

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201801066



# 无线能量采集技术下的全双工 中继系统安全性能分析

吴奇<sup>1,2</sup>, 刘菁华<sup>1</sup>, 赵睿<sup>1,2</sup>, 聂志巧<sup>1,2</sup>, 李元健<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;  
2. 华侨大学 厦门市移动多媒体重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为提升基于无线能量采集技术的全双工中继安全网络系统的安全性能,提出全双工中继干扰窃听者的策略. 为干扰窃听者窃听有用信息,在第一时间隙,中继发送人工噪声干扰窃听者;在第二时隙,中继在转发有用信息的同时,信源发送人工噪声干扰窃听者. 在瑞利衰落信道下,通过合理的近似分析,推导出遍历可达安全速率(EASR)的表达式. 分析与仿真结果表明:理论分析曲线与蒙特卡洛仿真结果基本吻合;对模型进行不同参数的性能对比,显示出所提系统在不同情况下具有性能优越性.

**关键词:** 物理层安全; 能量采集; 协作通信; 马尔科夫链; 遍历可达安全速率

**中图分类号:** TN 92      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2019)03-0390-09

## Security Performance Analysis of Full Duplex Relay System With Wireless Energy Harvesting

WU Qi<sup>1,2</sup>, LIU Jinghua<sup>1</sup>, ZHAO Rui<sup>1,2</sup>,  
NIE Zhiqiao<sup>1,2</sup>, LI Yuanjian<sup>12</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China  
2. Xiamen Key Laboratory of Mobile Multimedia Communications, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** A full-duplex relay secure transmission model is investigated based on wireless energy harvesting technology. In order to improve the security performance of the system, a strategy of interfering eavesdroppers with full-duplex relay nodes is proposed. In order to preventing eavesdrop useful information for eavesdroppers, in the first time slot, the relay sends artificial noise to disturb the eavesdropper. In the second time slot, the relay sends useful information while the source sends artificial noise to disturb the eavesdropper. Under the rayleigh fading channel, an expression of ergodic achievable secrecy rate (EASR) is deduced through reasonable approximate analysis. The analysis and simulation results show that the theoretical analysis curves are in good agreement with the Monte Carlo simulation results, and the performance comparison of the model under different parameter settings shows the performance superiority of the strategy in different situations.

**Keywords:** physical layer security; energy harvesting; cooperative communication; Markov chain; ergodic average secrecy rate

随着无线通信技术的不断发展,各种安全技术也随之发展. 物理层安全基于香农理论的信道编码

**收稿日期:** 2018-01-26  
**通信作者:** 刘菁华(1980-),女,讲师,主要从事通信信号处理的研究. E-mail:jinghualiu2017@126.com.  
**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61401165);福建省自然科学基金资助项目(2015J01262);华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1611301040)

技术,充分利用无线信道复杂的空间特性和时变特性,实现信息的安全传输<sup>[1]</sup>. Wyner<sup>[2]</sup>首次提出物理层安全的概念及其相关指标. 随后,物理层安全技术快速发展,并应用于保障信息安全传输<sup>[3-8]</sup>. 与传统无线通信网络相比,中继协作加扰技术越来越受研究者的关注<sup>[9-10]</sup>. 它不但能扩大网络覆盖范围,还能提高通信传输质量,而且能够有效地提高安全传输性能. 中继根据工作方式可以分为半双工和全双工<sup>[11-12]</sup>. 半双工中继只能单独实现接收或发射的功能,而全双工中继可以同时实现收发功能,从而提高通信传输效率. 因此,基于全双工中继的通信技术越来越多地普及到通信系统中. 伴随着全双工的发展,其自干扰问题一直影响着通信系统的传输性能,而 Riihonen 等<sup>[12]</sup>提出了相应的解决方案. 为解决通信节点供能问题,基于能量采集技术的通信系统应运而生. 由于传统通信节点主要靠电池供电,导致维护成本升高、环境污染等一系列问题. 不同于传统能量采集方案<sup>[13-14]</sup>,基于无线信号的能量采集技术已受到研究者的关注<sup>[15-16]</sup>,无线信号集信息与能量于一体,利用无线能量采集技术能很好地解决通信系统中各节点的供能问题. 本文研究一种基于无线能量采集技术的全双工中继安全传输模型,并提出中继发射人工噪声干扰窃听者的策略,推导出相应的遍历可达安全速率(EASR)的闭合表达式,并通过蒙特卡洛仿真进行验证.

# 1 系统模型与传输策略

## 1.1 系统模型

系统模型图,如图 1 所示. 图 1 中:S 为信源;R 为中继;D 为信宿;E 为窃听者. 考虑一种 2 跳中继安全通信网络模型,包含 2 种工作模式和 4 个节点. 工作模式分别为充电模式和信息转发模式;节点包括 S,R,D,E. 中继采用全双工工作模式,配置接收和发射 2 根天线,其他节点配置单根天线,中继工作所需能量全部通过无线信号采集能量得到.

