

• 通信与信息工程 •

## 能量收集协同干扰中继系统保密速率优化

雷维嘉, 江雪, 左莉杰, 谢显中

(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 南岸区 400065)

**【摘要】**研究各有一个源节点、中继节点、目的节点和窃听节点的中继窃听信道模型的保密速率的优化问题。模型中各节点具有能量收集能力,源节点和中继节点采用“储能-发送”模式工作,即先收集能量,再发送数据。中继节点采用协同干扰模式,在源节点进行数据发送时对窃听者进行干扰。首先分析得到中继协同干扰方式下提高保密容量的条件;然后给出以最大化保密速率 $R_s$ 为目标的吸收比例系数 $\rho$ 和中继节点发送功率 $P_r$ 的迭代优化算法。通过对算法性能进行仿真,证明该算法收敛速度快,能有效提高系统的保密传输速率。

**关键词** 协同干扰; 聋中继; 能量收集; 中继窃听信道; 储能-发送; 保密速率

**中图分类号** TN925

**文献标志码** A

**doi:**10.3969/j.issn.1001-0548.2015.06.001

## Secrecy Rate Optimization for Cooperative Jamming Relay System with Energy Harvesting Constraints

LEI Wei-jia, JIANG Xue, ZUO Li-jie, and XIE Xian-zhong

(Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Communications Nanan Chongqing 400065)

**Abstract** Cooperative jamming is an efficient scheme to improve the secrecy rate achievable in the Gaussian wiretap channel. The optimization of secrecy rate in the wireless relay-eavesdropper channel model is studied. In the model, each node can harvest energy. Besides, the save-then-transmit protocol is adopted by the source node and relay node, harvesting energy first and then transmitting the data. The relay only plays the role of cooperative jamming when the source transmits the data. The condition that ensures the promotion of secrecy capacity is derived and then an iterative algorithm maximizing the secrecy rate  $R_s$  is given, which is based on the optimization of the save-ratio  $\rho$  and the relay power allocation  $P_r$ . Simulation results show that the proposed algorithm has a high convergence rate and proves to be effective in improving secrecy rate.

**Key words** cooperative jamming; deaf delay; energy harvesting; relay-eavesdropper channel; save-then-transmit; secrecy rate

无线通信系统由于传播介质固有的开放性易受到安全攻击。目前无线通信网络的安全性主要通过传统的密码体系保障。随着计算机技术的发展,传统的扩频、加密编码等安全技术面临越来越大的挑战。近年来利用无线信道的随机性进行安全传输的物理层安全技术<sup>[1-2]</sup>的研究方兴未艾。现有物理层安全技术的研究工作主要集中在3个方面:1)利用信号处理技术提高合法信道与窃听信道间的性能差距;2)用编码技术将信道间的性能差异转换为保密传输速率;3)设计同时实现差错控制与信息保密的信道编码。

物理层安全技术利用无线信道的物理特性结合物理层传输技术,提供一种无需密钥共享实现安全

通信的解决方案。物理层安全开创性的工作可追溯到1949年出版的文献[3],它从信息论的角度提出了物理层安全问题。文献[4]给出了加噪的窃听信道模型,该模型中保密速率被定义为:在存在或可能存在窃听者 $e$ 的情况下,从一个源节点 $s$ 发送保密信息到目的节点 $d$ 的最大速率。可见如果授权信道条件比窃听信道好,就可以获得正的保密速率。利用信号处理技术中的多天线技术、中继技术<sup>[5]</sup>、协同干扰技术等可突破信道条件的限制,提高系统保密速率。在中继窃听信道中,中继分为转发中继和聋中继两种。转发中继接收并转发消息,而聋中继不转发消息,仅发送干扰信号干扰窃听者。聋中继不接收来自合

收稿日期: 2014-05-29; 修回日期: 2015-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(61471076, 61271259, 61301123); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1299); 重庆市科委重点实验室专项经费。

作者简介: 雷维嘉(1969-),男,教授,博士,主要从事无线和移动通信技术方面的研究。

法发射机发送的信号,就像听不到声音的人一样,故用“聋”来描述它。当聋中继发送的人工噪声(称之为协同干扰<sup>[6]</sup>)对窃听者的破坏比对合法接收机的破坏更大时,就能提高保密速率。通过协同干扰技术的应用,即使在窃听信道条件比授权信道条件更好的情况下,合法接收者也能获得正的保密速率。

近年来协同干扰的机制得到了广泛的研究<sup>[7-11]</sup>。文献[7]讨论了当中继分别作为协同干扰者和噪声转发者时,如何根据信道系数选择协同模式,以及如何进行相应的功率分配。文献[8]提出将协同干扰用在多用户的窃听信道中,并与干扰对齐技术相结合,实现了1/2的安全自由度。文献[9]中,中继节点作为协同干扰者,发送人工噪声对窃听端造成干扰,并以最大化系统保密速率为目标,对中继天线的权重和源端的功率分配进行了优化。文献[10-11]分别研究了中继采用放大转发(amplify and forward, AF)和解码转发(decode and forward, DF)下的协同干扰机制,并对性能进行了仿真和分析。以上文献的研究均通过引入差异化的干扰,使得窃听信道的噪声水平高于主信道,从而提高保密速率。

