送端已知所有的信道状态信息。由图 1 可知，在每个时隙内，接收端或窃听端的接收信号为

$$Y_j = h_{sj} X_s + n_j, \quad j=(d, e) \quad (2)$$

式中， X_s 为发送端发送的信号，且满足平均功率限制，即 $E[X_s^2] \leq P_s$ 。 n_j 为接收端或窃听端处的高斯白噪声，且服从零均值单位方差的复高斯分布，即 $n_j \sim CN(0,1)$ 。 h_{sd} 和 h_{se} 分别为主信道和窃听信道的信道系数。

为简化表述, 令 $\gamma_{sd} = |h_{sd}|^2$, $\gamma_{se} = |h_{se}|^2$, $\gamma_s = \gamma_{sd} / \gamma_{se}$ 及 $x = v_s \gamma_{sd}$, 则 γ_{sd} 和 γ_{se} 分别为主信道和窃听信道的信道增益, γ_s 为发送端的相对信道增益, x 为发送端的等价能量吸收速率。由文献[2]可得, 系统的安全速率为

$$R_s^{\text{GWT}} = \left[(1-\rho) \left(\log_2 \frac{(1-\rho) + \rho x}{(1-\rho) + \rho \gamma_s x} \right) \right]^+ \quad (3)$$

式中, $[a]^+$ 表示 $\max(0, a)$ 。

由式(3)可知, 安全速率大于零的充分必要条件为 $\gamma_s < 1$ 。而当 $\gamma_s > 1$ 时, 将系统的安全速率设置为零, 此时发送端不宜进行安全传输。

接下来, 我们对系统的安全速率进行优化。假设 $\gamma_s < 1$, 则安全速率最大化可表示为

$$\left. \begin{aligned} \max_{x, \rho} R_s^{\text{GWT}} &= (1-\rho) \left(\log_2 \frac{(1-\rho) + \rho x}{(1-\rho) + \rho \gamma_s x} \right) \\ \text{s.t. } 0 &\leq x \leq x_{\max}, 0 < \rho < 1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $x_{\max} = v_{s\max} \gamma_{sd}$ 为发送端的最大等价能量吸收速率。

首先, 讨论安全速率随发送端等价能量吸收速率 x 的变化情况。将式(4)对 x 求导可得

$$\frac{\partial R_s^{\text{GWT}}}{\partial x} = \frac{\rho(1-\rho)^2(1-\gamma_s)}{(\ln 2)((1-\rho) + \rho x)((1-\rho) + \rho \gamma_s x)} \quad (5)$$

由式(5)可知, 当 $\gamma_s < 1$ 时, 对于任意的 $0 < \rho < 1$, 安全速率 R_s^{GWT} 是关于 x 的单调增函数。因此, 发送端最优的等价能量吸收速率为 $x^{\text{GWT}} = x_{\max}$ 。

其次, 讨论最优的能量吸收比。将式(4)中的目标函数对能量吸收比 ρ 求导, 可得其二阶导数为

$$\frac{\partial^2 R_s^{\text{GWT}}}{\partial \rho^2} = \frac{x(\gamma_s - 1)(x(1-\rho)(1+\gamma_s) + 2\rho\gamma_s x^2)}{(\ln 2)((1-\rho) + \rho x)^2((1-\rho) + \rho\gamma_s x)^2} \quad (6)$$

则当 $\gamma_s < 1$ 时, 对任意的 $x > 0$, 均有 $\partial^2 R_s^{\text{GWT}} / \partial \rho^2 < 0$, 即目标函数 R_s^{GWT} 是关于 ρ 的凸函数。因此, 将 $x^{\text{GWT}} = x_{\max}$ 代入式(4), 通过凸优化算法可得最优的能量吸收比 ρ^{GWT} 。

4 协作抗干扰方案及迭代优化算法

为了进一步提高系统的安全速率, 本小节给出协作抗干扰方案。该方案通过引入一个仅发送伪噪声的辅助端来进一步削弱窃听端的窃听能力, 其系统模型如图 3 所示。假设发送端和辅助端已知所有的信道状态信息; 辅助端也为能量收集型的发射机, 并采用图 2 所示的 ST 协议进行协作传输, 其能量吸收速率为 v_h (J/s), 且满足 $0 \leq v_h \leq v_{h\max}$ 。假设传输设备采用平均功率供给, 则辅助端在数据传输阶段的平均功率为 $P_h = (v_h \rho) / (1-\rho)$ 。