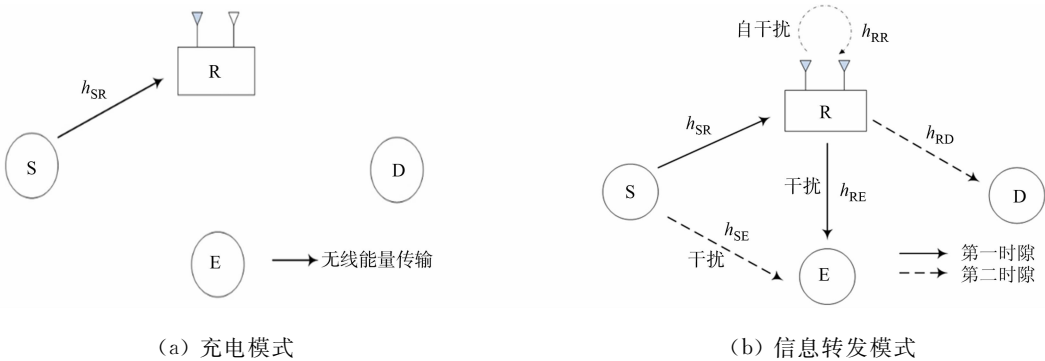


图 1 系统模型图

Fig. 1 System model diagram

假设信源与信宿之间距离较远,不存在直达路径,系统中各个信道建模考虑准静态平坦的瑞利衰落信道. 所有信道相互独立,S 到 R,R 到 D,R 到 E,S 到 E 的信道参数分别表示为  $h_{SR}, h_{RD}, h_{RE}, h_{SE}$ ,且平均信道增益分别为  $E[|h_{SR}|^2]=\Omega_{SR}, E[|h_{RD}|^2]=\Omega_{RD}, E[|h_{RE}|^2]=\Omega_{RE}, E[|h_{SE}|^2]=\Omega_{SE}$ . 其中, $E[X]$ 表示对  $X$  求均值. S 到 R,R 到 D,S 到 E,R 到 E 的距离分别表示为  $d_{SR}, d_{RD}, d_{SE}, d_{RE}$ .

## 1.2 传输策略

结合协作干扰与时分能量采集技术的安全传输策略,整个通信过程分为  $k$  个传输时隙,每个传输时隙的工作方式,如表 1 所示. 表 1 中: $T$  为时隙. 在第  $k(k=1,2,\cdots)$  个传输时隙开始时,中继节点估计其电池的剩余能量  $\epsilon[k]$ ,并与设定的电池阈值  $E_{th}$  进行比较. 若  $\epsilon[k]>E_{th}$  时,中继向信源反馈信号 11,此时,信源开始发射有用信息;否则,反馈信号 00,中继继续充电.

当中继工作在充电模式时,中继的接收信号表达式为

表 1 传输时隙

Tab. 1 Transmission time slot

充电模式		信息转发模式	
S→R 人工噪声 (中继采集能量)		S→R 有用信息 R→E 人工噪声 $T/2$	R→D 有用信息 S→E 人工噪声 $T/2$

反馈信号 00,中继继续充电.

$$y'_R(t) = \frac{1}{\sqrt{d_{SR}^m}} \sqrt{P_S} h_{SR} x(t) + n_R(t). \tag{1}$$

式(1)中: $P_S$  为信源 S 的发送功率; $m$  为传输路径损耗因子; $x$  为信源 S 发送方差为 1 时的人工噪声信号; $n_R$  为中继收到方差为  $\sigma^2$  时的加性白高斯噪声. 因信道接收噪声  $n_R$  相较于信源所发送的人工噪声可忽略不计,故在能量采集过程中不考虑对  $n_R$  的采集.

中继在充电模式下采集的能量可以表示为

$$E_h = \frac{\eta P_S |h_{SR}|^2}{d_{SR}^m}. \tag{2}$$

式(2)中: $\eta$  为能量采集的能量转化效率.

当中继工作在信息转发状态时,第一时隙中继的接收信号表达式为

$$y_R(t) = \frac{1}{\sqrt{d_{SR}^m}} \sqrt{P_S} h_{SR} x_S(t) + \sqrt{P_R} h_{RR} f_R(t) + n_R(t). \tag{3}$$

式(3)中: $P_R$  为中继发送功率; $h_{RR}$  为自干扰信道的信道系数.

而窃听者的接收信号表达式为

$$y_{E1}(t) = \frac{1}{\sqrt{d_{SE}^m}} \sqrt{P_S} h_{SE} x_S(t) + \frac{1}{\sqrt{d_{RE}^m}} \sqrt{P_R} h_{RE} f_R(t) + n_E(t). \tag{4}$$

假定每个节点接收相同的方差( $\sigma^2$ )的加性高斯白噪声,第二时隙中信宿的接收信号表达式为

$$y_D(t) = \frac{1}{\sqrt{d_{RD}^m}} h_{RD} x_R(t) + n_D(t). \tag{5}$$

而窃听者的接收信号表达式为

$$y_{E2}(t) = \frac{1}{\sqrt{d_{SE}^m}} \sqrt{P_S} h_{SE} f_S(t) + \frac{1}{\sqrt{d_{RE}^m}} \sqrt{P_R} h_{RE} x_R(t) + n_E(t). \tag{6}$$

中继采用解码转发的工作模式,则信宿的接收信噪比为

$$\gamma_D = \min \left( \frac{P_S |h_{SR}|^2}{d_{SR}^m \sigma^2 + d_{SR}^m P_R |h_{RR}|^2}, \frac{P_R |h_{RD}|^2}{d_{RD}^m \sigma^2} \right). \tag{7}$$

窃听者采用选择合并的方式,合并 2 个时隙的信息,则窃听者的接收信噪比为

$$\gamma_E = \max \left( \frac{d_{RE}^m P_S |h_{SE}|^2}{d_{SE}^m d_{RE}^m \sigma^2 + d_{SE}^m P_R |h_{RE}|^2}, \frac{d_{SE}^m P_R |h_{RE}|^2}{d_{SE}^m d_{RE}^m \sigma^2 + d_{RE}^m P_S |h_{SE}|^2} \right). \tag{8}$$

## 2 基于马尔科夫链的中继能量分析

研究中继能量状态是为了找出中继能量是否大于设定阈值的概率. 由于在全双工中继的工作模式中,能量状态处于复杂的充电和放电状态,文中的解决方案是首先对中继的能量进行离散化处理,然后,采用有限状态的马尔科夫链,模拟中继能量离散化后的各能级之间能量状态的转换情况<sup>[17-18]</sup>.

