窃听者随机分布 SWIPT-NOMA 系统的物理层安全

丁一凡，李光球，李辉
（杭州电子科技大学通信工程学院，浙江 杭州 310018）

摘　要：非正交多址接入（non-orthogonal multiple access，NOMA）与无线携能通信（simultaneous wireless information and power transfer，SWIPT）技术的组合可提高无线系统的频谱效率，并能够解决用户节点的电能供应问题。然而，当能量收集器要恶意窃听基站发送的机密信息时，SWIPT-NOMA 系统的信息安全传输会受到威胁，为增强其物理层安全（physical layer security，PLS）性能，提出了一种采用发射天线选择和功率分割策略的 SWIPT-NOMA 系统 PLS 模型。如果各能量收集器的空间位置随机分布服从泊松点过程，利用空间泊松分布生成函数推导 SWIPT-NOMA 系统的安全中断概率和非零安全容量概率近似表达式。数值计算与仿真结果表明，所推导的表达式具有很高的准确性，且可用于研究窃听者密度、基站与远近端信息接收者之间的距离、基站发射天线数以及功率分割因子等参数对 SWIPT-NOMA 系统 PLS 性能的影响。

关键词：非正交多址接入；无线携能通信；物理层安全；泊松点过程；安全中断概率
中图分类号：TN918.1
文献标志码：A
doi: 10.11959/j.issn.1000−0801.2022059

Physical layer security for SWIPT-NOMA system in presence of randomly located eavesdroppers

DING Yifan, LI Guangqiu, LI Hui
School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: The combination of non-orthogonal multiple access (NOMA) and simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) technologies can improve spectrum efficiency of wireless system and solve the power supply problem of user nodes. However, when energy-harvesting receivers want to maliciously eavesdrop on confidential information sent by the base station, the information security transmission of SWIPT-NOMA system will be threatened. To enhance its physical layer security (PLS) performance, the PLS model of SWIPT-NOMA system with transmit antenna selection and power split strategies was proposed. When the spatial location randomly distributed energy-harvesting receivers obey the Poisson point process, the approximate expressions for the secrecy outage probability and non-zero secrecy capacity probability of SWIPT-NOMA system were derived by using the spatial Poisson probability generation function. Numerical and simulation results verify the accuracy of the expressions. The above expressions can also be used to study the influence of eavesdropper density, the distance between the base station and the far and near information receivers, the number of transmitting antennas and the power split factor on PLS performance of SWIPT-NOMA system.

收稿日期：2021−12−07；修回日期：2022−03−10
通信作者：李光球，gqli@hdu.edu.cn

Key words: non-orthogonal multiple access, simultaneous wireless information and power transfer, physical layer security, Poisson point process, secrecy outage probability

0 引言

非正交多址接入（non-orthogonal multiple access，NOMA）系统利用叠加码、功率分配和串行干扰消除（successive interference cancellation，SIC）算法在相同的频带上同时为多个用户设备提供服务，比传统正交多址接入系统具有更高的频谱利用率，是 5G 系统中的关键技术之一[1]。文献[2]推导了多天线 NOMA 系统的遍历和速率闭合表达式。文献[3]通过最优中继选择来最大化协作 NOMA 系统的吞吐量，但在用户节点存在能量受限约束的 NOMA 应用场景中，其与无线携能通信（simultaneous wireless information and power transfer，SWIPT）技术相结合的 SWIPT-NOMA 系统能在有效解决用户节点电能供应问题的同时，获得高的系统频谱效率[4]。文献[5]通过将近端用户充当采用功率分割（power split，PS）策略的全双工能量收集中继器来最大化 SWIPT-NOMA 系统的遍历和速率。文献[6]推导了机会协作 SWIPT-NOMA 系统的中断概率闭合表达式。文献[7]推导了用户空间位置随机分布时的 SWIPT-NOMA 系统的中断概率和系统吞吐量闭合表达式。

然而，无线传输固有的广播特性使 NOMA、SWIPT-NOMA 系统的信息安全传输存在隐患[8]，物理层安全（physical layer security，PLS）具有不需要密钥、不受窃听端计算能力限制等优点，能够实现上述无线系统在信息论意义上的安全通信，因此受到广泛关注[9-21]。文献[9]推导了窃听者空间位置随机分布下多输入单输出无线系统在独立与合谋两种场景下的安全中断概率（secrecy outage probability，SOP）闭合表达式。文献[10]推导了利用人工噪声干扰提升 PLS 性能的窃听者随机分布多输入单输出无线系统的 SOP 闭合表达式。文献[11]推导了采用发射天线选择（transmit antenna selection，TAS）技术的多输入单输出 NOMA 系统的 SOP 闭合表达式。文献[12]进一步研究采用 TAS 技术来最小化窃听者信道容量下 NOMA 系统的 PLS 性能。文献[13]推导了近端用户充当中继节点的协作 NOMA 系统的 SOP 闭合表达式。文献[14]研究了解码转发协议下采用 TAS 技术的协作 NOMA 系统的 PLS 性能。文献[15]研究了基站辅助发送人工噪声干扰的大规模 NOMA 系统的 PLS 性能。文献[16]研究了采用 TAS 技术的多输入单输出 SWIPT 系统的 PLS 性能。文献[17]推导了 SWIPT 系统的 SOP、非零安全容量概率（non-zero secrecy capacity probability，NZSCP）和渐近 SOP 闭合表达式。文献[18]进一步推导窃听者空间位置随机分布下 SWIPT 系统在独立与合谋两种场景下的 SOP 闭合表达式，文献[17-18]中的能量收集器（energy-harvesting receiver，ER）均充当窃听者。文献[19]研究利用人工噪声干扰来提升 SWIPT-NOMA 系统的 PLS 性能。文献[20]推导了毫米波无人机 SWIPT-NOMA 系统的 SOP 和 NZSCP 闭合表达式。文献[21]研究了在保证远端用户服务质量和近端用户安全速率约束下 SWIPT-NOMA 系统的 PLS 性能。