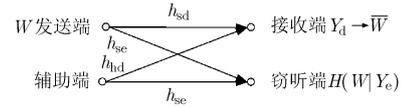


图 3 存在辅助端的能量收集型高斯窃听信道的系统模型

由图 3 可知, 在每个时隙内, 接收端或窃听端的接收信号为

$$Y_j = h_{sj} X_s + h_{hj} X_h + n_j, \quad j = (d, e) \quad (7)$$

式中, X_h 为辅助端发送的伪噪声, 且满足平均功率限制, 即 $E[X_h^2] \leq P_h$ 。 h_{hd} 和 h_{he} 分别为辅助端到接收端和窃听端的信道系数。其它变量如第 2 节和第 3 节所示。

为便于分析, 令 $\gamma_{hd} = |h_{hd}|^2$, $\gamma_{he} = |h_{he}|^2$, $\gamma_h = \gamma_{he} / \gamma_{hd}$ 及 $y = v_h \gamma_{hd}$ 。 γ_{hd} 和 γ_{he} 分别表示辅助端到接收端和窃听端的信道增益, γ_h 为辅助端的相对信道增益, y 为辅助端的等价能量吸收速率。由文献[2]可得, 协作抗干扰方案下系统的安全速率为

$$\left. \begin{aligned} R_s^{\text{CJ}} &= (1-\rho) \log_2 \left(1 + \frac{x\rho}{y\rho + (1-\rho)} \right) \\ &\quad - (1-\rho) \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_s x\rho}{\gamma_h y\rho + (1-\rho)} \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

下面给出协作抗干扰方案可进一步提高系统安全速率的充要条件。

定理 1 当且仅当下面的式(9)或式(10)成立时, 有 $R_s^{\text{CJ}} \geq R_s^{\text{GWT}}$, 即

$$\left. \begin{aligned} \gamma_s < 1 \leq \gamma_h \\ \text{s.t. } (\gamma_h \gamma_s - 1)(1-\rho) + \gamma_s(\gamma_h - 1)x\rho \\ \geq \gamma_h(1-\gamma_s)y\rho \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} 1 \leq \gamma_s < \gamma_h \\ \text{s.t. } y\rho(\gamma_h - \gamma_s) \geq (\gamma_s - 1)(1-\rho) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由定理 1 可知, $\gamma_h \geq \max(1, \gamma_s)$ 是 $R_s^{\text{CJ}} \geq R_s^{\text{GWT}}$ 的必要条件。

接下来, 讨论安全速率 R_s^{CJ} 的优化问题。由式(8)可知, 对于给定的相对信道增益 γ_h 和 γ_s , 安全速率 R_s^{CJ} 的最大化问题可表示为

$$\left. \begin{aligned} \max_{x, y, \rho} R_s^{\text{CJ}} \\ \text{s.t. } 0 < \rho < 1, 0 \leq x \leq x_{\max}, 0 \leq y \leq y_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中, $y_{\max} = v_{h\max} \gamma_{hd}$ 为辅助端的最大等价能量吸收速率。

首先, 分析最优的发送端等价能量吸收速率 x 。将式(11)中的目标函数 R_s^{CJ} 对 x 求导可得

$$\frac{\partial R_s^{CJ}}{\partial x} = \frac{\rho(1-\rho)((1-\rho)(1-\gamma_s) + y\rho(\gamma_h - \gamma_s))}{(\ln 2)((1-\rho) + (x+y)\rho)((1-\rho) + (x\gamma_s + y\gamma_h)\rho)} \quad (12)$$

结合式(9)和式(10)可知，当协作抗干扰方案有效时，有 $\partial R_s^{CJ}/\partial x > 0$ ，即 R_s^{CJ} 是关于 x 的单调增函数，因此，最优的发送端等价能量吸收速率为 $x^{CJ} = x_{\max}$ 。然而，对于辅助端的等价能量吸收速率 y 和能量吸收比 ρ ，难以得到其全局最优的闭式解。虽然其最优值可以通过穷尽搜索得到，但是计算量太大。因此，为了减小算法复杂度，本小节采用迭代算法求次优的 y 和 ρ ，并分别记为 y^{CJ} 和 ρ^{CJ} 。