### 2.1 能量离散化

将中继电池的能量状态分为  $L+1$  个能级,第  $i$  个能级表示为  $\epsilon_i = iC/L, i \in \{0, 1, \dots, L\}$ . 其中,  $C$  表示电池的容量,其值大于  $E_{th}$ ; 否则,中继处于休眠状态,不能转发信息. 当中继处于充电状态时,储存在中继的能量可离散化表示为

$$\epsilon_h \triangleq \epsilon_{i_h}, \quad i_h = \arg \max_{i \in \{0, 1, \dots, L\}} \{\epsilon_i : \epsilon_i \leq E_h\}. \tag{9}$$

当中继处于信息转发状态时,存储在中继电池的能量可离散化表示为

$$\epsilon'_h \triangleq \epsilon'_{i_h}, \quad i_h = \arg \max_{i \in \{0, 1, \dots, L\}} \{\epsilon_i : \epsilon_i \leq E'_h\}, \tag{10}$$

而中继消耗的能量可离散化表示为

$$\epsilon_t \triangleq \epsilon_{i_t}, \quad i_t = \arg \min_{i \in \{0, 1, \dots, L\}} \{\epsilon_i : \epsilon_i \geq E_{th}\}. \tag{11}$$

式(11)中: $E_{th}$  等同于中继消耗的所有功率能量,即  $E_{th} = P_R + P_C$ ,  $P_C$  代表恒定的电路损耗功率,故  $\epsilon_t =$

$$\left\lceil \frac{E_{th}}{C/L} \right\rceil \frac{C}{L} = \frac{\tau}{L} C, \text{ 其中, } \lceil \cdot \rceil \text{ 代表上取整函数, } \tau \triangleq \left\lceil \frac{E_{th}}{C/L} \right\rceil.$$

## 2.2 马尔科夫过程

根据节 2.1 能量离散化过程,将中继电池能量状态模拟成有限状态的马尔科夫过程.定义中继电池能量状态  $S_i$  的能量离散化为  $\epsilon_i$ ,转移概率  $p_{i,j}$  表示中继电池能量状态从  $S_i$  到  $S_j$  的转移概率.则中继电池的能量状态变化有以下 6 种情况.

1) 中继电池的能量始终为空( $S_0 \rightarrow S_0$ ).在这种情况下,中继的电池能量状态条件不能满足,中继处于充电状态,由于中继电池在完成充电之后依旧为空,这表明中继电池在此间隙下采集的能量为 0,即  $\epsilon_h = \epsilon_0 = 0$ ,根据式(2)和  $\epsilon_i$  计算式,必须满足  $\epsilon_h = \eta P_S |h_{SR}|^2 / d_{SR}^m < \epsilon_1 = C/L$  才能使采集的能量离散化为 0.则中继电池的能量始终为空的转移概率  $p_{0,0}$  可表示为

$$p_{0,0} = \Pr\{\epsilon_h = 0\} = \Pr\{E_h < \epsilon_1\} = \Pr\left\{|h_{SR}|^2 < \frac{Cd_{SR}^m}{\eta P_S L}\right\} = F_{|h_{SR}|^2}\left(\frac{Cd_{SR}^m}{\eta P_S L}\right). \quad (12)$$

2) 中继电池能量始终为满( $S_L \rightarrow S_L$ ).在这种情况下,中继的电池能量状态始终满足,则中继一直处于信息转发状态.中继电池能量始终为满的转移概率  $p_{L,L}$  可表示为

$$p_{L,L} = \Pr\{\epsilon'_h \geq \epsilon_t\} = \Pr\left\{\eta\left(\frac{P_S |h_{SR}|^2}{d_{SR}^m} + P_R |h_{RR}|^2\right) \geq \frac{\tau C}{L}\right\} = \Pr\left\{\frac{P_S |h_{SR}|^2}{d_{SR}^m} + P_R |h_{RR}|^2 \geq \frac{\tau C}{\eta L}\right\}. \quad (13)$$

设  $Z = \frac{P_S |h_{SR}|^2}{d_{SR}^m} + P_R |h_{RR}|^2$ ,则  $Z$  的累积分布函数可表示为

$$F_Z(x) = \Pr(Z < x) = \begin{cases} F_{|h_{RR}|^2}\left(\frac{x}{P_R}\right) - \frac{\exp(-x/z_1) - \exp(-x/z_2)}{(z_1/z_2) - 1}, & z_1 \neq z_2, \\ F_{|h_{RR}|^2}\left(\frac{x}{P_R}\right) - \frac{x \cdot \exp(-x/z_2)}{z_1}, & z_1 = z_2. \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中: $z_1 = P_R \Omega_{RR}$ ;  $z_2 = \frac{P_S \Omega_{SR}}{d_{SR}^m}$ .

结合式(13),(14)的计算,可得中继电池能量始终为满的转移概率  $p_{L,L}$ ,即

$$p_{L,L} = 1 - F_Z\left(\frac{\tau C}{\eta L}\right). \quad (15)$$

3) 中继电池能量状态保持非空非满状态不变( $S_i \rightarrow S_i$ ).在这种情况下,无法确定中继电池的能量状态条件是否满足,需要估计中继电池的剩余能量.若剩余能量小于设定阈值( $\epsilon_i < \epsilon_t$ ),中继工作在充电模式;若剩余能量大于阈值( $\epsilon_i \geq \epsilon_t$ ),能量条件满足,中继开始转发信息.而信息转发状态下的中继能量状态不变,表明采集的能量等于消耗的能量,即  $\epsilon'_h = \epsilon_t$ .中继电池能量状态保持非空非满状态不变的转移概率  $p_{i,i}$  可表示为

$$p_{i,i} = \Pr\{\epsilon_i < \epsilon_t\} \Pr\{\epsilon_h = 0\} + \Pr\{\epsilon_i \geq \epsilon_t\} \Pr\{\epsilon'_h = \epsilon_t\} + \Pr\{\epsilon_i \geq \epsilon_t\} \Pr\{\epsilon'_h = 0\} = \begin{cases} \{\Pr\{\epsilon_h = 0\}, & i < \tau, \\ \Pr\{\epsilon'_h = \epsilon_t\} + \Pr\{\epsilon_h = 0\}, & i \geq \tau. \end{cases} \quad (16)$$

