

## 射频能量采集非可信中继网络中物理层安全传输

杨炜伟<sup>1</sup>, 陈 剑<sup>1</sup>, 陈德川<sup>1,2,3</sup>

(1. 陆军工程大学通信工程学院, 江苏南京 210007; 2. 武汉中原电子集团有限公司, 湖北武汉 430010;  
3. 武汉中元通信股份有限公司, 湖北武汉 430205)

**摘 要:** 射频能量采集技术为能量受限无线通信系统提供了一种有效的能量供给方式. 假设能量受限中继节点具有射频能量采集能力, 本文设计了中继非可信情况下的物理层安全传输方案, 配置多天线的源节点采用发送天线选择策略来增强中继节点的能量采集性能, 目的节点发送人工干扰来抑制非可信中继对保密信息的窃听. 在瑞利块衰落信道条件下研究了所提方案的物理层安全性能, 推导了系统安全中断概率、连接中断概率和安全吞吐量的闭式表达式. 计算机仿真验证了理论推导的正确性, 揭示了各系统参数对物理层安全性能的影响关系.

**关键词:** 射频能量采集; 非可信中继; 物理层安全; 安全吞吐量

**中图分类号:** TN92      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2019)08-1792-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.08.024

## Physical Layer Secure Transmission in RF-Powered Energy Harvesting Untrusted Relay Networks

YANG Wei-wei<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>1</sup>, CHEN De-chuan<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Communication Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing, Jiangsu 210007, China;  
2. Wu Han Zhong Yuan Electronics Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430010, China;  
3. Wu Han Zhong Yuan Communication Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430205, China)

**Abstract:** Wireless energy harvesting is regarded as a promising energy supply alternative for energy-constrained wireless networks. In this paper, we investigate secure transmission in RF-powered energy harvesting relay networks, where an energy-constrained relay is untrusted. Considering that the energy-constrained relay can harvest energy from RF signals to forward the confidential messages, the source node with multiple antenna employs transmit antenna selection (TAS) to enhance the energy harvesting efficiency of the relay, and the destination node employs artificial interference to enhance security. Closed-form expressions of the secrecy outage probability, connection outage probability and secrecy throughput have been derived. Numerical results verify the accuracy of analytical expressions, and reveal the influence of the system parameters on the secrecy performance.

**Key words:** RF-powered energy harvesting; untrusted relay; physical layer security; secrecy throughput

### 1 引言

诸如无线传感器网络、无线定位网络和物联网等能量受限无线通信系统大都采用电池供电, 有限的电池容量往往成为系统性能瓶颈. 特别是, 在一些不便于电池更换的应用场景中, 如植入人体或建筑物内节点等, 能量受限更是直接影响系统的使用. 因此, 人们相继提出各种绿色节能技术. 其中, 射频能量采集技术具有许多性能优势, 逐渐受到了学界广泛重视. 一方面, 射频信号作为信息载体广泛存在于各种无线通信中. 另一方面, 射频信号可作为天然的能量源, 通过射频能量采集驱动能量受限节点. 因此, 结合射频能量采集和无线

信息传输的无线携能通信系统, 能在相同的射频信号上同时承载能量和信息, 通过接收端不同的处理能够实现能量采集和信息解码. 文献[1]和[2]提出了无线携能通信系统理想结构, 但其在接收端同时进行能量采集和信息解码, 难以在实际电路设计中实现. 随后, 文献[3]设计了便于实现的收发结构, 在时间或功率维度上切换能量采集和信息收发.