在现有 SWIPT-NOMA 系统 PLS 的研究中，尚未有考虑 ER 充当窃听者的情形，此外文献[9]和文献[18]表明窃听者的空间位置仍可能是随机分布且数量是不可预知的，为此，本文进一步研究实际应用中 ER 空间位置及数目的不确定性对 SWIPT-NOMA 系统 PLS 的影响；鉴于 TAS 技术可以提高无线系统的 PLS 性能，提出一种采用 TAS 和 PS 策略的 SWIPT-NOMA 系统 PLS 模型，并推导其 SOP 和 NZSCP 近似表达式，之后通过仿真实验加以验证。

1　系统模型

TAS 和 PS 策略下 SWIPT-NOMA 系统的 PLS 模型如图 1 所示。该模型由一个基站 S、一个 NOMA 近端信息接收者（information receiver，IR）IR1、一个 NOMA 远端信息接收者 IR2 和多个随机分布在 S 及 IR1、IR2 周围的能量收集器 ER 组成，其中，S 配有 M 根发射天线并采用 TAS 技术发送机密信息，IR1、IR2 以及所有 ER 均配备单根天线。所有 ER 由信息解码和能量收集两部分构成[17]，且第 k 个 ER（ER_k）的功率分割因子为 $\beta_k\left(0\leqslant\beta_k\leqslant1\right)$，并在能量收集的同时独立窃听 S→IR1、S→IR2 链路上的机密信息。

考虑 S→IR1、S→IR2 及 S→ER_k 链路均遭受大尺度路径损耗以及小尺度衰落，则 IR1、IR2 和 ER_k 与 S 的相对位置会对相应链路的信道容量产生影响，进而对 SWIPT-NOMA 系统的信息安全传输产生影响。此场景下 SWIPT-NOMA 系统的物理层安全研究难点在于 ER 的空间位置及数目是不可预知的，本文借鉴文献[9]和文献[18]将 ER 的空间位置随机分布建模为泊松点过程以对 SWIPT-NOMA 系统的 PLS 性能进行分析，对该模型作出如下假设。

（1）IR1 以及每个 ER 均具备 SIC 技术，IR2 不具备 SIC 技术。

（2）S 的第 i 根发射天线与 IRm 之间的链路增益为 $h_{m,i}d_m^{-\alpha/2}$，其中，d_m 表示 S 与 IRm 之间的距离，$h_{m,i}$ 为 S→IRm 链路的信道衰落系数，$m\in\{1,2\}$，α 为路径损耗指数；S 的第 i 根发射天线与 ER_k 之间的窃听链路增益为 $g_{\mathrm{E},k}D_k^{-\alpha/2}$，$D_k$ 表示 S 与 ER_k 之间的距离，$g_{\mathrm{E},k}$ 为 S→ER_k 链路的信道衰落系数；$h_{m,i}$ 和 $g_{\mathrm{E},k}$ 均服从独立复高斯分布 $\mathcal{CN}(0,1)$。

（3）所有 ER 随机分布在以 S 为圆心、半径为 R 的圆形覆盖区域内，并建模为泊松分布密度为 ρ_{E} 的独立泊松点过程 Φ[18]；且每个 ER 可通过信息解码收到的机密信息完成对 IR1 或 IR2 的窃听。

2　传输过程

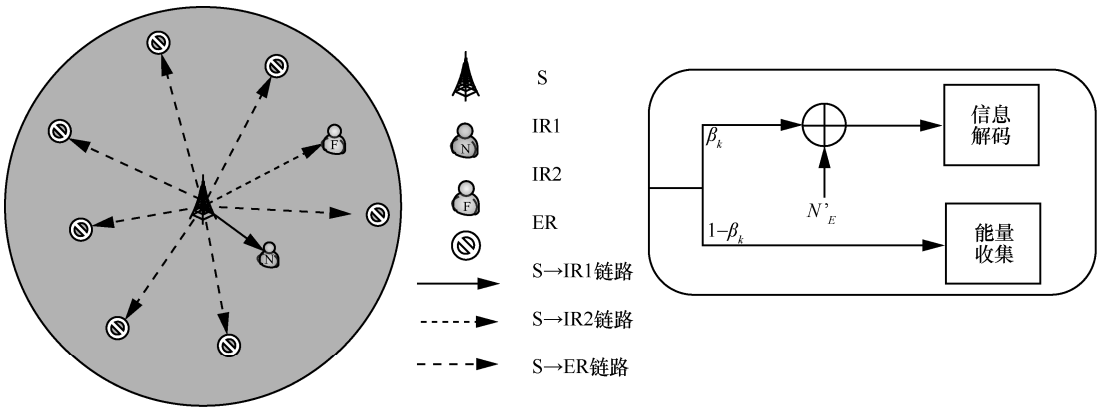
2.1　信息接收者 IR1 和 IR2

在图 1 所示的 SWIPT-NOMA 系统中，基站 S 发送复合信号 $\sqrt{\alpha_1P_{\mathrm{S}}}x_1+\sqrt{\alpha_2P_{\mathrm{S}}}x_2$ 至 IR1 和 IR2，其中，P_{S} 为基站发射功率，x_1 和 x_2 分别是 S 发送给 IR1 和 IR2 的信号，α_1 和 α_2 分别是 IR1 和 IR2 的功率分配系数，且 $\alpha_1+\alpha_2=1$，$\alpha_1<\alpha_2$。于是 IR1、IR2 接收到 S 的第 i 根发射天线的信号是：

$$y_{1,i}=h_{1,i}\left(\sqrt{\alpha_1P_{\mathrm{S}}d_1^{-\alpha}}x_1+\sqrt{\alpha_2P_{\mathrm{S}}d_1^{-\alpha}}x_2\right)+n_{1,i}\quad(1)$$

$$y_{2,i}=h_{2,i}\left(\sqrt{\alpha_1P_{\mathrm{S}}d_2^{-\alpha}}x_1+\sqrt{\alpha_2P_{\mathrm{S}}d_2^{-\alpha}}x_2\right)+n_{2,i}\quad(2)$$