接下来，先固定能量吸收比 ρ ，优化辅助端的等价能量吸收速率 y 。通过分析局部最优解 y^{CJ} 的可能情况，可得到下面的定理。

定理 2 当给定能量吸收比 ρ 及相对信道增益 γ_h 和 γ_s 时，式(11)中目标函数关于 x 和 y 的解分可以下几种情况：

- (1) 当 $\gamma_s < \gamma_h < 1$ 时， $x^{CJ} = x_{\max}$ 且 $y^{CJ} = 0$ 。
- (2) 当 $\gamma_s < 1 \leq \gamma_h$ 时， $x^{CJ} = x_{\max}$ 且 $y^{CJ} = [\min(y_{\max}, y^*)]^+$ 。
- (3) 当 $1 \leq \gamma_s < \gamma_h$ 时，若 $y_{\max} < ((\gamma_s - 1)(1 - \rho)) / (\rho(\gamma_h - \gamma_s))$ ，则 $x^{CJ} = 0$ 且 $y^{CJ} = 0$ ；否则 $x^{CJ} = x_{\max}$ 且 $y^{CJ} = [\min(y_{\max}, y^*)]^+$ 。
- (4) 当 $\gamma_h \leq \gamma_s < 1$ 时， $x^{CJ} = x_{\max}$ 且 $y^{CJ} = 0$ 。
- (5) 当 $\gamma_h < 1 \leq \gamma_s$ 时， $x^{CJ} = 0$ 且 $y^{CJ} = 0$ 。
- (6) 当 $1 \leq \gamma_h \leq \gamma_s$ 时， $x^{CJ} = 0$ 且 $y^{CJ} = 0$ 。

其中

$$y^* = \left\{ \left[(1-\rho)\gamma_h\gamma_s(\gamma_h-1)((\gamma_h-\gamma_s)x_{\max}\rho - \gamma_h + (\gamma_h-1)(1-\rho)) \right]^{1/2} - \gamma_h(1-\gamma_s)(1-\rho) \right\} / [\rho\gamma_h(\gamma_h-\gamma_s)] \quad (13)$$

由定理 2 可知，当协作抗干扰方案有效时，局部最优的辅助端等价能量吸收速率为 $y^{CJ} = [\min(y_{\max}, y^*)]^+$ 。

其次，固定辅助端等价能量吸收速率 y ，求局部最优的能量吸收比 ρ 。此时，式(11)可改写为

$$\max_{\rho} R_s^{CJ}(x_{\max}, y), \text{ s.t. } 0 < \rho < 1 \quad (14)$$

式中， $R_s^{CJ}(x_{\max}, y)$ 表示将 $x = x_{\max}$ 代入式(8)并固定 y 得到的表达式。

为了简化表述，令 $a = x_{\max} + \gamma_h y + y - 2$ ， $b = (x_{\max} + y - 1)(\gamma_h y - 1)$ ， $c = \gamma_s x_{\max} + \gamma_h y + y - 2$ 及 $d = (\gamma_s x_{\max} + \gamma_h y - 1)(y - 1)$ 。将式(14)中目标函数对 ρ 求导，可得其二阶导数为

$$\frac{\partial^2 R_s^{CJ}}{\partial \rho^2} = \frac{-F(\rho)}{(\ln 2)(1 + a\rho + b\rho^2)(1 + c\rho + d\rho^2)} \quad (15)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} F(\rho) &= F_5\rho^5 + F_4\rho^4 + F_3\rho^3 + F_2\rho^2 + F_1\rho + F_0 \\ F_5 &= 2((bc - ad) - (b - d))bd \\ &\quad + (bc - ad)(ad + bc) \\ F_4 &= -2(a - c)bd + (bc - ad)(2(b + d + ac) \\ &\quad + (ad + bc)) + 6(b - d)ad \\ F_3 &= (a - c)(4bd - (ad + bc)) + 2(b - d)(2(ad \\ &\quad + bc) + (b + d + ac)) + 3(bc - ad)(a + c) \\ F_2 &= 3(a - c)(ad + bc) + 2(b - d)((b + d + ac) \\ &\quad + 2(a + c)) - (a + c)(bc - ad) \\ F_1 &= (a - c)(2(b + d + ac) + (a + c)) + 4(b - d) \\ F_0 &= (a - c)(a + c + 2) - 2(b - d) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