近年来, 人们将无线携能通信技术和协同中继技术相结合, 改善能量受限无线通信系统的信息传输和能量采集性能, 各种射频能量采集网络模型和相应的传输协议被相继提出<sup>[4-6]</sup>. 然而, 这些研究主要针对传输可靠性和能量采集性能进行系统设计和优化,

并没有考虑无线通信系统的安全性问题. 由于无线传输媒介的开放性, 射频能量采集中继网络在提高频谱和能量效率的同时, 也带来了严重的安全威胁. 除了传统基于计算复杂性的加解密体制外, 学界也将基于信息论安全的物理层安全技术应用于射频能量采集网络中<sup>[7-9]</sup>, 各种预编码、中继选择、人工干扰等信号处理和资源配置技术被用于增强系统的物理层安全性能<sup>[10-12]</sup>. 然而这些研究并没有考虑射频能量采集中继网络中存在非可信中继节点时的安全传输问题. 基于时间切换协议和功率切换协议, 文献[13]研究了单天线三节点能量采集非可信中继网络的安全中断概率. 但是现有的研究中还未考虑到的多天线射频能量采集非可信中继网络中物理层安全传输问题.

本文研究了源节点配置多天线的无线中继网络中物理层安全传输问题, 考虑能量受限的中继节点是非可信的且能够采集射频信号的能量用于信息转发. 本文设计了时间切换传输协议下系统的物理层安全传输方案, 源节点采用发送天线选择策略来增强能量受限中继节点的能量采集性能, 目的节点发送人工干扰来抑制非可信中继对信息的窃听. 在瑞利块衰落信道下, 分析了系统的物理层安全性能, 推导了安全中断概率和连接中断概率的闭式表达式, 进而得到了安全吞吐量性能. 计算机仿真验证了理论推导的正确性, 揭示了各系统参数对物理层安全性能的影响关系.

## 2 系统和信道模型

考虑典型三节点中继网络模型, 源节点  $S$  配置  $N$  根天线, 中继节点  $R$  和目的节点  $D$  均配置单天线, 假设  $S$  和  $D$  之间由于深衰落或严重遮挡无法直接通信,  $R$  采用放大转发策略辅助  $S$  向  $D$  传输保密信息.  $R$  为能量受限的节点, 但具有射频能量采集能力, 可以将接收到的射频信号转换成自身的能量, 用于信息转发. 考虑  $R$  为非可信节点, 在通信过程中会窃取来自源节点的保密信息, 本文主要研究此种情况下如何进行安全传输的问题, 即射频能量采集非可信中继网络中物理层安全传输方案设计和性能分析.

假设  $S$  第  $i$  根天线和  $R$  之间、 $R$  和  $D$  之间的通信链路经历独立的准静态瑞利块衰落, 且无线链路在相关时间  $T$  内保持不变. 时间  $T$  内信道参数可以建模成独立复高斯随机变量  $h_{s,r}$  和  $h_{r,d}$ , 其信道增益  $|h_{s,r}|^2$  和  $|h_{r,d}|^2$  分别服从均值为  $\bar{\gamma}_{sr}$  和  $\bar{\gamma}_{rd}$  的指数分布. 同时, 假设所有通信链路中接收端都受到均值为 0、方差为  $N_0$  的加性高斯白噪声影响, 且所有节点均工作于半双工模式. 为了简化分析, 假设中继节点仅用利用射频能量采集获得的能量来转发信息. 这主要是考虑到中继节点是能量受限且自私的, 仅会在不损失自身能量的情况下辅

助源节点和目的节点通信.

本文中采用如下时间切换能量采集和信息传输策略: 将每个时长为  $T$  的传输过程分为三个子时隙, 在时长为  $\alpha T$  的第一个子时隙中,  $S$  采用发送天线选择策略选择最优发射天线和  $D$  同时向  $R$  发送射频信号用于  $R$  采集能量, 其中  $0 < \alpha < 1$  为能量采集和信息传输的时间切换因子. 将剩下的  $(1 - \alpha)T$  时间等分, 在时长为  $(1 - \alpha)T/2$  的第二个子时隙中,  $S$  选择最优发送天线向  $R$  发送信息, 同时, 为了增强系统的物理层安全性能,  $D$  向  $R$  发送人工干扰用于抑制非可信中继  $R$  窃听信息. 在时长为  $(1 - \alpha)T/2$  的第三个子时隙中,  $R$  利用之前采集到的能量将收到的信息转发给  $D$ , 完成一个传输过程.