一些无线通信系统,如无线传感器网络等自组织网络中的设备多采用有限能源供应设备(如电池)进行供电。由于电池的供电时间有限,当网络中一定数量节点的电能被耗尽时,整个网络就有可能瘫痪。作为一种解决有限能源供应有效的解决方案,近年来能量收集技术<sup>[12]</sup>受到了广泛的关注和研究。与传统的电池供电系统相比,从环境中收集能量有可能获得近乎无限的能源供应,能有效延长网络的寿命。收集的能源可来自太阳能、风能和周围的无线信号。

带有能量收集节点的无线通信系统最近成为研究的热点。文献[13]假定发射机为“储能-发送”模型,讨论在能量吸收速率为确定和随机的两种情况下,如何对吸收比例进行优化,以最大化系统吞吐量的问题。文献[14]研究能量收集模型下,高斯中继信道的吞吐量最大化问题。该模型的中继采用DF方案,源和中继节点的发送信号的能量均来自于收集的能量。文献[15]在点对点衰落信道下,存在能量收集约束条件时,以最小化中断概率为目标研究了最优功率分配算法。文献[16]考虑一个三节点的协同中继网络,源节点是唯一可用的射频发生器,中继节点从源节点产生的无线射频信号中收集能量,当收集的能量能保证目的端进行译码时,中继节点传输数据,否则继续收集能量,给出了一个在能量收集和数据传送之间切换的策略。

本文研究聋中继辅助的窃听信道下,在各节点具有能量收集能力、源节点和中继节点采用“储能-发送”工作模式时节点的能量吸收比例、源节点和聋中继发送功率的优化问题,以获得更高的保密速率。

## 1 系统模型

考虑在高斯窃听信道中,存在一个源节点 $s$ ,一个目的节点 $d$ ,一个窃听节点 $e$ ,一个聋中继节点 $r$ 的无线通信系统模型,如图1所示。所有节点都有能量收集能力, $s$ 和 $r$ 采用“储能-发送”模式工作。聋中继 $r$ 采用协同干扰的方式,在源节点 $s$ 发送信号的同时, $r$ 发送高斯白噪声对窃听者进行干扰,但同时也对合法接收者 $d$ 的接收造成影响。

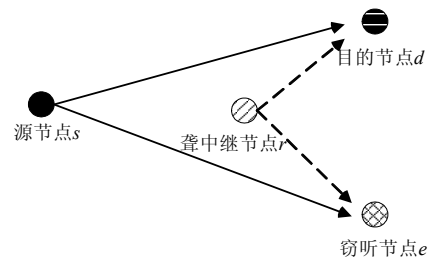


图1 聋中继辅助下的窃听信道模型

对于源节点和中继节点采用“储能-发送”方案,每个时隙 $T$ 内的工作分为两个阶段:1) 能量收集阶段。在时间间隔 $(0, \rho T)$ 内,从环境中收集能量,并储存在电池中。2) 数据传输阶段。在时间间隔 $(\rho T, T)$ 内,将储能设备中的能量用于数据传输。如图2所示。

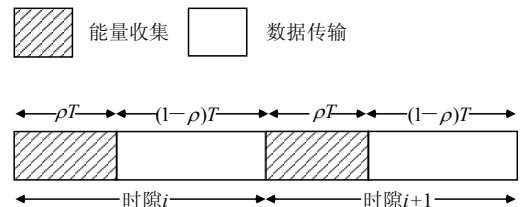


图2 无线能量收集的“储能-发送”模型

图中, $\rho(0 < \rho < 1)$ 表示能量吸收时间比例。 $\rho=0$ 表示发射机没有能量收集,不能传送数据; $\rho=1$ 表示发射机整个时隙都在收集能量,没有传输过程。由于储能设备不能同时充放电(称为“能量半双工约束”<sup>[13]</sup>),所以在第一阶段只能进行能量收集,不能发送或接收信号,而在第二阶段进行信号的发送或接收。

各节点在第一阶段 $\rho T$ 的时长内收集的能量为:

$$E = \nu \rho T \quad (1)$$

式中, $\nu$ 为能量吸收速率,即在单位时间内吸收的能量,单位为J/s。在实际的传输过程中,节点的能量消耗包括传输信号消耗能量、放大电路能量损耗和信号的处理能耗等。其中,放大电路能量损耗一

般与传输信号功率成正比, 可考虑包含在信号传输能耗中。而信号处理能耗一般相对固定。在具备能量收集特性系统模型的理论研究中, 通常认为节点收集的能量全部用于数据传输(已扣除信号处理消耗的能量), 这样可简化优化过程。假设各节点的能量吸收速率相同, 储能设备在每个时隙开始前是空的, 则在第二阶段 $(1-\rho)T$ 的时长内的发送功率为:

$$P_s = \frac{E}{(1-\rho)T} = \frac{v\rho}{1-\rho} \quad (2)$$

中继节点的发送功率不是越大越好, 需要进行优化。因此在每个时隙开始有可能还有上一时隙剩余的能量, 因此可用于人工噪声发送的最大值为:

$$P_{r\max} \geq \frac{E}{(1-\rho)T} = \frac{v\rho}{1-\rho} \quad (3)$$

该系统中,  $\rho$ 越大, 则吸收的能量越多, 第二阶段源节点的发送功率越大, 越有利于提高传输速率, 但相应可用于数据传输的时间越短。同时,  $\rho$ 值对中继节点发送干扰噪声的功率也有影响, 因此 $\rho$ 值的设置影响能获得的保密速率, 需要对其进行优化。若同时根据源节点和中继节点的发送功率对吸收比例 $\rho$ 进行优化, 问题会非常复杂。相比较源节点, 聋中继节点的位置更接近于窃听节点, 因此其发送干扰噪声的功率 $P_r$ 一般不会大于源节点发送信号的功率 $P_s$ , 因此本文对 $\rho$ 进行优化时只考虑 $P_s$ 的要求, 不考虑 $P_{r\max}$ 的要求, 这样可简化优化过程。