由式(15)和式(16)可知，当 $R_s^{CJ} > 0$ 时，有 $F(\rho) > 0$ ，于是 $\partial^2 R_s^{CJ}/\partial \rho^2 < 0$ ，即安全速率 R_s^{CJ} 是关于能量吸收比 ρ 的凸函数。因此，可以通过凸优化算法求得局部最优的能量吸收比。

最后，当协作抗干扰方案有效时，迭代算法求解 y^{CJ} 和 ρ^{CJ} 的具体步骤如下：

步骤 1 设置迭代终止条件 ε ，初始化能量吸收比 ρ_{initial} 和迭代次数 $t = 0$ ；

步骤 2 由式(13)得 $y^*(t)$ ，然后由定理 2 得局部最优的等价能量吸收速率 $y^{CJ}(t) = [\min(y_{\max}, y^*(t))]^+$ ，再将 $y = y^{CJ}(t)$ 代入式(14)中的目标函数，通过凸优化算法得局部最优的能量吸收比 $\rho^{CJ}(t)$ ，同时得到系统的安全速率 $R_s^{CJ}(t)$ ；

步骤 3 将 $\rho^{CJ}(t)$ 代入式(13)更新 $y^*(t) \rightarrow y^*(t+1)$ ，然后由定理 2 更新 $y^{CJ}(t) \rightarrow y^{CJ}(t+1)$ ，再将 $y^{CJ}(t+1)$ 代入式(14)中的目标函数，通过凸优化算法更新 $\rho^{CJ}(t) \rightarrow \rho^{CJ}(t+1)$ ，同时更新 $R_s^{CJ}(t) \rightarrow R_s^{CJ}(t+1)$ ；

步骤 4 若 $R_s^{CJ}(t+1) - R_s^{CJ}(t) > \varepsilon$ ，则更新迭代次数 $t \rightarrow t+1$ 并重复步骤 2 和步骤 3；否则终止迭代，并得到最终的系统安全速率。

当存在多个可选的辅助端时，我们给出一种单辅助端的选择方案。

定理 3 当存在多个辅助端时，选择对应于相对信道增益 γ_h 最大的辅助端进行协作安全传输。

证明 由式(8)可得，系统安全速率 R_s^{CJ} 关于 γ_h 的一阶导数为

$$\frac{\partial R_s^{CJ}}{\partial \gamma_h} = \frac{(1-\rho)\rho^2\gamma_s xy}{(\ln 2)((1-\rho) + \gamma_s x \rho + \gamma_h y \rho)((1-\rho) + \gamma_h y \rho)} \quad (17)$$

则当 $x \neq 0$ 且 $y \neq 0$ 时, R_s^{CJ} 是关于 γ_h 的单调增函数。因此, 当存在多个可选的辅助端时, 应选择对应于相对信道增益 γ_h 最大的辅助端进行协作安全传输。

证毕

由于该方案仅通过相对信道增益 γ_h 选择单个辅助端, 因此不需要额外的信息量和计算开销。

5 仿真验证

本小节将仿真验证系统的安全性能。假设所有信道均为准静态衰落信道且相互独立, 接收端和窃听端处的噪声模型如第3节所示。假设发送端和辅助端的最大等价能量吸收速率分别为 $x_{\max} = 200$ (J/s) 和 $y_{\max} = 200$ (J/s), 迭代算法的终止条件为 $\varepsilon = 10^{-6}$, 其它变量的值将在仿真图中给出。

图4给出了原能量收集型高斯窃听信道下, 系统安全速率 R_s^{GWT} 随能量吸收比 ρ 变化的性能曲线。由图4可知, 当发送端的相对信道增益满足 $\gamma_s < 1$ 时, 系统安全速率 R_s^{GWT} 是关于能量吸收比 ρ 的凸函数, 并且随发送端等价能量吸收速率 x 的增加而增大, 与式(5)和式(6)的推导一致。

图5给出了原能量收集型高斯窃听信道下, 当能量吸收比 ρ 分别为 0.5 和最优值 ρ^{GWT} 时, 系统安全速率 R_s^{GWT} 随发送端相对信道增益 γ_s 变化的性能