其中，$n_{1,i}$ 和 $n_{2,i}$ 分别是 S→IR1 和 S→IR2 链路上



（a）系统模型　　（b）ER接收机结构

图 1　TAS 和 PS 策略下 SWIPT-NOMA 系统的 PLS 模型

的加性白高斯噪声（additive white Gaussian noise, AWGN），假定它们均服从 $\mathcal{CN}(0,N_0)$ 分布。

考虑 S 基于 IR1 的信道状态信息进行发射天线选择，即选取 S→IR1 链路中具有最大瞬时信干噪比（signal to interference-noise ratio，SINR）的天线发送机密信息。IR1 和 IR2 需各自解码出自己的信号 x_1 和 x_2，IR1 解码时先将 x_1 当作干扰，解码出 x_2，然后利用 SIC 技术去除 x_2 的影响，再解码出 S 发给自己的信号 x_1。因此 IR1 解码出 x_1 的最大瞬时 SINR 为：

$$\gamma_{\mathrm{I1}}=\max_{i\in\{1,\cdots,M\}}\left(\alpha_1\overline{\gamma}_{\mathrm{I}}\left|h_{1,i}\right|^2\Big/d_1^{\alpha}\right) \tag{3}$$

其中，$\overline{\gamma}_{\mathrm{I}}=P_{\mathrm{S}}/N_0$ 表示平均信噪比。$\left|h_{1,i}\right|^2$ 均服从指数分布，可推得 γ_{I1} 的概率密度函数（probability density function，PDF）为：

$$\begin{aligned}&f_{\mathrm{I1}}(x)=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\Pr\left(\max_{i\in\{1,\cdots,M\}}\left(\alpha_1\overline{\gamma}_{\mathrm{I}}\left|h_{1,i}\right|^2\Big/d_1^{\alpha}\right)<x\right)=\\&\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left(1-\exp\left(-\frac{d_1^{\alpha}x}{\alpha_1\overline{\gamma}_{\mathrm{I}}}\right)\right)^M=\\&\frac{d_1^{\alpha}M}{\alpha_1\overline{\gamma}_{\mathrm{I}}}\sum_{i=0}^{M-1}\binom{M-1}{i}(-1)^i\exp\left(-\frac{(i+1)d_1^{\alpha}x}{\alpha_1\overline{\gamma}_{\mathrm{I}}}\right)\end{aligned} \tag{4}$$

其中，$\Pr(\cdot)$ 表示求概率。

S 基于 IR1 进行发射天线选择时，IR2 相当于随机选取发射天线。IR2 解码时将 x_1 当作干扰，直接解码出 S 发给自己的信号 x_2，因此，IR2 解码出 x_2 时的瞬时 SINR 为：

$$\gamma_{\mathrm{I2}}=\frac{\alpha_2\left|h_{2,i}\right|^2}{\alpha_1\left|h_{2,i}\right|^2+d_2^{\alpha}/\overline{\gamma}_{\mathrm{I}}} \tag{5}$$

可得 γ_{I2} 的 PDF 表示为：

$$f_{\mathrm{I2}}(x)=\begin{cases}\dfrac{\alpha_2 d_2^{\alpha}}{\overline{\gamma}_{\mathrm{I}}(\alpha_2-\alpha_1 x)^2}\exp\left(-\dfrac{d_2^{\alpha}x}{\overline{\gamma}_{\mathrm{I}}(\alpha_2-\alpha_1 x)}\right),\\ x<\dfrac{\alpha_2}{\alpha_1}0,x\geqslant\dfrac{\alpha_2}{\alpha_1}\end{cases} \tag{6}$$

2.2 窃听者 ER

虽然 S 采用 TAS 技术，但窃听 $\mathrm{S}\rightarrow\mathrm{ER}_k$ 链路相当于一个单输入单输出系统，因此第 k 个 ER 的信息解码支路上接收到 S 发射的信号为：

$$y_{\mathrm{E},k}=\sqrt{\beta_k}\left(g_{\mathrm{E},k}\left(\sqrt{\alpha_1 P_{\mathrm{S}}D_k^{-\alpha}}x_1+\sqrt{\alpha_2 P_{\mathrm{S}}D_k^{-\alpha}}x_2\right)+n_{\mathrm{E},k}\right)+z_{\mathrm{E},k} \tag{7}$$

其中，$n_{\mathrm{E},k}$ 表示 S→ER 链路上的 AWGN，假定它服从 $\mathcal{CN}(0,N_{\mathrm{E}})$ 分布；$z_{\mathrm{E},k}$ 表示第 k 个 ER 信息解码支路上的 AWGN，假定它服从 $\mathcal{CN}\left(0,N_{\mathrm{E}}^{'}\right)$ 分布。

由于每个 ER 独立窃听 S→IR1 与 S→IR2 链路上的机密信息，因此只有 γ_{I2} 和 γ_{I1} 大于任意一个 ER 窃听 x_2 和 x_1 时的瞬时 SINR 才可保证信息的安全传输。ER 窃听 x_2 时将 x_1 当作干扰，窃听 x_1 时利用 SIC 技术去除 x_2 的影响，那么 ER 独立窃听 x_2 和 x_1 时输出最大的瞬时 SINR 分别为：

$$\gamma_{\mathrm{E2}}=\max_{k\in\Phi}\left(\frac{\alpha_2\left|g_{\mathrm{E},k}\right|^2}{\alpha_1\left|g_{\mathrm{E},k}\right|^2+D_k^{\alpha}/\rho}\right) \tag{8}$$

$$\gamma_{\mathrm{E1}}=\max_{k\in\Phi}\left(\alpha_1\rho\left|g_{\mathrm{E},k}\right|^2\Big/D_k^{\alpha}\right) \tag{9}$$

其中，$\rho=\beta_k P_{\mathrm{S}}/\left(\beta_k N_{\mathrm{E}}+N_{\mathrm{E}}^{'}\right)$。