第二阶段源节点和中继节点发送信号, 目的端和窃听端接收到的信号分别为:

$$y_d = \sqrt{P_s}h_{sd}s + \sqrt{P_r}h_{rd}z + n_d \quad (4)$$

$$y_e = \sqrt{P_s}h_{se}s + \sqrt{P_r}h_{re}z + n_e \quad (5)$$

式中,  $h_{kl}$ 表示节点 $k$ 和 $l$ 之间的信道系数,  $k \in \{s, r\}$ ,  $l \in \{d, e\}$ ;  $s$ 为源节点发送的信号,  $z$ 为中继节点发送的干扰信号, 均满足平均功率约束 $E\{s^2\} = E\{z^2\} = 1$ ;  $P_s$ 和 $P_r$ 分别为源端和中继处发送信号的功率;  $n_d$ 、 $n_e$ 为零均值、方差为 $\sigma^2$ 的高斯噪声。

目的端和窃听端的信道容量分别为:

$$C_d = (1-\rho) \log_2 \left[ 1 + \frac{v\rho|h_{sd}|^2}{(P_r|h_{rd}|^2 + \sigma^2)(1-\rho)} \right] \quad (6)$$

$$C_e = (1-\rho) \log_2 \left[ 1 + \frac{v\rho|h_{se}|^2}{(P_r|h_{re}|^2 + \sigma^2)(1-\rho)} \right] \quad (7)$$

单位为bit/s/Hz。其中因子 $(1-\rho)$ 表示只在第二阶段才传输数据, 信道使用率为 $(1-\rho)$ 。可实现的保密速率为:

$$R_s(\rho, P_r) = [C_d - C_e]^+ = (1-\rho) \times$$

$$\left[ \log_2 \frac{((P_r|h_{rd}|^2 + \sigma^2)(1-\rho) + v\rho|h_{sd}|^2)(P_r|h_{re}|^2 + \sigma^2)}{((P_r|h_{re}|^2 + \sigma^2)(1-\rho) + v\rho|h_{se}|^2)(P_r|h_{rd}|^2 + \sigma^2)} \right]^+ \quad (8)$$

式中,  $[\cdot]^+ = \max(0, \cdot)$ , 表示若 $C_d < C_e$ 时, 保密速率为零。由式(8)可见, 保密速率与 $\rho$ 、 $P_r$ 有关。

为找到聋中继协同能带来保密速率提高的条件, 给出在没有聋中继协同时, 高斯窃听信道(GWT)的保密容量为:

$$C^{\text{GWT}}(\rho) = \left[ (1-\rho) \log_2 \frac{(1-\rho)\sigma^2 + v\rho|h_{sd}|^2}{(1-\rho)\sigma^2 + v\rho|h_{se}|^2} \right]^+ \quad (9)$$

当且仅当满足下面任一条件式(10)或式(11)时, 聋中继的辅助能提高系统的保密速率, 即 $R_s(\rho, P_r) \geq C^{\text{GWT}}(\rho)$ , 其充要条件为:

$$\begin{aligned} \frac{|h_{se}|^2}{|h_{sd}|^2} < 1 \leq \frac{|h_{re}|^2}{|h_{rd}|^2}, \text{ 且} \\ |h_{sd}|^2 |h_{se}|^2 (|h_{re}|^2 - |h_{rd}|^2) v\rho\sigma^2 + \\ (1-\rho)(|h_{re}|^2 |h_{se}|^2 - |h_{sd}|^2 |h_{rd}|^2) \geq \\ (1-\rho)\sigma^2 |h_{rd}|^2 |h_{re}|^2 (|h_{sd}|^2 - |h_{se}|^2) P_r \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} 1 \leq \frac{|h_{se}|^2}{|h_{sd}|^2} < \frac{|h_{re}|^2}{|h_{rd}|^2}, \text{ 且} \\ P_r \geq \frac{(|h_{se}|^2 - |h_{sd}|^2)\sigma^2}{|h_{sd}|^2 |h_{re}|^2 - |h_{rd}|^2 |h_{se}|^2} \end{aligned} \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可知, 如果 $R_s(\rho, P_r) \geq C^{\text{GWT}}(\rho)$ ,

则有 $\frac{|h_{re}|^2}{|h_{rd}|^2} > \max\left(1, \frac{|h_{se}|^2}{|h_{sd}|^2}\right)$ 。