经计算得到中继电池能量状态保持非空非满状态不变的转移概率  $p_{i,i}$  为

$$p_{i,i} = \begin{cases} F_{|h_{SR}|^2}\left(\frac{Cd_{SR}^m}{\eta P_S L}\right), & i < \tau, \\ F_Z\left(\frac{C + \epsilon_t L}{\eta L}\right) - F_Z\left(\frac{\epsilon_t}{\eta}\right) + F_{|h_{SR}|^2}\left(\frac{Cd_{SR}^m}{\eta P_S L}\right), & i \geq \tau. \end{cases} \quad (17)$$

4) 中继电池能量由非空非满状态到充满状态( $S_i \rightarrow S_L$ ).在这种情况下,也无法确定中继电池的能量状态条件是否满足,需要估计中继电池的能量状态.当中继采集的能量满足  $\epsilon_h \geq \epsilon_L - \epsilon_i$  时,中继工作处于充电状态;当中继采集的能量满足  $\epsilon'_h - \epsilon_t \geq \epsilon_L - \epsilon_i$  时,中继工作处于信息转发状态.中继电池能量由非空非满状态到充满状态的转移概率  $p_{i,L}$  表示为

$$p_{i,L} = \Pr\{\epsilon_i < \epsilon_t\} \Pr\{\epsilon_h \geq \epsilon_L - \epsilon_i\} + \Pr\{\epsilon_i \geq \epsilon_t\} \Pr\{\epsilon'_h - \epsilon_t \geq \epsilon_L - \epsilon_i\} + \Pr\{\epsilon_i \geq \epsilon_t\} \times \Pr\{\epsilon_h \geq \epsilon_L - \epsilon_i\} = \begin{cases} \{\Pr\{\epsilon_h \geq \epsilon_L - \epsilon_i\}, & i < \tau, \\ \Pr\{\epsilon'_h - \epsilon_t \geq \epsilon_L - \epsilon_i\} + \Pr\{\epsilon_h \geq \epsilon_L - \epsilon_i\}, & i \geq \tau. \end{cases} \quad (18)$$

经计算得到中继电池能量由非空非满状态到充满状态的转移概率  $p_{i,L}$  为

$$p_{i,L} = \begin{cases} 1 - F_{|h_{SR}|^2} \left( \frac{C(L-i)d_{SR}^m}{L\eta P_s} \right), & i < \tau, \\ 1 - F_Z \left( \frac{C(L-i) + \epsilon_t L}{\eta L} \right) + 1 - F_{|h_{SR}|^2} \left( \frac{C(L-i)d_{SR}^m}{L\eta P_s} \right), & i \geq \tau. \end{cases} \tag{19}$$

5) 中继电池能量状态处于非空非满状态,但电池能量有所增加( $S_i \rightarrow S_j$ ). 在这种情况下,也无法确定中继电池的能量状态条件是否满足,因此,需要估计中继电池的能量状态. 当  $\epsilon_h = \epsilon_j - \epsilon_i$  时,中继工作处于充电状态;当  $\epsilon'_h - \epsilon_t = \epsilon_j - \epsilon_i$  时,中继工作处于信息转发状态. 中继电池能量状态处于非空非满状态的转移概率  $p_{i,j}$  表示为

$$p_{i,j} = \Pr\{\epsilon_i < \epsilon_t\} \Pr\{\epsilon_h = \epsilon_j - \epsilon_i\} + \Pr\{\epsilon_i \geq \epsilon_t\} \Pr\{\epsilon'_h - \epsilon_t = \epsilon_j - \epsilon_i\} + \Pr\{\epsilon_i \geq \epsilon_t\} \times \Pr\{\epsilon_h = \epsilon_j - \epsilon_i\} = \begin{cases} \Pr\{\epsilon_h = \epsilon_j - \epsilon_i\}, & i < \tau, \\ \Pr\{\epsilon'_h - \epsilon_t = \epsilon_j - \epsilon_i\} + \Pr\{\epsilon_h = \epsilon_j - \epsilon_i\}, & i \geq \tau. \end{cases} \tag{20}$$

经计算得到中继电池能量状态处于非空非满状态的转移概率  $p_{i,j}$  为

$$p_{i,j} = \begin{cases} F_{|h_{SR}|^2} \left( \frac{C(j-i+1)d_{SR}^m}{L\eta P_s} \right) - F_{|h_{SR}|^2} \left( \frac{C(j-i)d_{SR}^m}{L\eta P_s} \right), & i < \tau, \\ F_Z \left( \frac{C(j-i+1) + \epsilon_t L}{\eta L} \right) - F_Z \left( \frac{C(j-i) + \epsilon_t L}{\eta L} \right) + F_Z \left( \frac{C(j-i+1) + \epsilon_t L}{\eta L} \right) - F_Z \left( \frac{C(j-i) + \epsilon_t L}{\eta L} \right), & i \geq \tau. \end{cases} \tag{21}$$

6) 中继电池能量状态处于非空非满状态,但电池能量有所减少( $S_j \rightarrow S_i$ ). 在这种情况下,中继的电池能量减少,中继必须工作于信息转发状态,且中继消耗的能量大于采集的能量. 中继电池减少的能量( $\epsilon_j - \epsilon_i$ )等于中继消耗的能量  $\epsilon_t$  和中继采集的能量  $\epsilon'_h$  之间的差值. 中继电池能量状态处于非空非满状态,但电池能量有所减少的转移概率  $p_{j,i}$  可表示为

$$p_{j,i} = \Pr\{\epsilon_j \geq \epsilon_t\} \Pr\{\epsilon_t - \epsilon'_h = \epsilon_j - \epsilon_i\} = \begin{cases} \Pr\{\epsilon_t - \epsilon'_h = \epsilon_j - \epsilon_i\}, & j \geq \tau, \\ 0, & j < \tau. \end{cases} \tag{22}$$