令 $\overline{\gamma}_{\mathrm{E}}$ 为 $\mathrm{S}\rightarrow\mathrm{ER}_k$ 链路接收天线的平均信噪比，$N_{\mathrm{E}}^{'}=aN_{\mathrm{E}}$，$c_1=\alpha_1\beta_k/(\beta_k+a)$，有 $\alpha_1\rho=c_1\overline{\gamma}_{\mathrm{E}}$，则 ER 空间位置随机分布下 γ_{E1} 的累积分布函数（cumulative distribution function，CDF）表示为：

$$F_{\mathrm{E1}}(x)=\Pr(\gamma_{\mathrm{E1}}<x)=\Pr\left(\max_{k\in\Phi}\left(\left|g_{\mathrm{E},k}\right|^2\Big/D_k^{\alpha}\right)<\frac{x}{c_1\overline{\gamma}_{\mathrm{E}}}\right) \tag{10}$$

基于随机变量 $\left\{\left|g_{\mathrm{E},k}\right|^2;k\in\Phi\right\}$ 的独立性假定，式（10）可化简为式（11）：

$$F_{\mathrm{E1}}(x)=\mathbb{E}_{\Phi}\left[\prod_{k\in\Phi}\left(1-\exp\left(-D_k^{\alpha}x/(c_1\overline{\gamma}_{\mathrm{E}})\right)\right)\right] \tag{11}$$

其中，$\mathbb{E}_{\Phi}[\cdot]$ 表示求数学期望。为将 ER 泊松点过程以概率形式表现，利用空间泊松分布概率生成函数[9]：

$$\mathbb{E}_{\Phi}\left[\prod_{\Phi}f(x)\right]=\exp\left(-\rho_{\mathrm{E}}\int_0^{2\pi}\int_0^{R}r(1-f(x))\mathrm{d}r\mathrm{d}\theta\right) \tag{12}$$

其中，r,θ 表示 ER_k 空间位置的极坐标。令 $f(x)=1-\exp\left(-D_k^{\alpha}x/(c_1\overline{\gamma}_{\mathrm{E}})\right)$，并利用文献[18]中

的式（11）可推得 γ_{E1} 的 CDF 表示为：

$$F_{\mathrm{E1}}(x)=\exp\left(-\tau\left(\frac{c_1\overline{\gamma}_{\mathrm{E}}}{x}\right)^{2/\alpha}\left(\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right)-\Gamma\left(\frac{2}{\alpha},\frac{x}{c_1\overline{\gamma}_{\mathrm{E}}}R^{\alpha}\right)\right)\right) \tag{13}$$

其中，$\tau=2\pi\rho_{\mathrm{E}}/\alpha$，$\Gamma(\cdot,\cdot)$ 表示不完全伽马函数。

ER 空间位置随机分布下 γ_{E2} 的 CDF 表示为：

$$F_{\mathrm{E2}}(x)=\Pr(\gamma_{\mathrm{E2}}<x)=\Pr\left(\max_{k\in\Phi}\left(\left|g_{\mathrm{E},k}\right|^2/D_k^{\alpha}\right)<\frac{x}{(c_2-c_1x)\overline{\gamma}_{\mathrm{E}}}\right) \tag{14}$$

其中，$c_2=\alpha_2\beta_k/(\beta_k+a)$，$c_2\overline{\gamma}_{\mathrm{E}}=\alpha_2\rho$。

采用式（11）～式（13）相似的推导，可推得 γ_{E2} 的 CDF 为：

$$F_{\mathrm{E2}}(x)=\exp\left(-\tau\left(\frac{(c_2-c_1x)\overline{\gamma}_{\mathrm{E}}}{x}\right)^{2/\alpha}\cdot\left(\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right)-\Gamma\left(\frac{2}{\alpha},\frac{x}{(c_2-c_1x)\overline{\gamma}_{\mathrm{E}}}R^{\alpha}\right)\right)\right) \tag{15}$$

3　安全性能分析

S→IR1 和 S→IR2 链路的信道容量分别表示为：

$$C_{\mathrm{I1}}=\mathrm{lb}(1+\gamma_{\mathrm{I1}}) \tag{16}$$

$$C_{\mathrm{I2}}=\mathrm{lb}(1+\gamma_{\mathrm{I2}}) \tag{17}$$

能量收集器 ER 窃听 IR1 和 IR2 机密信息时的信道容量分别为：

$$C_{\mathrm{E1}}=\mathrm{lb}(1+\gamma_{\mathrm{E1}}) \tag{18}$$

$$C_{\mathrm{E2}}=\mathrm{lb}(1+\gamma_{\mathrm{E2}}) \tag{19}$$

3.1　安全中断概率

图 1 所示的 SWIPT-NOMA 系统的安全中断概率 SOP 可定义为 S→IR1 或 S→IR2 链路的安全容量小于目标安全速率 R_{S} 的概率，则 SWIPT-NOMA 系统的 SOP 表示为：

$$P=\Pr(C_{\mathrm{I1}}-C_{\mathrm{E1}}<R_{\mathrm{S}}\ \text{or}\ C_{\mathrm{I2}}-C_{\mathrm{E2}}<R_{\mathrm{S}})=1-(1-P_1)(1-P_2) \tag{20}$$

其中，$P_1=\Pr(C_{\mathrm{I1}}-C_{\mathrm{E1}}<R_{\mathrm{S}})$ 和 $P_2=\Pr(C_{\mathrm{I2}}-C_{\mathrm{E2}}<R_{\mathrm{S}})$ 分别为 IR1 和 IR2 的安全中断概率 SOP。令 $\theta=2^{R_{\mathrm{S}}}$，下面分别对 IR1 和 IR2 的 SOP 进行推导。

3.1.1　IR1 的 SOP

IR1 的 SOP 可近似为[9]：

$$P_1=\Pr(C_{\mathrm{I1}}-C_{\mathrm{E1}}<R_S)\simeq 1-\int_0^{\infty}f_{\mathrm{I1}}(x)F_{\mathrm{E1}}(x/\theta)\mathrm{d}x \tag{21}$$