式(10)和式(11)的证明如下。

充分性: 显然成立。

必要性: 假设 $R_s(\rho, P_r) \geq C^{\text{GWT}}(\rho)$ ,  $0 < \rho < 1$ , 从式(8)或式(9)可得:

$$R_s(\rho, P_r) \geq C^{\text{GWT}}(\rho) \quad (12)$$

$$R_s(\rho, P_r) \geq 0 \quad (13)$$

由此推出:

$$\begin{aligned} |h_{sd}|^2 |h_{se}|^2 (|h_{re}|^2 - |h_{rd}|^2) v\rho\sigma^2 + \\ (1-\rho)(|h_{re}|^2 |h_{se}|^2 - |h_{sd}|^2 |h_{rd}|^2) \geq \\ (1-\rho)\sigma^2 |h_{rd}|^2 |h_{re}|^2 (|h_{sd}|^2 - |h_{se}|^2) P_r \end{aligned} \quad (14)$$

$$(|h_{se}|^2 - |h_{sd}|^2)\sigma^2 \leq (|h_{sd}|^2 |h_{re}|^2 - |h_{rd}|^2 |h_{se}|^2) P_r \quad (15)$$

由式(15)可得:

$$\frac{|h_{re}|^2/|h_{rd}|^2}{|h_{se}|^2/|h_{sd}|^2} > 1, \quad \frac{|h_{se}|^2}{|h_{sd}|^2} \leq 1 \quad (16)$$

由此推出  $|h_{se}|^2/|h_{sd}|^2 \leq \max(1, |h_{re}|^2/|h_{rd}|^2)$ 。

若  $\max(|h_{re}|^2/|h_{rd}|^2, |h_{se}|^2/|h_{sd}|^2) < 1$ ，与式(14)矛盾，即  $|h_{se}|^2/|h_{sd}|^2 < |h_{re}|^2/|h_{rd}|^2 \leq 1$  不成立。

考虑其他两种情况：

$$1 \leq \frac{|h_{se}|^2}{|h_{sd}|^2} < \frac{|h_{re}|^2}{|h_{rd}|^2} \quad (17)$$

$$\frac{|h_{se}|^2}{|h_{sd}|^2} < 1 \leq \frac{|h_{re}|^2}{|h_{rd}|^2} \quad (18)$$

发现式(17)隐含在式(14)中，式(18)隐含在式(15)中。所以如果  $R_s(\rho, P_r) \geq C^{\text{GWT}}(\rho)$ ，需要同时满足式(14)和式(18)(即条件式(10))或同时满足式(15)和式(17)(即条件式(11))。证毕

## 2 $\rho$ 和 $P_r$ 值的优化

在满足式(10)或式(11)的条件时，采用中继的协同干扰可提高保密速率。由式(8)可知，保密速率与 $\rho$ 、 $P_r$ 有关，但不是它们的单调函数，因此可通过优化其取值获得最大的保密速率为：

$$\begin{cases} \max_{\rho, P_r} R_s(\rho, P_r) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 0 < \rho < 1 \\ 0 < P_r < \frac{\nu\rho}{1-\rho} \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

式中，第二个约束条件表示中继的发送功率不大于源节点的发送功率，保证第一阶段吸收的能量能用于第二阶段的噪声发送。

由于无法同时获得使保密最大化的最优的 $\rho$ 、 $P_r$ 值，故采用迭代的方法求解优化问题。每次迭代时先固定 $P_r$ ，获得 $\rho$ 的优化值；然后固定 $\rho$ ，再优化 $P_r$ 。经过多次迭代后， $\rho$ 、 $P_r$ 值将会逐渐逼近最优值。下面分别说明 $\rho$ 和 $P_r$ 优化值的获得过程。

以下求导过程均假定 $R_s(\rho, P_r) > 0$ 。

$$\begin{cases} l = |h_{rd}|^2 |h_{re}|^2 c P_s (|h_{se}|^2 |h_{rd}|^2 - |h_{re}|^2 |h_{sd}|^2) \\ m = 2 |h_{rd}|^2 |h_{re}|^2 c P_s (|h_{se}|^2 - |h_{sd}|^2) \\ n = c P_s (|h_{re}|^2 |h_{se}|^2 - |h_{rd}|^2 |h_{sd}|^2) + |h_{se}|^2 |h_{sd}|^2 P_s^2 (|h_{re}|^2 - |h_{rd}|^2) \\ u = |h_{se}| |h_{sd}| \sqrt{(1-\rho)^2 (|h_{re}|^2 - |h_{rd}|^2)^2 - \nu\rho(1-\rho)(|h_{re}|^2 - |h_{rd}|^2)(|h_{se}|^2 |h_{rd}|^2 - |h_{re}|^2 |h_{sd}|^2)} \end{cases} \quad (25)$$

### 2.3 迭代优化过程

最优的 $\rho$ 、 $P_r$ 值需要通过上面介绍的两个优化过程反

### 2.1 最优吸收比例 $\rho^*$

设 $P_r$ 为定值，则式(8)是 $\rho$ 的连续函数。为简化公式，记 $a_1=|h_{sd}|^2$ ， $a_2=|h_{se}|^2$ ， $b_1=P_r|h_{rd}|^2+\sigma^2$ ， $b_2=P_r|h_{re}|^2+\sigma^2$ ，对 $R_s(\rho)$ 求一阶导数，得：

$$\frac{dR_s(\rho)}{d\rho} = -\log_2 \left[ \frac{(a_1\nu - b_1)\rho + b_1}{(a_2\nu - b_2)\rho + b_2} \frac{b_2}{b_1} \right] + \frac{(1-\rho)}{\ln 2} \frac{(a_1b_2 - a_2b_1)\nu}{[(a_2\nu - b_2)\rho + b_2][(a_1\nu - b_1)\rho + b_1]} \quad (20)$$