为了公平比较  $D$  发送人工干扰对物理层安全性能的影响, 假定整个传输系统的总功率为  $P$ ,  $S$  的发射功率为  $\beta P$ ,  $D$  的发射功率为  $(1 - \beta)P$ ,  $0 < \beta < 1$  为  $S$  和  $D$  间的功率分配因子. 多天线源节点利用发送天线选择策略, 从  $N$  根天线中选择最优发射天线传输能量, 其天线序号为

$$i^* = \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq N} |h_{s,r}|^2 \quad (1)$$

在第一个子时隙中, 中继节点采集的能量为

$$E_h = \eta \alpha T (\beta P |h_{s,r}|^2 + (1 - \beta)P |h_{dr}|^2) \quad (2)$$

由上式可知, 通过在源节点采用最优发射天线传输能量可以有效利用多天线分集增益, 提高中继节点处的能量采集性能.

在第二个时隙中,  $S$  首先采用固定速率的 Wyner 安全编码方案对要发送保密信息进行安全编码, 该编码方案主要包含两个速率参数即码元传输速率  $R_0$  和安全信息速率  $R_s$ , 其中正的速率  $R_e = R_0 - R_s$  作为保护信息的冗余速率. 然后,  $S$  将编码收的信息进行符号映射后利用最优发射天线  $i^*$  发送出去. 同时, 为了增强系统的物理层安全性能,  $D$  向  $R$  发送人工干扰信号, 则中继节点接收到的信号可以表示为

$$y_r = h_{s,r} x_s + h_{r,d} z + n_r \quad (3)$$

其中  $x_s$  是源节点向中继发送的功率为  $\beta P$  的信号,  $z$  是目的节点向中继发送的功率为  $(1 - \beta)P$  的人工干扰信号,  $n_r$  是中继节点处加性高斯白噪声. 本文中假设信道满足互异性, 即  $h_{rd} = h_{dr}$ .

在第三个子时隙中,  $R$  利用在第一个子时隙中采集到的能量将收到的信息放大转发给  $D$ . 因此, 中继节点转发功率为

$$P_r = \frac{2\eta\alpha(\beta P |h_{s,r}|^2 + (1 - \beta)P |h_{dr}|^2)}{1 - \alpha} \quad (4)$$

其中  $0 < \eta < 1$  为能量转换效率因子. 考虑  $R$  采用变增益放大转发协议, 放大转发因子为  $1/\sqrt{\beta P |h_{s,r}|^2 + (1 - \beta)P |h_{dr}|^2 + N_0}$ , 则  $D$  接收到的信号  $y_r$  可以表示为

$$y_D = \frac{\sqrt{P_r} h_{S,R} h_{RD} x_S + \sqrt{P_r} h_{RD} n_R}{\sqrt{\beta P |h_{S,R}|^2 + (1-\beta)P |h_{DR}|^2 + N_0}} + n_D \quad (5)$$

其中  $n_D$  为目的节点  $D$  处加性高斯白噪声. 式中假设在  $D$  处已采用自干扰消除技术将自己发送的人工干扰项完全去除.

### 3 性能分析

#### 3.1 安全中断概率

根据式(3), 在第二个子时隙  $S-R$  链路的互信息量可以表示为

$$I_R = \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{\beta P |h_{S,R}|^2}{(1-\beta)P |h_{DR}|^2 + N_0} \right) \quad (6)$$

则安全中断概率可以表示为

$$P_{so} = \Pr[I_R > R_e] = \Pr \left[ \frac{\beta P |h_{S,R}|^2}{(1-\beta)P |h_{DR}|^2 + N_0} > t_1 \right] \\ = 1 - \sum_{r=0}^N \frac{(-1)^r C_N^r \bar{\gamma}_{SR} \beta e^{-\frac{t_1 N_r}{\beta P \gamma_{SR}}}}{\bar{\gamma}_{SR} \beta + \bar{\gamma}_{RD} t_1 (1-\beta)} \quad (7)$$

其中  $t_1 = 2^{2R_e - 2R_s} - 1$ ,  $C_N^n = \frac{N!}{(N-n)! n!}$ .