令 $\upsilon_m=d_m^{\alpha}/\overline{\gamma}_{\mathrm{I}}$，$m\in\{1,2\}$，将式（4）和式（13）代入式（21）中可得 IR1 的 SOP 近似表达式为：

$$P_1=1-\frac{\upsilon_1 M}{\alpha_1}\sum_{i=0}^{M-1}\binom{M-1}{i}(-1)^i\cdot\int_0^{\infty}\exp\left(-\frac{(i+1)\upsilon_1 x}{\alpha_1}-\tau\left(\frac{\theta c_1\overline{\gamma}_{\mathrm{E}}}{x}\right)^{2/\alpha}\cdot\left(\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right)-\Gamma\left(\frac{2}{\alpha},\frac{x}{\theta c_1\overline{\gamma}_{\mathrm{E}}}R^{\alpha}\right)\right)\right)\mathrm{d}x \tag{22}$$

考虑 ER 的覆盖范围很大，即分布半径 $R\to\infty$ 的情形。当 $R\to\infty$ 时，$\exp\left(u(x)\cdot\Gamma\left(b,xR^{\alpha}\right)\right)$ 的渐近展开式可以表示为[9]：

$$\exp\left(u(x)\cdot\Gamma\left(b,xR^{\alpha}\right)\right)=1+u(x)\cdot o\left(R^{2-\alpha}x^{b-1}\mathrm{e}^{-xR^{\alpha}}\right) \tag{23}$$

其中，$o(\cdot)$ 表示高阶无穷小。再根据文献[9]的式（30）：

$$J(a,b,\mathrm{c})=\int_0^{\infty}\exp(-ax)\exp\left(-b/x^{c}\right)\mathrm{d}x=\frac{\sqrt{pq}}{a\cdot 2^{(p+2q-3)/2}\pi^{(p+2q-2)/2}}G_{0,p+2q}^{p+2q,0}\left(\frac{a^{2q}b^{p}}{p^{p}4^{q}q^{2q}}\middle|\begin{matrix}-\\ \frac{0}{p},\frac{1}{p},\cdots,\frac{p-1}{p},\frac{1}{2q},\frac{2}{2q},\cdots,\frac{2q}{2q}\end{matrix}\right) \tag{24}$$

其中，$c=2q/p$ 表示有理数，p、q 为正整数，$G_{s,t}^{m,n}\left(z\middle|\begin{matrix}u_1,\cdots,u_s\\ v_1,\cdots,v_t\end{matrix}\right)$ 表示 Meijer G 函数[22]。

那么当 ER 的分布半径 R 很大时，由式（23）和式（24）可推得 IR1 的 SOP 近似表达式为：

$$P_1\approx 1-\frac{\upsilon_1 M}{\alpha_1}\sum_{i=0}^{M-1}\binom{M-1}{i}(-1)^i J\left(n,t,\frac{2}{\alpha}\right) \tag{25}$$

其中，$n=(i+1)\upsilon_1/\alpha_1$，$t=\Gamma(2/\alpha)(\theta c_1\overline{\gamma}_{\mathrm{E}})^{2/\alpha}\tau$。

在自由空间传播的 SWIPT-NOMA 环境中，路径损耗指数 $\alpha=2$，利用文献[22]中的式(3.324.1)，式（25）可化简为：

$$P_1 \approx 1-2Md_1\sum_{i=0}^{M-1}\binom{M-1}{i}(-1)^i\sqrt{\frac{\omega}{i+1}}K_1\left(2d_1\sqrt{(i+1)\omega}\right) \tag{26}$$

其中，$\omega=c_1\pi\rho_E\theta$，$K_1(\cdot)$表示第二类一阶修正的贝塞尔函数[22]。

考虑以下特殊情况。

当功率分割因子 $\beta_k=1$，ER 信息解码支路上的噪声 $N_E^{'}=0$ 时，ER 只进行信息解码，而不进行能量收集，变成为单纯的窃听者；若此时 IR1 的功率分配系数 $\alpha_1=1$，基站 S 只向近端信息接收者 IR1 发射信号，不向远端信息接收者 IR2 发射信号；图 1 所示系统可退变为文献[9]中窃听者空间位置随机分布下的单用户无线系统，式（26）与文献[9]中式（12）的安全中断概率表达式相同，这说明文献[9]的结果可视为本文的特殊情况。

3.1.2 IR2 的 SOP

IR2 的 SOP 可近似为：

$$P_2=\Pr\left(C_{I2}-C_{E2}<R_S\right)\approx 1-\int_0^{\alpha_2/\alpha_1} f_{I2}(x)F_{E2}(x/\theta)\mathrm{d}x \tag{27}$$

将式（6）和式（15）代入式（27）中，IR2 的 SOP 近似表达式为：

$$P_2 \approx 1-\alpha_2\upsilon_2\Psi(\theta) \tag{28}$$

其中，$\Psi(\theta)=\int_0^{\alpha_2/\alpha_1}(\alpha_2-\alpha_1 x)^{-2}\ \exp\left(-\frac{\upsilon_2 x}{\alpha_2-\alpha_1 x}-\tau y^{2/\alpha}\left(\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right)-\Gamma\left(\frac{2}{\alpha},\frac{R^\alpha}{y}\right)\right)\right)\mathrm{d}x$，$y=\frac{(\theta c_2-c_1 x)\overline{\gamma}_E}{x}$。

虽然难以得到$\Psi(\theta)$的精确表达式，但是利用高斯−切比雪夫正交定理[11]：

$$\int_{-1}^{1}\frac{f(x)}{\sqrt{1-x^2}}\mathrm{d}x\simeq\frac{\pi}{N}\sum_{l=1}^{N}f(x_l) \tag{29}$$