$R_s(\rho)$ 的二阶导数为：

$$\frac{d^2R_s(\rho)}{d\rho^2} = -\frac{1}{\ln 2} (a_1b_2 - a_2b_1) \times \frac{(a_1b_2 + a_2b_1)(1-\rho)\nu + 2a_1a_2\rho\nu^2}{[(a_2\nu - b_2)\rho + b_2]^2 [(a_1\nu - b_1)\rho + b_1]^2} \quad (21)$$

因为 $\nu > 0$ ， $0 < \rho < 1$ ， $a_1b_2 - a_2b_1 > 0$ (由式(10)或式(11)均可得)，所以 $d^2R_s(\rho)/d\rho^2 < 0$ ，因此式(8)是关于 $\rho$ 的上凸函数，存在最大值。最优的 $\rho$ 是 $dR_s(\rho)/d\rho=0$ 的解。

记  $f(\rho) = (1-\rho)/(A_1A_2\rho^2 + A_2b_1\rho + A_1b_2\rho + C)$ ， $W = 2^D$ ， $g(\rho) = (b_2A_1\rho + C)/(b_1A_2\rho + C)$  (其中  $A_1 = a_1\nu - b_1$ ， $A_2 = a_2\nu - b_2$ ， $D = (A_1b_2 - A_2b_1)/(\ln 2)$ )， $dR_s(\rho)/d\rho=0$ 可简记为：

$$W^{f(\rho)} = g(\rho) \quad (22)$$

式(22)是关于 $\rho$ 的超越方程，一般很难用初等代数的方法获得最优 $\rho$ 的闭式解，但可用图解法找出两条曲线 $W^{f(\rho)}$ 和 $g(\rho)$ 的交点，即为当前最优吸收比例 $\rho^*$ 。

### 2.2 次优中继发送功率分配 $P_r^*$

求解最优的 $P_r$ 时，固定 $\rho$ ，式(8)是 $P_r$ 的连续函数。记 $c=1-\rho$ ，对其求导，得：

$$\frac{dR_s(P_r)}{dP_r} = \frac{c(lP_r^2 + mP_r + n)}{\ln 2 b_1 b_2 (cb_1 + P_s |h_{sd}|^2)(cb_2 + P_s |h_{se}|^2)} \quad (23)$$

$\frac{dR_s(P_r)}{dP_r}=0$ 有两个解，其中一个解就是所要最优值：

$$P_r^* = \frac{|h_{rd}| |h_{re}| (1-\rho) (|h_{se}|^2 - |h_{sd}|^2) + u}{h_{rd} h_{re} (1-\rho) (|h_{re}|^2 |h_{sd}|^2 - |h_{se}|^2 |h_{rd}|^2)} \quad (24)$$

式中，

复迭代得到，逐步向最优值逼近。具体的迭代过程为：

1) 初始化， $P_r(0) = \bar{P}_r$ ；

2) 代入 $P_r(i-1)$ 的值, 按式(22)用数值方法解出吸收比例 $\rho(i)$ ,  $i$ 为迭代次数;

3) 按式(24)求出 $P_r(i)$ ;

4) 计算 $|P_r(i)-P_r(i-1)|$ 。如果 $|P_r(i)-P_r(i-1)|<\Delta$ , 迭代结束, 将 $\rho(i)$ 和 $P_r(i)$ 代入式(8)求出保密速率 $R_s$ 。否则转步骤2)继续迭代。其中 $\Delta$ 为一小数, 决定迭代优化结果的精度。

本文算法迭代优化过程中的计算主要是实数加法和乘法。而线性搜索算法需要不断更新参数值进行计算和比较, 每次参数更新后需要进行多次乘法、加法和取对数运算。搜索计算的循环次数与所取的步长和精度有关, 步长越小结果越精确, 但搜索计算次数越多, 计算量也相应提高。与线性搜索算法相比, 本文算法在有限次迭代收敛后即停止计算, 且不需要进行对数计算, 计算复杂度明显低于线性搜索算法。

### 3 仿真结果

为在图形中表示方便, 记 $h_r = |h_{re}|^2 / |h_{rd}|^2$ ,  $h_s = |h_{se}|^2 / |h_{sd}|^2$ , 即窃听信道与合法信道的相对增益。仿真中, 设置 $\Delta=0.001$ ,  $\sigma^2=1$  W。

#### 3.1 迭代算法收敛性能

图3为迭代优化算法的收敛性能的仿真结果。仿真中, 能量吸收速率 $\nu=1000$  J/s, 分别在 $1 \leq h_s < h_r$ 和 $h_s < 1 \leq h_r$ 两种情况下进行了仿真。从图3中可以看出, 随着迭代的进行, 吸收比例 $\rho$ 、中继功率 $P_r$ 逐渐向最优值逼近, 可实现保密速率 $R_s$ 也在逐渐提高。在其他随机产生信道条件的500次蒙特卡洛仿真中, 算法的收敛情况类似, 在迭代4~5次后 $\rho$ 和 $P_r$ 即收敛, 保密速率逼近最大值。可见, 本迭代优化算法收敛性好, 计算复杂度低。