公式(7)揭示了安全中断概率与  $S-R$  和  $R-D$  链路的质量、功率分配因子  $\beta$  以及等效发送信噪比  $\lambda = P/N_0$  之间的定量关系. 由式(7)可知, 安全中断概率  $P_{so}$  不受能量采集和信息传输协议中的时间切换因子  $\alpha$  的影响, 而随着功率分配因子  $\beta$  的减小而减小, 这说明由于采用了目的节点发送人工干扰, 系统的安全性随着人工干扰信号功率的增加而增强. 这是因为分配给干扰信号的功率越大, 对中继节点的干扰就越大, 非可信中继节点越不容易窃听到信源节点发送的私密信息.

#### 3.2 连接中断概率

根据式(5), 第三个子时隙结束后  $S-R-D$  链路的等效互信息量可以近似表示为

$$I_D \approx \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{2\eta\alpha\beta P |h_{S,R}|^2 |h_{DR}|^2}{2\eta\alpha N_0 |h_{DR}|^2 + (1-\alpha)N_0} \right) \quad (8)$$

其中近似相等是由于推导过程中忽略噪声功率的二阶项  $(1-\alpha)N_0^2$ , 这种近似处理简化了公式推导的复杂度, 在中高信噪比情况下基本不会影响结果, 计算机仿真中也得到了验证.

所以连接中断概率可以进一步推导如下

$$P_{co} = \Pr[I_D < R_0] \\ = \int_0^\infty \left[ 1 - e^{-\left(\frac{N_0 R_0}{\beta P \gamma_{SR}} + \frac{N_0(1-\alpha)t_2}{2\eta\alpha\beta P \gamma_{SR}}\right)} \right]^N \frac{e^{-\frac{y}{\gamma_{RD}}}}{\gamma_{RD}} dy \\ = 1 + \sum_{r=1}^N (-1)^r C_N^r e^{-\frac{t_2 N_r}{\beta P \gamma_{SR}}} \sqrt{\frac{2t_2 N_0 (1-\alpha) r}{\gamma_{SR} \gamma_{RD} \eta \alpha \beta P}} \\ K_1 \left( \sqrt{\frac{2t_2 N_0 (1-\alpha) r}{\gamma_{SR} \gamma_{RD} \eta \alpha \beta P}} \right) \quad (9)$$

其中  $t_2 = 2^{2R_0} - 1$ , 等式  $a$  利用了[14]中公式(3.324.1).

公式(9)揭示了连接中断概率与  $S-R$  和  $R-D$  链路的质量、时间切换因子  $\alpha$ 、功率分配因子  $\beta$  以及等效发送信噪比  $\lambda = P/N_0$  之间的定量关系. 从表达式(9)中可以得出连接中断概率  $P_{co}$  随着  $\alpha$  的增大而减小, 这是主要由于系统的可靠性随着中继节点的发送功率的增大而增强. 另一方面, 连接中断概率  $P_{co}$  随着  $\beta$  的增大而减小, 这是主要由于  $\beta$  的增大, 更多的功率用于发送保密信息, 因此传输可靠性更高.