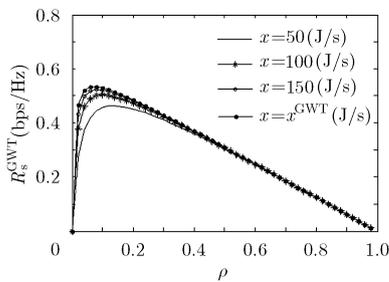


图4 安全速率 R_s^{GWT} 随能量吸收比的变化曲线, $\gamma_s = 0.65$

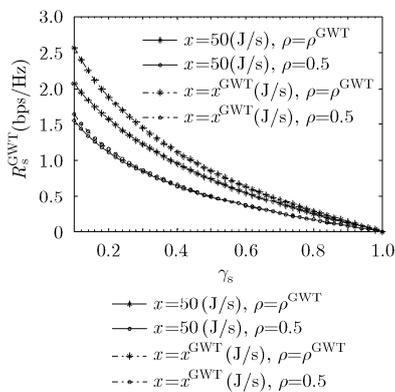


图5 安全速率 R_s^{GWT} 随发送端相对信道增益的变化曲线

曲线。由图5可知, 安全速率 R_s^{GWT} 随 γ_s 的增加而减小。因为当 γ_s 增加时, 窃听端的窃听能力会增强或者接收端的接收能力会减弱。但是, 对能量吸收比和发送端等价能量吸收速率进行优化可以有效地减小系统的性能损失。

图6给出了协作抗干扰方案下, 当发送端的等价能量吸收速率为最优值 x^{CJ} 时, 安全速率 R_s^{CJ} 随能量吸收比 ρ 变化的性能曲线。由图6可知, 当 $R_s^{CJ} > 0$ 时, 安全速率 R_s^{CJ} 是关于能量吸收比 ρ 的凸函数, 与式(15)的推导一致。

图7给出了协作抗干扰方案下, 当相对信道增益分别满足 $\gamma_s < 1 \leq \gamma_h$ 和 $1 \leq \gamma_s < \gamma_h$ (对应于定理2中(2)和(3)的信道条件, 即协作抗干扰方案有效的条件), 且能量吸收比 ρ 取不同初值时, 次优的能量吸收比 ρ^{CJ} 、次优的辅助端等价能量吸收速率 y^{CJ} 以及安全速率 R_s^{CJ} 随迭代次数变化的性能曲线。由图7可以看出, 第4节提出的迭代优化算法收敛速度较快; 并且, 当能量吸收比 ρ 取不同初始值时, 迭代优化算法的性能变化不大, 故该算法具有一定的稳定性。

图8和图9分别给出了当发送端的相对信道增益满足 $\gamma_s < 1$ 和 $\gamma_s > 1$ 时, 两种优化算法下系统安全速率随辅助端相对信道增益 γ_h 变化的性能曲线。在图9中, 由于 $\gamma_s > 1$ 时, 原能量收集型高斯窃听信道不能进行安全通信, 因此 $R_s^{GWT} = 0$ 。由图8和图9可知, 两种优化算法均优于半能量吸收比算法; 并且, 协作抗干扰方案下的迭代优化算法更优于原能量收集型高斯窃听信道下的优化算法, 且随着相对信道增益 γ_h 的增加, 其性能优势更加明显。因此, 当存在多个可选的辅助端时, 应选择对应于信道增益 γ_h 最大的辅助端进行协作安全传输, 与定理3的结论一致。其次, 由图9可知, 当原能量收集型高斯窃听信道不能进行安全通信时, 协作抗干扰方案仍然可在一定条件下保证系统的安全传输。