#### 3.2 能量吸收速率随机变化时的保密速率

假设能量吸收速率 $\nu$ 已知, 在一个时隙 $T$ 内为常量, 但在不同时间隙间是随机变化的。设能量吸收速率满足Gamma分布,  $\nu \sim \Gamma(k, \theta)$ ,  $k$ 为形状参数、 $\theta$ 为尺度参数, 均值 $E[\nu]=k\theta$ , 方差 $\text{var}[\nu]=k\theta^2$ 。为验证对吸收比例 $\rho$ 值进行优化后性能改善的效果, 将优化方案与两阶段时间均分方案(即 $\rho=0.5$ )进行了对比, 后者的中继发送功率 $P_r$ 根据式(24)得到。能量吸收速率分别服从 $\Gamma(0.5, 0.5)$ 、 $\Gamma(3, 3)$ 、 $\Gamma(6, 6)$ 、 $\Gamma(10, 10)$ 分布, 每个分布下仿真50次。图4是当 $h_r=1.5$ ,  $h_s=0.75$ 时的仿真结果, 表1则是3种分布下两种方案保密速率的平均值。

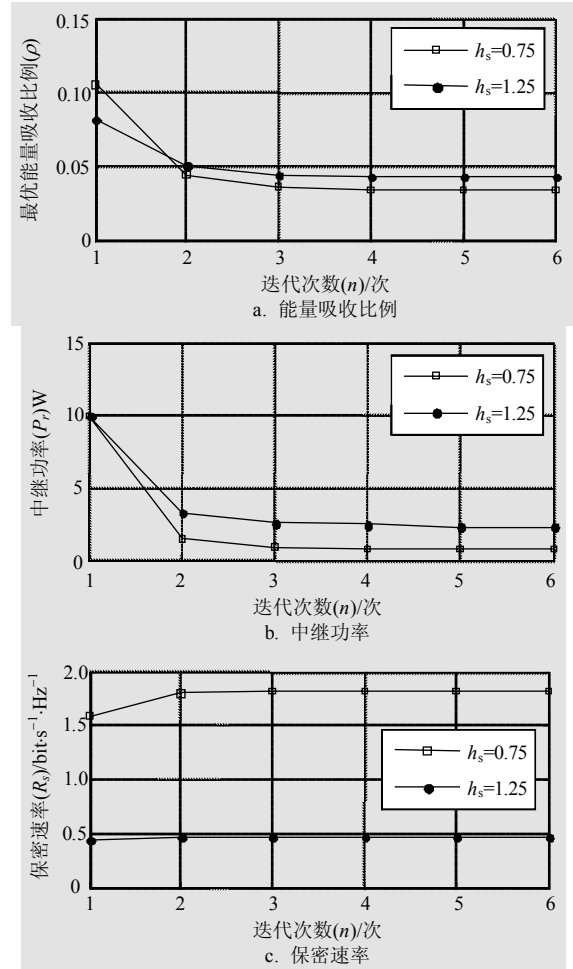
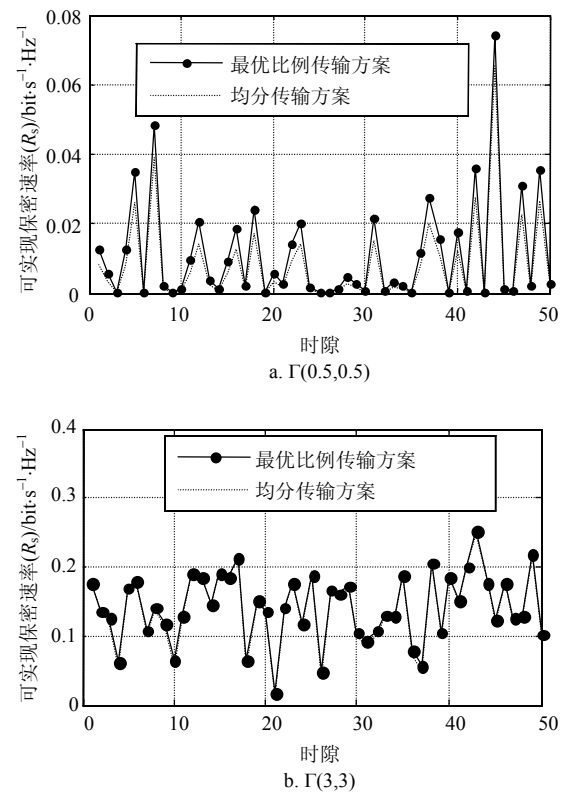