#### 3.3 安全吞吐量

安全吞吐量指安全信息速率与信息既安全又可靠传输的概率的乘积, 可用来综合衡量该通信系统的安全性、有效性和可靠性. 系统的安全吞吐量可以表示为

$$\zeta = \frac{(1-\alpha)R_s}{2} \cdot \Pr[I_R < R_e, I_D > R_0] \\ \approx \frac{(1-\alpha)R_s}{2} \cdot \Pr \left[ \frac{\beta P |h_{S,R}|^2}{(1-\beta)P |h_{DR}|^2 + N_0} < t_1, \right. \\ \left. \frac{2\eta\alpha\beta P |h_{S,R}|^2 |h_{DR}|^2}{2\eta\alpha N_0 |h_{DR}|^2 + (1-\alpha)N_0} > t_2 \right] \\ = \frac{(1-\alpha)R_s}{2} \cdot \left\{ \sum_{r=0}^N \frac{(-1)^r C_N^r \bar{\gamma}_{SR}}{\beta \gamma_{SR} + t_1(1-\beta)r \gamma_{RD}} e^{-\left(\frac{t_1 N_r}{\beta P \gamma_{SR}} + \frac{t_1(1-\beta)r}{\beta \gamma_{SR}} + \frac{u}{\gamma_{RD}}\right)} \right. \\ \left. - \sum_{r=0}^N \sum_{m=0}^{\infty} \left[ \frac{t_2 N_0 (\alpha-1) r^m}{2\eta\alpha\beta P \gamma_{SR} \gamma_{RD}} \right] \frac{(-1)^r C_N^r e^{-\frac{t_1 N_r}{\beta P \gamma_{SR}}} \Gamma\left(1-m, \frac{u}{\gamma_{RD}}\right)}{m!} \right\} \quad (10)$$

其中  $u = \frac{b + \sqrt{b^2 + 4ac}}{2a}$ ,  $b = 2(t_2 - t_1)\eta\alpha N_0$ ,  $a = 2t_1\eta\alpha(1-\beta)P$ ,  $c = t_2(1-\alpha)N_0$ .

证明: 令  $X = |h_{S,R}|^2$ ,  $Y = |h_{DR}|^2$ , 那么我们可以得到

$$\zeta \approx \frac{(1-\alpha)R_s}{2} \cdot \Pr \left[ X < \frac{t_1 N_0 + t_1(1-\beta)PY}{\beta P}, \right. \\ \left. X > \frac{t_2 2\eta\alpha N_0 Y + t_2(1-\alpha)N_0}{2\eta\alpha\beta PY} \right] \quad (11)$$

当且仅当  $Y > u$  时满足

$$\frac{t_2 2\eta\alpha N_0 Y + t_2(1-\alpha)N_0}{2\eta\alpha\beta PY} < X < \frac{t_1 N_0 + t_1(1-\beta)PY}{\beta P},$$

所以可以进一步的得到

$$\zeta = \frac{(1-\alpha)R_s}{2} \cdot \left\{ \int_u^\infty \underbrace{\left[ 1 - e^{-\frac{t_1 N_0 + t_1(1-\beta)PY}{\beta P \gamma_{SR}}} \right]}_{\Psi_1} \frac{e^{-\frac{y}{\gamma_{RD}}}}{\gamma_{RD}} dy \right. \\ \left. - \int_u^\infty \underbrace{\left[ 1 - e^{-\frac{2t_2 \eta \alpha N_0 Y + t_2 N_0 (1-\alpha)}{2\eta\alpha\beta P \gamma_{SR} Y}} \right]}_{\Psi_2} \frac{e^{-\frac{y}{\gamma_{RD}}}}{\gamma_{RD}} dy \right\}.$$

对  $\Psi_1$  直接化简积分即可得到

$$\Psi_1 = \sum_{r=0}^N \frac{(-1)^r C_N^r \bar{\beta} \bar{\gamma}_{SR}}{\beta \bar{\gamma}_{SR} + t_1(1-\beta)r\bar{\gamma}_{RD}} e^{-\left(\frac{t_1 N_r}{\beta \bar{\gamma}_{SR}} + \frac{t_1(1-\beta)r}{\beta \bar{\gamma}_{SR}} + \frac{u}{\bar{\gamma}_{RD}}\right)}$$