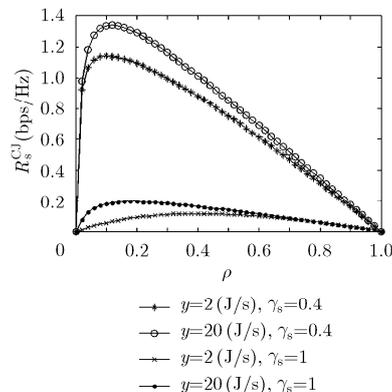


图6 安全速率 R_s^{CJ} 随能量吸收比的变化曲线, $x = x^{CJ}$ (J/s), $\gamma_h = 1.25$

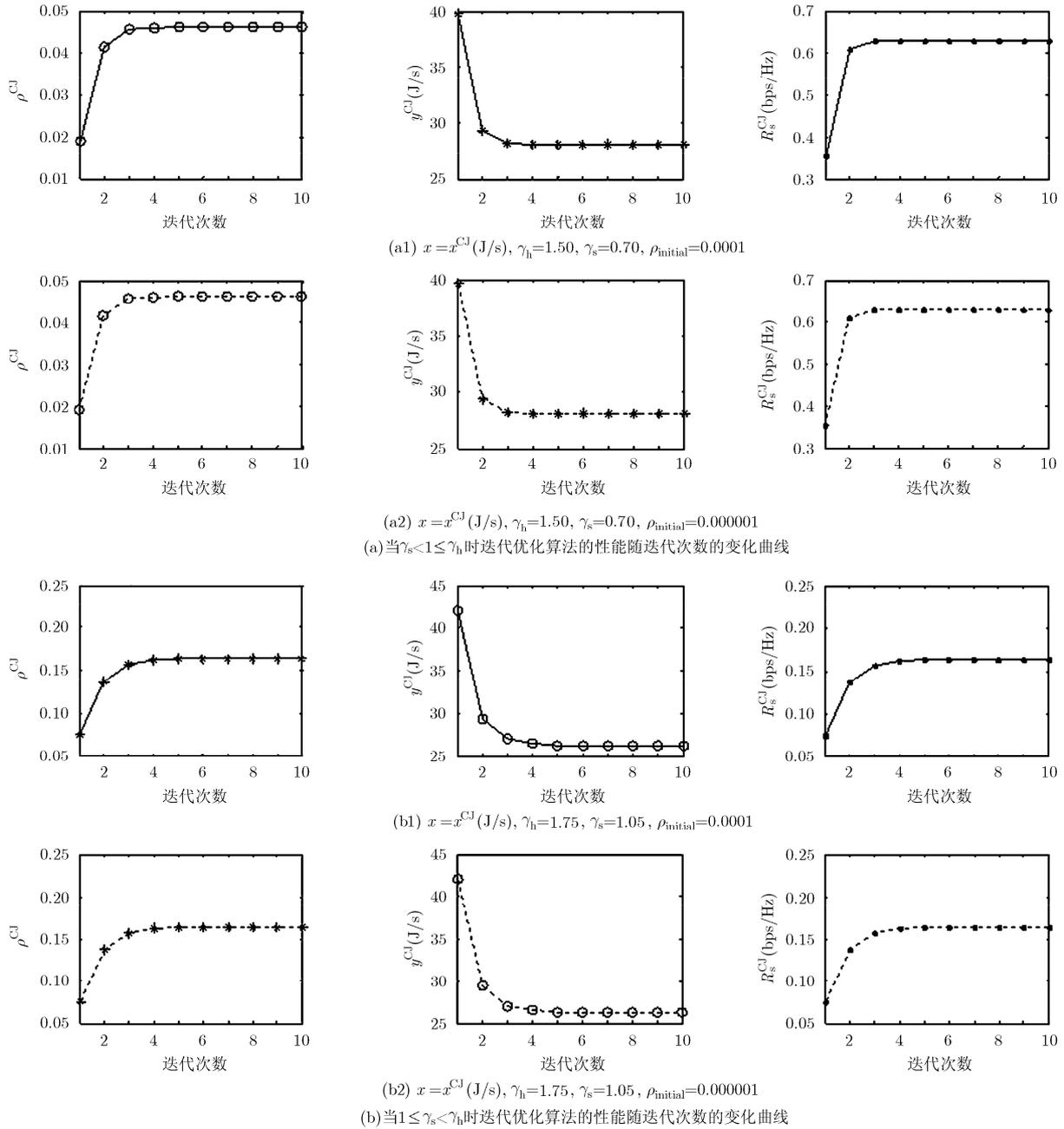


图 7 迭代优化算法的性能随迭代次数的变化曲线

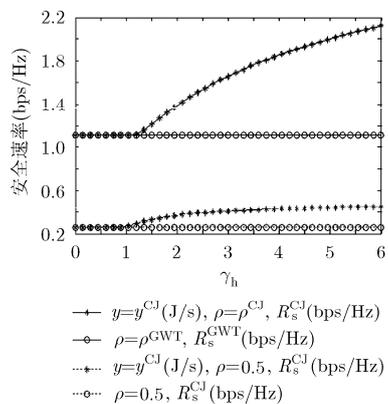


图 8 当 $\gamma_s < 1$ 时系统安全速率随 γ_h 变化的性能曲线, $x = 200 \text{ (J/s)}, \gamma_s = 0.40$