经计算得到中继电池能量状态处于非空非满状态,但电池能量有所减少的转移概率  $p_{j,i}$  为

$$p_{j,i} = \begin{cases} F_Z \left( \frac{(\tau+i-j+1)C}{L\eta} \right) - F_Z \left( \frac{(\tau+i-j)C}{L\eta} \right), & j \geq \tau, \\ 0, & j < \tau. \end{cases} \tag{23}$$

分析完 6 种情况后,证明中继电池能量状态概率  $\xi_i$  是平稳分布,其中,  $i \in \{0, 1, \dots, L\}$  表示中继电池能量状态概率( $\epsilon_i$ ).

定义  $\mathbf{M}_{\underline{\Delta}}(p_{i,j})$  表示  $(L+1) \times (L+1)$  维能量状态转移概率矩阵,通过文献[19]中的方法,可以证明矩阵  $\mathbf{M}$  的转置矩阵是不可约和行随机的. 因此,平稳分布  $\xi_i$  一定满足以下等式

$$\xi = (\xi_0, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_L)^T = \mathbf{M}^T \xi. \tag{24}$$

通过文献[19]的数学方法求解式(24),  $\xi$  可表示为

$$\xi = (\mathbf{M}^T - \mathbf{I} + \mathbf{B})^{-1} \mathbf{b}. \tag{25}$$

式(25)中:  $\mathbf{B} = [\mathbf{b}, \mathbf{b}, \dots, \mathbf{b}] \in \mathbf{R}^{L+1}$ ;  $\mathbf{b} = (1, 1, \dots, 1)^T \in \mathbf{R}^{L+1}$ ;  $\mathbf{I}$  为单位矩阵.

在  $\xi$  的平稳分布下,中继电池能量状态满足所给定阈值的概率为

$$\Pr\{\epsilon[k] \geq E_{th}\} = \sum_{i=\tau}^L \xi_i. \tag{26}$$

### 3 性能分析

#### 3.1 安全容量

安全容量  $C_s$  定义为主信道容量和窃听信道容量之间的差值. 其中,主信道和窃听信道的信道容量分别表示为

$$C_D = \log_2(1 + \gamma_D), \quad C_E = \log_2(1 + \gamma_E). \tag{27}$$

而安全容量可表示为

$$C_S = \begin{cases} C_D - C_E, & \gamma_D > \gamma_E, \\ 0, & \gamma_D \leq \gamma_E. \end{cases} \quad (28)$$

### 3.2 遍历安全容量

遍历安全容量定义为可达平均通信速率的最大值<sup>[3]</sup>,表达式为

$$E[C_S] = \Pr\{\epsilon[k] \geq E_{th}\} \cdot \int_0^\infty \int_0^\infty [C_D - C_E]^+ f(\gamma_D) f(\gamma_E) d\gamma_D d\gamma_E = \sum_{i=\tau}^L \xi_i \cdot E[[C_D - C_E]^+]. \quad (29)$$

式(29)中:  $[x]^+ \triangleq \max\{0, x\}$ .

然而,在文中方案中,求取式(29)的闭合表达式是不现实的,转而求取其下界表达式,即遍历可达安全速率定义为

$$E[C_S] \geq \sum_{i=\tau}^L \xi_i \cdot [E[C_D] - E[C_E]]^+ \triangleq \bar{C}_S. \quad (30)$$

### 3.3 遍历可达安全速率分析

依次求解  $E[C_D]$  和  $E[C_E]$ ,  $E[C_D]$  可表示为

$$E[C_D] = \frac{1}{\ln 2} \cdot E[\ln(1 + \gamma_D)] = \frac{1}{\ln 2} \cdot \int_0^\infty \frac{1 - F_{\gamma_D}(x)}{1 + x} dx. \quad (31)$$

式(31)中:  $F_{\gamma_D}(x)$  为  $\gamma_D$  的累积分布函数,由概率论知识可求得

$$F_{\gamma_D}(x) = 1 - \left( \frac{P_S \Omega_{SR}}{x d_{SR}^m P_R \Omega_{RR} + P_S \Omega_{SR}} \right) \cdot \exp\left(-\left(\frac{d_{SR}^m \sigma^2}{P_S \Omega_{SR}} + \frac{d_{RD}^m \sigma^2}{P_R \Omega_{RD}}\right)x\right). \quad (32)$$

将式(32)带入式(31)<sup>[20]</sup>求得

$$E[C_D] = \frac{1}{\ln 2} \times \frac{c_1}{c_1 - c_2} [\exp(c_3) \Gamma(0, \exp(c_3)) - \exp\left(\frac{c_1 c_3}{c_2}\right) \left(\Gamma\left(0, \frac{c_1 c_3}{c_2}\right) + \ln \frac{c_2}{c_1} - \ln c_3 + \ln \frac{c_1 c_3}{c_2}\right)]. \quad (33)$$

式(33)中:  $c_1 = P_S \Omega_{SR}$ ;  $c_2 = d_{SR}^m P_R \Omega_{RR}$ ;  $c_3 = \frac{d_{SR}^m \sigma^2}{P_S \Omega_{SR}} + \frac{d_{RD}^m \sigma^2}{\Omega_{RD} P_R}$ .