其中，$x_l=\cos\left((2l-1)\pi/(2N)\right)$，$N$ 表示高斯−切比雪夫式中权衡复杂度和精确度的展开式项数。

利用区间变化关系式 $\int_a^b f(x)\mathrm{d}x=\frac{b-a}{2}\int_{-1}^{1}f\left(\left((b+a)/2+(b-a)t/2\right)\right)\mathrm{d}t$，可推得$\Psi(\theta)$的近似表达式为：

$$\Psi(\theta)=\frac{\alpha_2\pi}{2\alpha_1 N}\sum_{n=1}^{N}\sqrt{1-\phi_n^2}\left(\alpha_2-\alpha_1 x_n\right)^{-2}\cdot \exp\left(-\frac{\upsilon_2 x_n}{\alpha_2-\alpha_1 x_n}-\tau y_n^{2/\alpha}\left(\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right)-\Gamma\left(\frac{2}{\alpha},\frac{R^\alpha}{y_n}\right)\right)\right) \tag{30}$$

其中，$\phi_n=\cos\left((2n-1)\pi/(2N)\right)$，$x_n=\alpha_2/2\alpha_1+\alpha_2\phi_n/2\alpha_1$，$y_n=\left(\theta c_2-c_1 x_n\right)\overline{\gamma}_E/x_n$。将式（30）代入式（28）中即可得 IR2 的 SOP 近似表达式。

由式（28）可知：当 IR2 的功率分配系数 $\alpha_2=1$，即 $\alpha_1=0$ 时，此时 S 只向 IR2 发射信号，图 1 所示系统可退变为文献[18]中窃听者空间位置随机分布下的 SWIPT 系统，再次说明本文结果的一般性。

3.1.3 SWIPT-NOMA 的 SOP

将式（25）和式（28）代入式（20），可推得采用 TAS 和 PS 策略下 SWIPT-NOMA 系统的 SOP 近似表达式为：

$$P\approx 1-\frac{\alpha_2\upsilon_1\upsilon_2 M}{\alpha_1}\sum_{i=0}^{M-1}\binom{M-1}{i}(-1)^i J\left(n,t,\frac{2}{\alpha}\right)\Psi(\theta) \tag{31}$$

由式（31）可知，SWIPT-NOMA 系统的安全中断概率与基站发射天线数 M、S 与 IR1 及 IR2 之间的距离 d_1 和 d_2、路径损耗指数 α、窃听者密度 ρ_E、PS 因子 β_k 等参数有关。

3.2 非零安全容量概率

图 1 的 SWIPT-NOMA 系统的非零安全容量概率 NZSCP 可定义为 S→IR1 和 S→IR2 链路的信道容量均大于 ER 窃听 IR1 和 IR2 的信道容量的概率。令 P_1^{non}、P_2^{non} 为 IR1 和 IR2 的 NZSCP，则 SWIPT-NOMA 系统的 NZSCP 可表示为：

$$P^{non}=\Pr\left(C_{I1}>C_{E1}\ \text{and}\ C_{I2}>C_{E2}\right)=P_1^{non}P_2^{non} \tag{32}$$

下面分别对 IR1 和 IR2 的 NZSCP 进行推导。

IR1 的 NZSCP 表示为：

$$P_1^{\text{non}}=\Pr\left(C_{\text{I1}}>C_{\text{E1}}\right)=\int_0^{\infty} f_{\text{I1}}\left(x\right)F_{\text{E1}}\left(x\right)\text{d}x \quad (33)$$

将式（4）和式（13）代入式（33）中，利用式（23）可将 IR1 的 NZSCP 近似为：

$$P_1^{\text{non}}=\frac{\upsilon_1 M}{\alpha_1}\sum_{i=0}^{M-1}\binom{M-1}{i}\left(-1\right)^i\cdot \int_0^{\infty}\exp\left(-\frac{\left(i+1\right)\upsilon_1 x}{\alpha_1}-\tau\left(\frac{c_1\overline{\gamma}_{\text{E}}}{x}\right)^{2/\alpha}\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right)\right)\text{d}x \quad (34)$$

令 $g=\Gamma\left(2/\alpha\right)\left(c_1\overline{\gamma}_{\text{E}}\right)^{2/\alpha}\tau$，当 ER 分布半径 R 很大时，利用式（24）可推得 IR1 的 NZSCP 近似表达式为：

$$P_1^{\text{non}}\approx\frac{\upsilon_1 M}{\alpha_1}\sum_{i=0}^{M-1}\binom{M-1}{i}\left(-1\right)^i J\left(n,g,\frac{2}{\alpha}\right) \quad (35)$$

IR2 的 NZSCP 表示为：

$$P_2^{\text{non}}=\Pr\left(C_{\text{I2}}>C_{\text{E2}}\right)=\int_0^{\alpha_2/\alpha_1} f_{\text{I2}}\left(x\right)F_{\text{E2}}\left(x\right)\text{d}x \quad (36)$$

将式（6）和式（15）代入式（36）中，即 $\theta=1$ 时，采用与式（30）相似的推导过程，化简整理后可得 IR2 的 NZSCP 表达式近似为：

$$P_2^{\text{non}}\approx\alpha_2\upsilon_2\Psi\left(1\right) \quad (37)$$

最后将式（35）和式（37）代入式（32）中，可推得采用 TAS 和 PS 策略下 SWIPT-NOMA 系统的 NZSCP 近似表达式为：

$$P^{\text{non}}=\frac{\alpha_2\upsilon_1\upsilon_2 M}{\alpha_1}\sum_{i=0}^{M-1}\binom{M-1}{i}\left(-1\right)^i J\left(n,g,\frac{2}{\alpha}\right)\Psi\left(1\right) \quad (38)$$

由式（38）可知，SWIPT-NOMA 系统的非零安全容量概率与基站发射天线数 M、S 与 IR1 及 IR2 之间的距离 d_1 和 d_2、窃听者密度 ρ_{E}、PS 因子 β_k 等参数有关。若 SWIPT-NOMA 系统的 NZSCP 越高，窃听者 ER 就越难窃听到 S→IR1 与 S→IR2 链路上的机密信息，其物理层安全性能越好。

4　数值计算与仿真

下面利用 MATLAB 软件对采用 TAS 和 PS 策略下 SWIPT-NOMA 系统的 SOP 和 NZSCP 进行数值计算和仿真，研究不同基站发射天线数 M、S 与 IR1 及 IR2 之间的距离 d_1 和 d_2、窃听者密度 ρ_{E}、功率分割因子 β_k、路径损耗指数 α 等参数对其物理层安全性能的影响，结果如图 2～图 5 所示。若无特殊说明，综合文献[9]和文献[18]的参数设置，TAS 和 PS 策略下 SWIPT-NOMA 系统的仿真参数设置见表 1。