图3 迭代算法收敛性能,  $h_r=1.5$



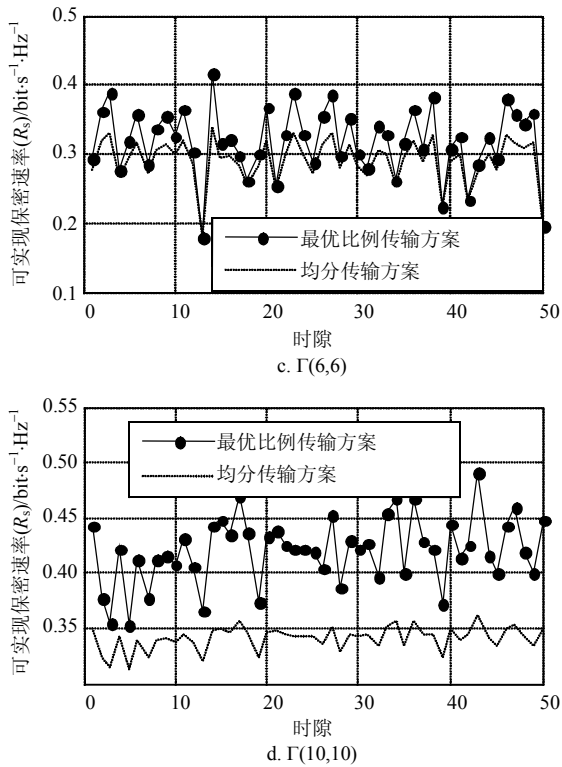


图4 最优吸收比例传输方案性能

由图4和表1可知，对比所有能量吸收速率样值下的保密速率，所有分布情况最优比例传输方案的性能都优于均分传输方案，只有在 $\Gamma(3,3)$ 时均分时间方案的性能才与优化性能接近(因为此时最优的 $\rho$ 值接近于0.5)，说明本文的优化方案对保密速率的改善明显。另外从仿真结果可以看出，随着能量吸收速率的增加，无论是最优比例传输方案还是均分传输方案，保密速率都在提高。这是因为能量吸收速率增加，可在更短的时间内获得更多的能量，使第二阶段有更多的时间、更大的功率用于数据的传输。

表1 最优吸收比例传输方案和均分传输方案性能对比

50个时隙 $R_s$ 均值	$\Gamma(0.5,0.5)$	$\Gamma(3,3)$	$\Gamma(6,6)$	$\Gamma(10,10)$
均分传输方案	0.008 0	0.139 8	0.291 0	0.421 0
最优比例传输方案	0.011 0	0.143 2	0.319 1	0.341 6
改善的百分比/%	37.73	2.41	9.66	23.26

### 3.3 可实现保密速率 $R_s$ 与相对信增益 $h_r$ 的关系

设定能量吸收速率 $\nu=1\ 000\ \text{J/s}$ ，在 $h_s>1(h_s=1.25)$ 和 $h_s<1(h_s=0.75)$ 两种情况下，分别对保密速率随相对信道增益 $h_r$ 变化的情况进行仿真，仿真结果如图5所示。结果表明，当 $h_r \leq \max(1, h_s)$ 时， $R_s(h_r)=C^{\text{GWT}}$ ，否则 $R_s(h_r)>C^{\text{GWT}}$ ，验证了 $h_r>\max(1, h_s)$ 是聋中继协同干扰方式提高窃听信道保密容量的必要条件。

### 3.4 最优吸收比例 $\rho$ 、可实现保密速率 $R_s$ 与能量收集速率 $\nu$ 的关系

图6a是当 $h_r=1.5$ ， $h_s=0.75$ 时，最优吸收比例随能量

吸收速率变化的关系曲线。由图6a可知，随着能量吸收速率 $\nu$ 的增加，最优吸收比例 $\rho$ 减小，意味着需要用于收集能量的时间减少，可将更多的时间用于数据传输。图6b是在相同的信道条件下可实现保密速率与能量吸收速率的关系变化曲线。由图6b可知，随着能量吸收速率的增加，可实现保密速率增大。这是由于吸收速率 $\nu$ 增大，用于收集能量的时间减少，而用于数据传输的时间延长，同时可用于发送信号的功率也增大，因而保密传输速率增加。但随着 $\nu$ 的增加， $R_s$ 的幅度逐渐减小。当 $\nu \rightarrow \infty$ 时， $R_s$ 趋近一个定值：

$$\lim_{\nu \rightarrow \infty} R_s(\nu) = (1 - \rho) \log_2 \left[ \frac{|h_{sd}|^2 (P_r |h_{re}|^2 + \sigma^2)}{|h_{se}|^2 (P_r |h_{rd}|^2 + \sigma^2)} \right] \quad (26)$$