**引理 1** 窃听信道的近似遍历安全容量为

$$E[C_E] \approx \frac{1}{\ln 2} \sum_i^q w_i \phi(x_i). \quad (34)$$

式(34)中:  $q$  为近似次数(精度);  $x_i$  ( $i = 0, 1, \dots, q$ ) 为拉盖尔多项式  $L_{q+1}(x)$  的零点;  $w_i =$

$$\frac{x_i}{[(q+1)L_{q+1}(x_i)]'}.$$

采用文献[21]中的算法可以求出  $x_i$  和  $w_i$ . 因此,可以用式(34)代表  $E[C_E]$  的近似闭合表达式.

证明<sup>[22-24]</sup>  $E[C_E]$  可表示为

$$E[C_E] = E[\log_2(1 + \gamma_E)] = \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty [\ln(1 + x)] f_{\gamma_E}(x) dx. \quad (35)$$

式(35)中:  $f_{\gamma_E}(x)$  为  $\gamma_E$  的概率密度函数,由概率论知识可求得

$$f_{\gamma_E}(x) = \exp\left(\frac{a_3}{a_1 \Omega_{SE}}\right) \left[ \frac{a_1 \Omega_{SE}}{a_2 \Omega_{RE} + a_1 \Omega_{SE} x} + \frac{a_1 \Omega_{SE} a_2 \Omega_{RE}}{(a_2 \Omega_{RE} + a_1 \Omega_{SE} x)^2} \right] + \exp\left(-\frac{a_3}{a_1 \Omega_{SE}} x\right) \left[ \frac{a_3}{a_2 \Omega_{RE} x + a_1 \Omega_{SE}} + \frac{a_2 \Omega_{RE} a_1 \Omega_{SE}}{(a_2 \Omega_{RE} x + a_1 \Omega_{SE})^2} \right]. \quad (36)$$

式(36):  $a_1 = d_{RE}^m P_S$ ;  $a_2 = d_{SE}^m P_R$ ;  $a_3 = d_{SE}^m d_{RE}^m \sigma^2$ .

将式(36)代入式(35)可得

$$E[C_E] = \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty \exp(-x) \frac{a_1 \Omega_{SE}}{a_3} \left[ \ln\left(1 + \frac{a_1 \Omega_{SE}}{a_3} x\right) \right] [\exp(x + (1/a_3)) Q_1 + Q_2] dx \approx$$

$$\frac{1}{\ln 2} \sum_i^q w_i \phi(x_i).$$

(37)

式(37)中: $\phi(x) = \frac{a_1 \Omega_{SE}}{a_3} \left[ \ln \left( 1 + \frac{a_1 \Omega_{SE}}{a_3} x \right) \right] \left[ \exp(x + (1/a_3)) Q_1 + Q_2 \right]$ , 其中,  $Q_1 = \frac{a_1 a_3 \Omega_{SE}}{a_2 a_3 \Omega_{RE} + a_1^2 \Omega_{SE}^2} + \frac{a_3^2 a_1 \Omega_{SE} a_2 \Omega_{RE}}{(a_3^2 a_2 \Omega_{RE} + a_1^2 \Omega_{SE}^2)^2}$ ,  $Q_2 = \frac{a_1 \Omega_{SE}}{a_1 \Omega_{SE} b_2 \Omega_{RE} x + a_1 a_3 \Omega_{SE}} + \frac{a_3^2 c_1 \Omega_{RE} a_1 \Omega_{SE}}{(a_1 \Omega_{SE} b_2 \Omega_{RE} x + a_3^2 a_1 \Omega_{SE})^2}$ .

式(35)中的积分不能得出闭合形式,因此,采用文献[4]中高斯拉盖尔求积的方式求取近似形式. 根据高斯拉盖尔求积的方法,可以得到式(37).

综合式(33),(34),可得遍历可达安全速率的表达式为

$$\begin{aligned} \bar{C}_S = \sum_{i=\tau}^L \xi_i \cdot [E[C_D] - E[C_E]]^+ \approx \sum_{i=\tau}^L \xi_i \cdot \frac{1}{\ln 2} \cdot \left\{ \frac{c_1}{c_1 - c_2} [\exp(c_3) \Gamma(0, \exp(c_3))] - \right. \\ \left. \exp\left(\frac{c_1 c_3}{c_2}\right) \left( \Gamma\left(0, \frac{c_1 c_3}{c_2}\right) + \ln \frac{c_2}{c_1} - \ln c_3 + \ln \frac{c_1 c_3}{c_2} \right) \right\} - \sum_i^q w_i \phi(x_i) \right\}^+. \end{aligned}$$

(38)

4 仿真分析

对文中模型进行 Monte Carlo 仿真<sup>[25-27]</sup>,该仿真方法适用于一些解析难以求解甚至不可能求解的问题,仿真次数越多,越逼近解析值,同时,也为对后面求得的闭合表达式进行验证. 对于所有的仿真曲线,设置  $d_{SR} = d_{RD} = d_{SE} = d_{RE} = 1$ ,  $m = 3$ ,  $\eta = 0.5$ ,  $C = 500$ ,  $L = 300$ ,  $P_C = 30$  W,  $P_R = E_{th} - P_C$ . 假定充电时间为单位时间,假定加性高斯白噪声功率均为 1 W,式(38)的曲线均由精度  $q = 300$  所绘制,设定的蒙特卡洛仿真次数均为  $10^6$  次.

传输方案的遍历安全容量随信源发送功率  $P_S$  的变化情况的仿真图,如图 2 所示.  $\Omega_{i,j}$  ( $i, j = S, R, D, E$ )均设为 1. 图 2 中: $C_S$  为遍历安全容量; $P_S$  为信源发送功率.

由图 2 可知:传输方案的遍历安全容量随着信源发送功率  $P_S$  的增大而增大,达到一定的速率(即最大值)后将会减小. 由此可得,  $P_S$  在某一范围内能显著地提高系统的安全性能,且存在一个  $P_S$  值使系统处于最佳安全状态.