表 1　TAS 和 PS 策略下 SWIPT-NOMA 系统的仿真参数设置

参数名称	参数值
S 的功率分配系数 α_1、α_2	0.1、0.9
S 与 IR1 之间的距离 d_1	5 m
S 与 IR2 之间的距离 $d_2=2d_1$	10 m
平均信噪比 $\overline{\gamma}_1$	30 dB
式（30）、式（37）中展开式项数 N	100
功率分割因子 $\beta_k=\beta$	0.5
ER 分布半径 R	50 m
ER 泊松分布密度 ρ_{E}	0.01/m^2
窃听链路平均信噪比 $\overline{\gamma}_{\text{E}}$	30 dB
路径损耗指数 α	4
目标安全速率 R_{S}	1 bit/(s·Hz)

不同窃听者 ER 泊松分布密度 ρ_E 下 SWIPT-NOMA 系统的 SOP 性能曲线如图 2 所示，其中，$M=4$。由图 2 可知：

（1）SWIPT-NOMA 系统的 SOP 以及 IR1 和 IR2 的 SOP 均随距离的增大而显著增大，这是因为 S 与 IR1 和 IR2 的距离越远相当于减少了 S→IR1 和 S→IR2 链路的信道容量，所以 SWIPT-NOMA 系统的安全性能下降；

（2）窃听者 ER 密度 ρ_E 越大，ER 数量就越多，ER 窃听 IR1 和 IR2 的信道容量也就越大，因此 SWIPT-NOMA 系统的 SOP 越大。如当 d_1=5 m，ρ_{E}

从 0.01 m^{-2} 增大到 0.02 m^{-2} 时，SWIPT-NOMA 系统的 SOP 从 0.93 增大到 0.98。

（3）当 $\rho_E = 0.01\ m^{-2}$、$R = 50$ m、$\overline{\gamma}_I = 30$ dB、$\alpha_1 = 1$时，本文系统可退变为窃听者空间位置随机分布的 SWIPT 系统，图 2 中的相应曲线与文献[18]中图 3 的相应曲线吻合，验证了本文推导的正确性。

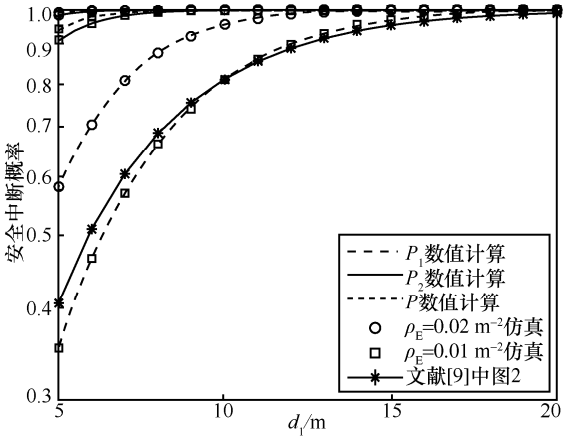


图 2　不同窃听者 ER 泊松分布密度 ρ_E 下 SWIPT-NOMA 系统的 SOP 性能曲线

不同功率分割因子 β 下 SWIPT-NOMA 系统的 SOP 性能曲线如图 3 所示。由图 3 可知，M= 2 时，相同 ρ_E 下，SWIPT-NOMA 系统的 SOP 以及 IR1 和 IR2 的 SOP 均随 β 的增加而增大。这是因为 β 增加提高了能量收集器 ER 信息解码过程中的瞬时信干噪比，从而提高了 ER 窃听 IR1 和 IR2 的信道容量，由此导致 SWIPT-NOMA 系统的 PLS 性能降低。如当 $\rho_E = 0.01\ m^{-2}$，β 从 0.2 增大到 0.5 的场景下，IR1 的 SOP 从 0.33 增大到 0.42，IR2 的 SOP 从 0.84 增大到 0.91。当 $M = 5$、$d_1 = 10$ m、$R = 100$ m、$\overline{\gamma}_I = 50$ dB、$\beta = 1$时，本文系统可退变为窃听者空间位置随机分布下的单用户无线系统，图 3 中的相应曲线与文献[9]中图 2 的相应曲线吻合，再次验证本文推导的正确性。

不同路径损耗指数 α 下 SWIPT-NOMA 系统的 SOP 性能曲线如图 4 所示，其中，$M = 4$、$\rho_E = 0.03\ m^{-2}$、$\overline{\gamma}_E = 10$ dB。从图 4 中可知，随着 $\overline{\gamma}_I$ 的增大，SWIPT-NOMA 系统以及 IR1 和 IR2 的物理层安全性能得到提升；α 由 3 增大到 4 的环境下，SWIPT-NOMA 系统的 SOP 降低，如 SOP 在 0.7 时，SWIPT-NOMA 系统在 α 为 3 相较于 4 的环境有约 4.9 dB 的信噪比增益。这是因为 α 的增大不仅降低了 ER 窃听 IR1 和 IR2 的信道容量，同时也降低了 S→IR1 和 S→IR2 合法链路的信道容量。