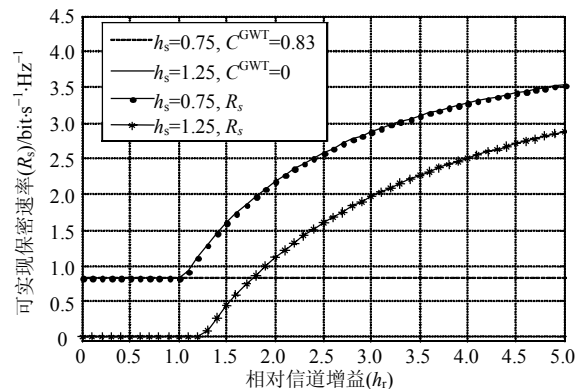
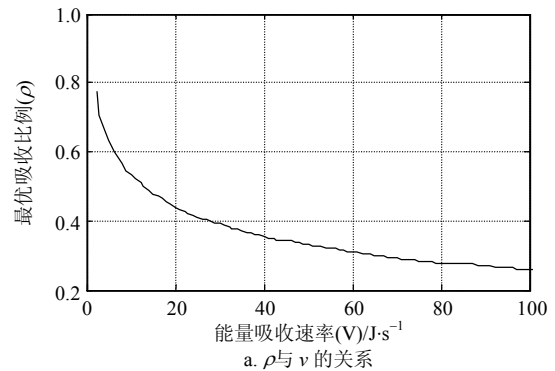
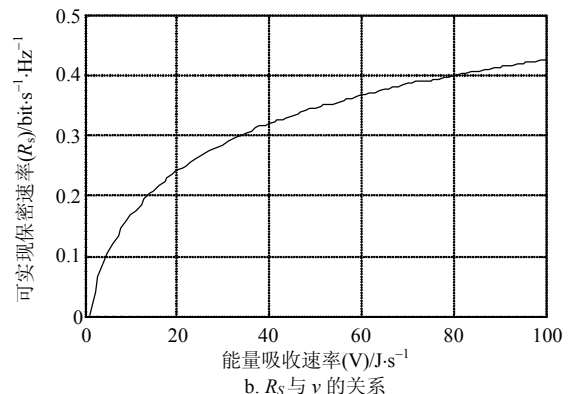


图5 最优可实现的保密速率 $R_s$ 与相对信道增益 $h_r$ 的关系



a.  $\rho$ 与 $\nu$ 的关系



b.  $R_s$ 与 $\nu$ 的关系

图6 最优吸收比例 $\rho$ 、可实现保密速率 $R_s$ 与能量吸收速率 $\nu$ 的关系

## 4 总 结

本文对具有能量收集能力的节点组成的无线窃听中继信道模型中, 中继采用协同干扰模式时的保密速率优化问题进行了研究。在源节点和中继节点采用“储能-发送”工作模式时, 对系统能量收集阶段与数据发送阶段的时间分配比例系数 $\rho$ 和协同干扰中继节点的发送功率 $P_r$ 进行了优化。分别给出了 $\rho$ 和 $P_r$ 单独优化的理论公式, 并使用迭代优化的方法最终得到 $\rho$ 和 $P_r$ 联合优化的结果, 最大化保密速率。仿真结果表明该迭代算法复杂度小、收敛性好。此外, 在能量吸收速率 $v$ 随机变化的情况也进行了仿真, 结果表明, 相比较 $\rho=0.5$ 的均分时间传输方案, 优化方案明显提升了系统的保密传输速率。

### 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] DEBBAH M, GAMAL H E, Poor H V, et al. Wireless physical layer security[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2009, 9(1): 313-316.
- [3] SHANNON C E. Communication theory of secrecy systems [J]. Bell System Technical Journal, 1949, 28(4): 656-715.
- [4] WYNER A. The wire-tap channel[J]. Bell System Technical Journal, 1975, 54(8): 1355-1387.
- [5] 曹侯, 段海霞, 朱德利, 等. 协作通信系统中能效优化的中继分配算法[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(6): 807-812.  
CAO Bin, DUAN Hai-xia, ZHU De-li, et al. Relay assignment algorithm based on energy efficiency optimization in cooperative communication systems[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(6): 807-812.
- [6] TEKIN E, YENER A. The general Gaussian multiple access and two-way wire-tap channels: achievable rates and cooperative jamming[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(6): 2735-2751.
- [7] BASSILY R, 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.
- [8] XIE Jian-wei, ULUKUS S. Secure degrees of freedom of the Gaussian wiretap channel with helpers[C]//IEEE 50th Annual Allerton Conference on Communication Control and Computing. Monticello, IL: IEEE, 2012: 193-200.
- [9] LUN Dong, ZHU Han, PETROPULU A P, et al. Cooperative jamming for wireless physical layer security[C]//IEEE 15th Workshop on Statistical Signal Processing. Cardiff: IEEE, 2009: 417-420.
- [10] HUANG Jing, SWINDLEHURST A L. Cooperative jamming for secure communications in MIMO relay networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(10): 4871-4884.
- [11] LIN M, GE JIAN-hua, YANG Ye. An effective secure transmission scheme for AF relay networks with two-hop information leakage[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(8): 1676-1679.
- [12] SUDEVALAYAM S, KULKARNI P. Energy harvesting sensor nodes: survey and implications[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2011, 13(3): 443-461.
- [13] YIN S, ZHANG E, LI J, et al. Throughput optimization for self-powered wireless communications with variable energy harvesting rate[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Shanghai: IEEE, 2013: 830-835.
- [14] HUANG Chuan, ZHANG Rui, CUI Shu-guang. Throughput maximization for the Gaussian relay channel with energy harvesting constraints[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(8): 1469-1479.
- [15] HUANG Chuan, ZHANG Rui, CUI Shu-guang. Optimal power allocation for outage probability minimization in fading channels with energy harvesting constraints[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 1-14.
- [16] KRIKIDIS I, TIMOTHEOU S, SASAKI S. RF energy transfer for cooperative networks: data relaying or energy harvesting[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(11): 1772-1775.

编辑 税 红