对  $\Psi_2$  化简可以得到

$$\Psi_2 = \sum_{r=0}^N \frac{(-1)^r C_N^r e^{-\frac{t_1 N_r}{\beta \bar{\gamma}_{SR}}}}{\bar{\gamma}_{RD}} \int_u^\infty e^{-\frac{t_1 N_r(1-\alpha)r}{2\eta\alpha\beta\bar{\gamma}_{SR}} - \frac{y}{\bar{\gamma}_{RD}}} dy$$

利用式  $e^x = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{x^m}{m!}$  和 [14] 中公式(3.381.3) 即可得

$$\Psi_2 = \sum_{r=0}^N \sum_{m=0}^{\infty} \left[ \frac{t_1 N_r (\alpha - 1) r}{2\eta\alpha\beta\bar{\gamma}_{SR}\bar{\gamma}_{RD}} \right]^m \frac{(-1)^r C_N^r e^{-\frac{t_1 N_r}{\beta \bar{\gamma}_{SR}}} \Gamma\left(1 - m, \frac{u}{\bar{\gamma}_{RD}}\right)}{m!}$$

证毕.

从表达式(10)可以得到,系统既安全又可靠传输的概率随着  $\alpha$  的增大而增大,但是系统有效的通信时间随着  $\alpha$  的增大而减小,所以存在最优的时间分配因子  $\alpha$  使得系统安全吞吐量最大化.类似地,当  $\beta$  较小时,随着  $\beta$  增大源节点的发射功率增加,提高了传输可靠性,系统安全吞吐量得到提升;当  $\beta$  较大时,随着  $\beta$  增大目的节点发送人工干扰的功率减小,减小了系统的安全吞吐量.因此存在最优功率分配因子  $\beta$  使得系统安全吞吐量最大化.

#### 4 仿真分析

本小节通过进行 Monte Carlo 仿真验证理论分析的正确性和物理层安全传输方案的有效性.仿真参数设置为  $R_0 = 2\text{bit/s/Hz}$ ,  $R_s = 1\text{bit/s/Hz}$ ,  $\eta = 0.5$ ,  $\bar{\gamma}_{SR} = 5\text{dB}$ ,  $\bar{\gamma}_{RD} = 25\text{dB}$ ,  $P/N_0 = 10\text{dB}$ .从图中可知, Monte Carlo 仿真值和理论分析的结果基本重合,验证了分析结果的正确性.

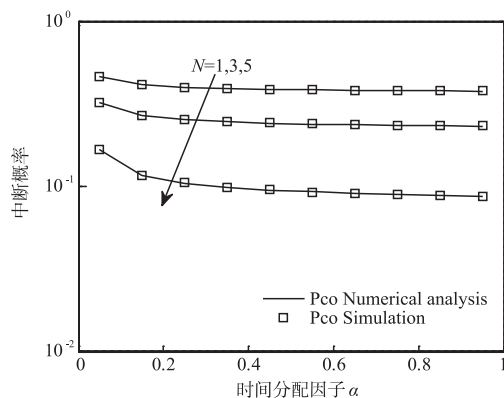


图1 连接中断概率随 $\alpha$ 变化示意图

图 1 和图 2 给出了连接中断概率  $P_{co}$  和安全中断概率  $P_{so}$  随着时间分配因子  $\alpha$  和功率分配因子  $\beta$  的变化关系,仿真中分别考虑了源节点发送天线数  $N = 1, 3, 5$  三种情况,图 1 中设置  $\beta = 0.5$ ,图 2 中设置  $\alpha = 0.5$ .从图 1 中可知,连接中断概率随  $P_{co}$  随着  $\alpha$  的增大而减小,这是主要由于中继节点随着  $\alpha$  的增大可以采集更多的能量,因此系统的可靠性随着中继节点的发送功率的增