模型的遍历安全容量和遍历可达安全速率随  $\Omega_{SR}$  的变化曲线,及与传统半双工中继模式的对比,如图 3 所示. 遍历安全容量曲线由式(32)仿真绘出,设置各个信道的平均信道增益分别为  $\Omega_{SE} = \Omega_{RE} = 20$ . 图 3 中: $\bar{C}_S$  为遍历可达安全速率.

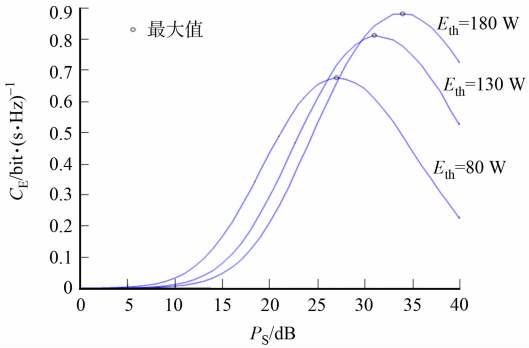


图 2 不同  $E_{th}$  下遍历安全容量随  $P_S$  变化的趋势

Fig. 2 Ergodic secrecy capacity with  $P_S$  tends under different  $E_{th}$

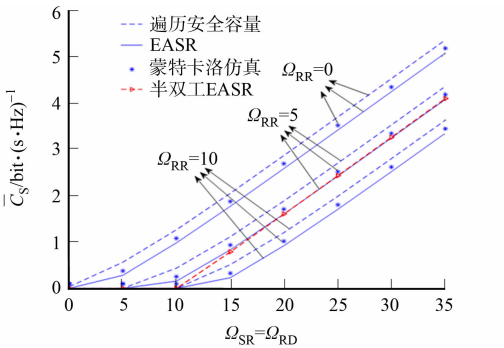


图 3 不同  $\Omega_{RR}$  下遍历可达安全速率随  $\Omega_{SR}$  变化的趋势

Fig. 3 EASR with  $\Omega_{SR}$  tends under conditions different  $\Omega_{RR}$

由图 3 可知:文中的遍历安全容量与遍历可达安全速率曲线较为接近;此外,该系统的遍历可达安全速率随着  $\Omega_{SR}, \Omega_{RD}$  的增加而增加,即安全性能随着  $\Omega_{SR}$  和  $\Omega_{RD}$  的增加而增强;与传统半双工模式对比发现,当  $\Omega_{RR} < 5$  时,文中系统的安全性能优于传统的半双工模式. 因此,通过减少自干扰的影响和提升主信道的信道增益可极大提高文中系统的安全性能.

模型的遍历安全容量和遍历可达安全速率随着  $\Omega_{RR}$  的变化曲线,以及与传统半双工模式的对比,如



图 4 所示. 遍历安全容量曲线通过式(32)仿真绘出, 设置各个信道的平均信道增益为  $\Omega_{SE} = \Omega_{RE} = 10$ , 而  $\Omega_{SR} = \Omega_{RD}$ .

由图 4 可知: 文中的遍历安全容量与遍历可达安全速率的曲线较为接近; 除此之外, 该系统的遍历可达安全速率随着  $\Omega_{RR}$  的增加而减小; 与传统半双工模式对比可以发现, 当  $\Omega_{RR} < 15$  时, 文中系统的安全性能优于传统半双工模式. 因此, 通过提高主信道的信道增益和减小自干扰的影响可以大大提高系统的安全性能.

5 结束语

研究基于能量采集技术的全双工中继安全传输系统的安全性能. 在传统 4 节点模型上, 结合能量采集技术及中继采用全双工工作模式和协作加扰技术, 根据该模型设计的安全传输方案进行建模, 并分析其安全性能; 采用基于马尔科夫链离散能量的方法简化能量采集的分析过程, 推导出遍历可达安全速率的近似表达式. 利用 MATLAB 软件, 通过 Monte Carlo 仿真验证近似处理后闭合表达式的合理性, 并与传统半双工模式的安全性能进行对比. 分析结果表明: 通过中继发射人工噪声干扰窃听者, 并减少自干扰和提高主信道的增益, 可以显著地提高系统的安全传输性能.

参考文献:

[1] BLOCH M, BARROS J, RODRIGUES M R D, *et al.* Wireless information-theoretic security[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2008, 54(6): 2515-2534. DOI: 10. 1109/TIT. 2008. 921908.

[2] WYNER A D. The wire-tap channel[J]. Bell System Technical Journal, 1975, 54(8): 1355-1387. DOI: 10. 1002/j. 1538-7305. 1975. tb02040. x.

[3] ZHAO Rui, HUANG Yongming, WANG Wei, *et al.* Ergodic achievable secrecy rate of multiple-antenna relay systems with cooperative jamming[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(4): 2537-2551. DOI: 10. 1109/TWC. 2015. 2504526.

[4] LI Yuanjian, ZHAO Rui, TAN Xing, *et al.* Secrecy performance analysis of artificial noise aided precoding in full-duplex relay systems[C]// IEEE Global Communications Conference. Singapore: IEEE Press, 2017: 214-218. DOI: 10. 1109/GLOCOM. 2017. 8254504.

[5] ZHAO Rui, YUAN Yi, FAN Lisheng, *et al.* Secrecy performance analysis of cognitive decode-and-forward relay networks in nakagami-m fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(2): 549-563. DOI: 10. 1109/TCOMM. 2016. 2618793.

[6] ZHAO Rui, LIN Hongxin, HE Yucheng, *et al.* Secrecy performance of transmit antenna selection for MIMO relay systems with outdated CSI[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(2): 546-559. DOI: 10. 1109/TCOMM. 2017. 2747554.