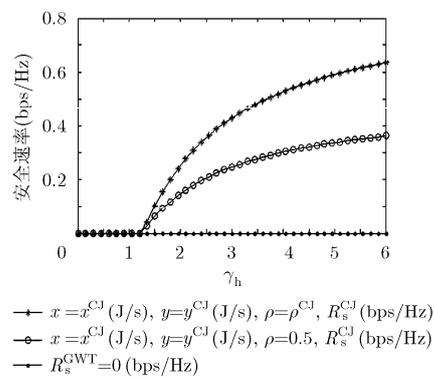


图 9 当 $\gamma_s > 1$ 时系统安全速率随 γ_h 变化的性能曲线, $\gamma_s = 1.25$

6 结束语

本文研究了能量收集型高斯窃听信道的安全传输问题。首先,分析了系统安全速率的最大化问题;其次,给出了协作抗干扰方案以进一步提高系统的安全速率,并分析了该方案提高安全速率的充分必要条件,且提出了以安全速率为目标函数的迭代优化算法;最后,给出了一种复杂度低的单辅助端的选择方案。仿真结果表明,两种优化算法均明显优于半能量吸收比算法;并且,协作抗干扰方案下的迭代优化算法比原能量收集型高斯窃听信道下的优化算法更优,且收敛速度较快。而且,当原能量收集型高斯窃听信道不能进行安全通信时,协作抗干扰方案仍可在一定条件下实现安全传输。对于多输入多输出和能量吸收比不对称的情况,由于较为复杂,还有待研究。

参 考 文 献

- [1] Shiu Y S, Chang S Y, Wu H C, *et al.* Physical layer security in wireless networks: A tutorial[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(2): 66-74.
 - [2] Wyner A D. The wire-tap channel[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1975, 54(8): 1355-1387.
 - [3] Xie Jian-wei and Ulukus S. Secure degrees of freedom of the Gaussian wiretap channel with helpers[C]. Proceedings of the Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), Monticello, IL, 2012: 193-200.
 - [4] Xie Jian-wei and Ulukus S. Secure degrees of freedom of the Gaussian wiretap channel with helpers and no eavesdropper CSI: blind cooperative jamming[C]. Proceedings of the Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), Baltimore, MD, 2013: 1-5.
 - [5] Bassily R and Ulukus S. Deaf cooperation and relay selection strategies for secure communication in multiple relay networks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(6): 1544-1554.
 - [6] Oggier F and Hassibi B. The secrecy capacity of the MIMO wiretap channel[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2011, 57(8): 4961-4972.
 - [7] Ekrem E and Ulukus S. The secrecy capacity region of the Gaussian MIMO multi-receiver wiretap channel[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2011, 57(4): 2083-2114.
 - [8] Bustin R, Liu Ruo-heng, and Poor H V. An MMSE approach to the secrecy capacity of the MIMO Gaussian wiretap channel[C]. Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), Seoul, 2009: 2602-2606.
 - [9] Fakoorian S A A and Swindlehurst A L. Optimal power allocation for GSVD-based beamforming in the MIMO Gaussian wiretap channel[C]. Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), Cambridge, MA, 2012: 2321-2325.
 - [10] Khisti A and Wornell G W. Secure transmission with multiple antennas-part II: the MIMOME wiretap channel[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56(11): 5515-5532.
 - [11] Sudevalayam S and Kulkarni P. Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011, 13(3): 443-461.
 - [12] Visser H J and Vullers R J M. RF energy harvesting and transport for wireless sensor network applications: principles and requirements[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(6): 1410-1423.
 - [13] Lu Xiao, Wang Ping, Niyato D, *et al.* Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey[OL]. <http://arxiv.org/abs/1406.6470>-2014.
 - [14] Luo Shi-xin, Zhang Rui, and Lim T J. Optimal save-then-transmit protocol for energy harvesting wireless transmitters[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(3): 1196-1207.
- 谢显中: 男, 1966年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为认知无线电、干扰对齐、预编码技术、通信信号处理等。
张秀娟: 女, 1987年生, 硕士, 研究方向为物理层安全和干扰对齐。
雷维嘉: 男, 1969年生, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为物理层安全与信道编码技术等。