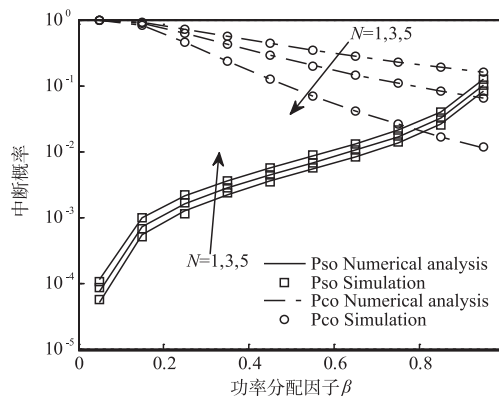


图2 连接中断概率和安全中断概率随 $\beta$ 变化示意图

大而增强.此外,  $P_{so}$  随着  $N$  的增大而减小,这是由于在能量采集子时隙和源-中继信息传输子时隙,  $N$  越大发送天线选择传输能够获得的分集增益越大,既提高了中继节点处获取的能量,增加了中继转发的发送功率,又改善了源到中继信息传输的可靠性.从图 2 中可以看出,  $P_{so}$  随着  $\beta$  的增大而减小,这是由于  $\beta$  的增大,更多的功率用于发送保密信息,因此传输可靠性更高.在同样的  $\beta$  设置下,  $N$  越大能够得到的分集增益越大,连接中断概率性能也越好.另一方面,安全中断概率  $P_{so}$  随着  $\beta$  的增大而增大,这主要是由于  $\beta$  的增大用于发送人工干扰的功率就越小,不利于系统的安全性能.

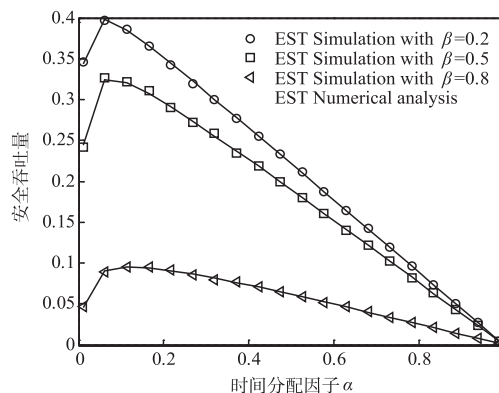
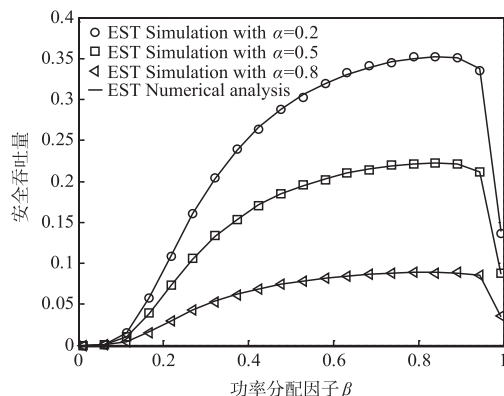


图3 安全吞吐量随 $\alpha$ 变化示意图

图 3 和图 4 分别显示了系统安全吞吐量随着时间分配因子  $\alpha$  和功率分配因子  $\beta$  的变化关系,仿真中设置源节点天线数为  $N = 3$ .从图 3 中我们可以看到安全吞吐量先随  $\alpha$  的增大而增大,然后随着  $\alpha$  的进一步增大而减小,显然存在最优的时间分配因子使得系统的安全吞吐量最大化.这是因为,当  $\alpha$  较小时,中继节点采集射频信号能量的时间不足,导致采集的能量不足以构建一条安全可靠的通信链路;当  $\alpha$  较大时,系统有效的通信时间  $(1 - \alpha)T/2$  较小,所以导致系统的安全吞吐量较低.如图 4 所示,安全吞吐量先随  $\beta$  的增大而增大,然后随着  $\beta$  的进一步增大而减小,表明存在最优的功率分配因子使得系统

图4 安全吞吐量随功率 $\beta$ 变化示意图

的安全吞吐量最大化. 这是因为, 当 $\beta$ 较小时, 源节点的发射功率较小, 所以系统安全吞吐量较小; 当 $\beta$ 较大时, 目的节点发送功率较小, 影响了人工干扰信息的发送. 使得私密信息遭受窃听的概率增大, 系统的安全性能降低, 所以此时系统的安全吞吐量也较小.