[7] 沈振汉, 黄华灿. B3G 小区间干扰抑制技术[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2011, 32(2): 165-168. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2011. 02. 0165.

[8] LI Chunguo, LIU Peng, ZOU Chao, *et al.* Spectral-efficient cellular communications with coexistent one-and two-hop transmissions[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8): 6765-6772. DOI: 10. 1109/TVT. 2015. 2472456.

[9] DONG Lun, HAN Zhu, PETROPULU A P, *et al.* Improving wireless physical layer security via cooperating relays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(3): 1875-1888. DOI: 10. 1109/TSP. 2009. 2038412.

[10] CHEN Gaojie, GONG Yu, JONATHON A C. Physical layer network security in the full-duplex relay system[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2015, 10(3): 574-583. DOI: 10. 1109/TIFS. 2015. 2390136.

[11] SURaweera H A, KRIKIDIS I, ZHENG Gan, *et al.* Low-complexity end-to-end performance optimization in MI-

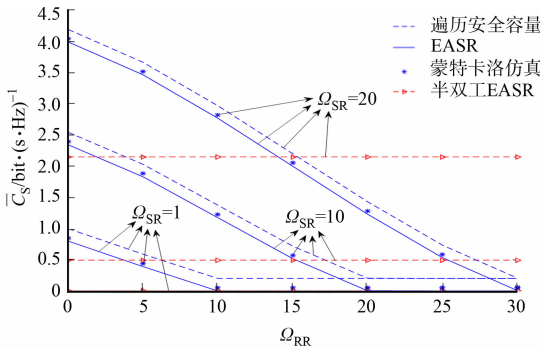


图 4 不同  $\Omega_{SR}$  下遍历可达安全速率随  $\Omega_{RR}$  变化的趋势

Fig. 4 EASR with  $\Omega_{RR}$  tends under conditions different  $\Omega_{SR}$



- MO full-duplex relay systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 913-927. DOI: 10.1109/TWC. 2013. 122313. 130608.
- [12] RIIHONEN T, WERNER S, WICHMAN R. Mitigation of loopback self-interference in full-duplex MIMO relays [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2011, 59(12): 5983-5993. DOI: 10. 1109/TSP. 2011. 2164910.
- [13] XU Jie, ZHANG Rui. Throughput optimal policies for energy harvesting wireless transmitters with non-ideal circuit power[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(2): 322-332. DOI: 10. 1109/JSAC. 2014. 141212.
- [14] LUO Shixin, ZHANG Rui, LIM T J. Optimal save-then-transmit protocol for energy harvesting wireless transmitters[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(3): 1196-1207. DOI: 10. 1109/TWC. 2013. 012413. 120488.
- [15] ZHONG Caijun, SURAWEEERA H A, ZHENG Gan, *et al.* Wireless information and power transfer with full duplex relaying[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(10): 3447-3461. DOI: 10. 1109/TCOMM. 2014. 2357423.
- [16] XING Hong, LIU Liang, ZHANG Rui. Secrecy wireless information and power transfer in fading wiretap channel [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(1): 180-190. DOI: 10. 1109/TVT. 2015. 2395725.
- [17] YING Bi, HE Chen. Accumulate and jam: Towards secure communication via a wireless-powered full-duplex jammer[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(8): 1538-1550. DOI: 10. 1109/JSTSP. 2016. 2600523.
- [18] LIU Hongwu, KIM K J, KWAK K S, *et al.* Power splitting-based SWIPT with decode-and-forward full-duplex relaying[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(11): 7561-7577. DOI: 10. 1109/TWC. 2016. 2604801.
- [19] KRIKIDIS I, CHARALAMBOUS T, THOMPSON J S. Buffer-aided relay selection for cooperative diversity systems without delay constraints[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(5): 1957-1967. DOI: 10. 1109/TWC. 2012. 032712. 111970.
- [20] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series, and products[M]. New York: Academic Press, 2007.
- [21] RECKTENWALD G W. Numerical methods with MATLAB: Implementation and application[M]. United States: Prentice Hall, 2000.
- [22] LI Yuanjian, ZHAO Rui, WANG Yi, *et al.* Artificial noise aided precoding with imperfect CSI in full-duplex relaying secure communications[J]. IEEE Access, 2018, 6(7): 44107-44119. DOI: 10. 1109/ACCESS. 2018. 2851598.
- [23] LI Yuanjian, ZHAO Rui, FAN Lisheng, *et al.* Antenna mode switching for full-duplex destination-based jamming secure transmission[J]. IEEE Access, 2018, 6(1): 9442-9453. DOI: 10. 1109/ACCESS. 2018. 2791638.
- [24] TAN Xing, ZHAO Rui, LI Yuanjian. Large-scale antennas analysis of untrusted relay system with cooperative jamming[C]//International Conference on Network and Service Management, IEEE Computer Society. Tokyo: IEEE Press, 2017: 26-30. DOI: 10. 23919/CNSM. 2017. 8256012.
- [25] NIE Zhiqiao, ZHAO Rui, LI Yuanjian, *et al.* A full-duplex SWIPT relaying protocol based on discrete energy state [C]//IEEE 20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications. Bali: IEEE Press, 2017: 500-505. DOI: 10. 1109/ WPMC. 2017. 8301864.
- [26] LI Chunguo, WANG Jue, ZHENG Fuchun, *et al.* Overhearing based cooperation for two-cell network with asymmetric uplink-downlink traffics[J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, 2016, 2(3): 350-361. DOI: 10. 1109/TSIPN. 2016. 2549179.
- [27] LI Chunguo, HYUN J Y, SUN Fan, *et al.* Multiuser overhearing for cooperative two-way multiantenna relays[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(5): 3796-3802. DOI: 10. 1109/TVT. 2015. 2441879.

(编辑: 李宝川

责任编辑: 黄晓楠

英文审校: 吴逢铁)