## 5 小结

本文在源节点处采用发送天线选择策略来增强到能量受限中继节点的能量采集性能, 在目的节点采用人工干扰来抑制非可信中继对信息的窃听, 增强了多天线射频能量采集非可信中继网络中物理层安全性能. 理论分析和计算机仿真揭示了系统性能与时间分配因子 $\alpha$ 和功率分配因子 $\beta$ 的定量关系, 存在最优的 $\alpha$ 和 $\beta$ 使得系统的安全吞吐量最大化, 这为优化设计系统参数提供了基础.

## 参考文献

- [1] Varshney L R. Transporting information and energy simultaneously [A]. in Proc. IEEE ISIT [C], Toronto, on, Canada, Jul. 2008. 1612 – 1616.
- [2] Grover P, Sahai A. Shannon meets Tesla: Wireless information and power transfer [A]. in Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory [C], Austin, TX, USA, Jun. 13-18, 2010. 2363-2367.
- [3] Zhou X, Zhang R, Ho C K. Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff [J]. IEEE Trans. Commun., Nov. 2013, 61(11): 4754 – 4767.
- [4] Nasir A A, Zhou X, Durrani S, Kennedy R A. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., July 2013, 12(7): 3622 – 3636.
- [5] Ding Z, Perlaza S M, Esnaola I, Poor H V. Power allocation strategies in energy harvesting wireless cooperative networks [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., Feb. 2014, 13(2): 846 – 860.

- [6] Nasir A A, Zhou X, Durrani S, Kennedy R A. Wireless-powered relays in cooperative communications: Time-switching relaying protocol and throughput analysis [J]. IEEE Trans. Commun., May 2015, 63(5): 1607 – 1622.
- [7] Xing H, Liu L, Zhang R. Secrecy wireless information and power transfer in fading wiretap channel [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., Jan. 2016, 65(1): 180 – 190.
- [8] Shi Q, Xu W, Wu J, Song E, Wang Y. Secure beamforming for MIMO broadcasting with wireless information and power transfer [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., May 2015, 14(5): 2841 – 2853.
- [9] Li Q, Zhang Q, Qin J. Secure relay beamforming for simultaneous wireless information and power transfer in non-regenerative relay networks [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., June 2014, 63(5): 2462 – 2467.
- [10] Yang W, Tao L, et al. Secure on-off transmission in mm-Wave systems with randomly distributed eavesdroppers [J]. IEEE Access, Dec. 2019, 7(1): 32681 – 32692.
- [11] Xiang Z, Yang W, Pan G, Cai Y, Song Y. Physical layer security in cognitive radio inspired NOMA network [J]. IEEE J. Sel. Topics in Signal Process, 2019, 13(3): 1-14, Early Access, doi:10.1109/jstsp.2019.2902103.
- [12] Sun X, Yang W, et al. Secure transmissions in wireless information and power transfer millimeter wave ultra-dense networks, IEEE Trans. Inf. Forensics Secur., 1-13, 2018, Early Access, doi:10.1109/tifs.2018.2885286.
- [13] Kalamkar S S, Banerjee A. Secure communication via a wireless energy harvesting untrusted relay [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., Mar. 2017, 66(3): 2199 – 2213.
- [14] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of Integrals, Series, and Products [M]. Academic Press, 8th ed., 2015.

## 作者简介



杨炜伟 男, 解放军陆军工程大学通信工程学院副教授, 博士, 主要研究方向移动通信、无线物理层安全、协同无线通信等.  
E-mail: wwyang1981@163.com

陈剑 男, 解放军陆军工程大学通信工程学院学员, 毕业设计研究方向非可信中继系统物理层安全传输.

陈德川 男, 解放军陆军工程大学通信工程学院博士生, 主要研究方向无线物理层安全、协同无线通信等.