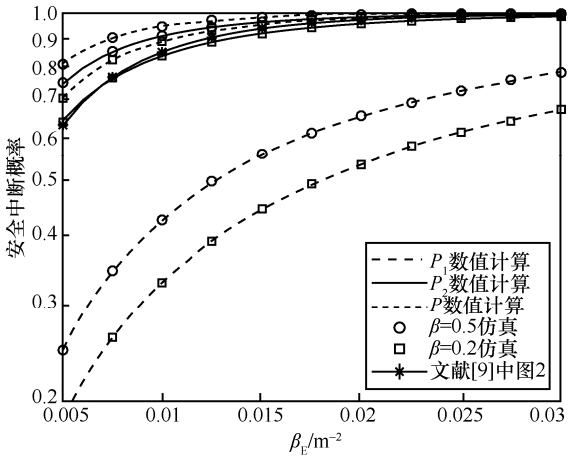


图 3　不同功率分割因子 β 下 SWIPT-NOMA 系统的 SOP 性能曲线

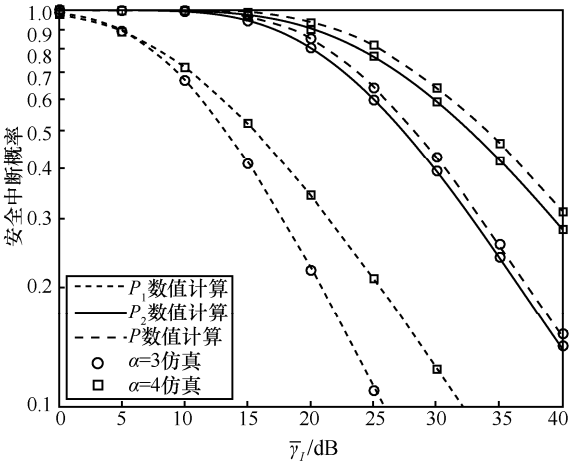


图 4　不同路径损耗指数 α 下 SWIPT-NOMA 系统的 SOP 性能曲线

不同 M 下 SWIPT-NOMA 系统的 NZSCP 性能曲线如图 5 所示，其中，$\overline{\gamma}_E = 10$ dB。从图 5 中可知，SWIPT-NOMA 系统以及 IR1 和 IR2 的 NZSCP 均随 M 的增加而增大，其物理层安全性能越好。这是因为基站 S 采用 TAS 技术选取最优发射天线进行信息安全传输，M 增加相当于增加了 IR1 的

安全容量，而 ER 窃听 IR1 和 IR2 的信道容量保持不变，故提高了 SWIPT-NOMA 系统的安全性能。如当 NZSCP 为 0.1，M 从 1 增加到 2 时，SWIPT-NOMA 系统可以获得约 2.1 dB 的信噪比增益。在其他参数相同的情况下，IR1 的安全性能始终优于 IR2，这是因为远端信息接收者 IR2 解码出自己的信号时将 IR1 的信号当作了干扰，相当于降低了 IR2 的瞬时信干噪比。

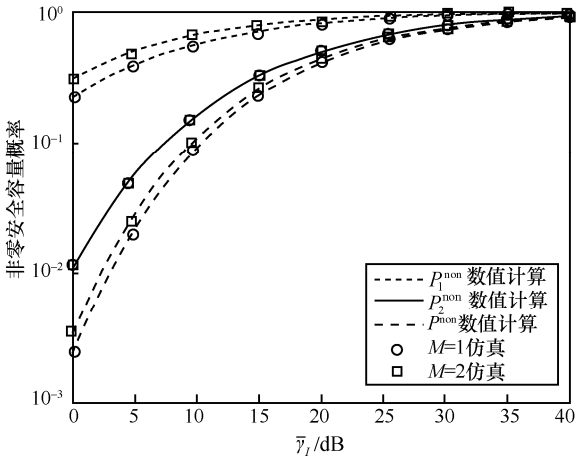


图 5　不同 M 下 SWIPT-NOMA 系统的 NZSCP 性能曲线

5　结束语

本文推导了 ER 空间位置随机分布服从泊松点过程时采用 TAS 和 PS 策略的 SWIPT-NOMA 系统的安全中断概率和非零安全容量概率近似表达式，文献[9]的无线系统和文献[18]的 SWIPT 系统均可视为本文的特殊情况。通过数值计算与仿真实验得出如下结论：基站发射天线数越大，PS 因子、S 至 IR1 和 IR2 的距离越小，SWIPT-NOMA 系统的物理层安全性能越好；而窃听者 ER 密度、路径损耗指数的增大，会降低 SWIPT-NOMA 系统的安全性能。此外，考虑 ER 合谋窃听场景下 SWIPT-NOMA 系统的物理层安全性能是未来研究的一个方向。

参考文献：

[1] DING Z G, LEI X F, KARAGIANNIDISG K, et al. A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: research challenges and future trends[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2181-2195.

[2] CHEN X M, ZHANG Z Y, ZHONG C J, et al. Exploiting multiple-antenna techniques for non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2207-2220.

[3] GAU R H, CHIU H T, LIAO C H, et al. Optimal power control for NOMA wireless networks with relays[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(1): 22-25.

[4] PONNIMBADUGE PERERA T D, JAYAKODY D N K, SHARMA S K, et al. Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT): recent advances and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(1): 264-302.

[5] YUAN Y, XU Y Q, YANG Z, et al. Energy efficiency optimization in full-duplex user-aided cooperative SWIPT NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(8): 5753-5767.

[6] 李陶深, 宁倩丽, 王哲. SWIPT-NOMA 机会协作系统的优化方案[J]. 通信学报, 2020, 41(8): 141-154.
LI T S, NING Q L, WANG Z. Optimization scheme for the SWIPT-NOMA opportunity cooperative system[J]. Journal on Communications, 2020, 41(8): 141-154.

[7] LIU Y W, DING Z G, ELKASHLAN M, et al. Cooperative non-orthogonal multiple access with simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(4): 938-953.

[8] WU Y P, KHISTI A, XIAO C S, et al. A survey of physical layer security techniques for 5G wireless networks and challenges ahead[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(4): 679-695.

[9] CHEN G J, COON J P, DI RENZO M. Secrecy outage analysis for downlink transmissions in the presence of randomly located eavesdroppers[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2017, 12(5): 1195-1206.

[10] ZHENG T X, WANG H M, YUAN J H, et al. Multi-antenna transmission with artificial noise against randomly distributed eavesdroppers[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(11): 4347-4362.

[11] LEI H J, ZHANG J M, PARK K H, et al. On secure NOMA systems with transmit antenna selection schemes[J]. IEEE Access, 2017, 5: 17450-17464.

[12] SHIMK, OHH, DOTN, et al. A physical layer security-based transmit antenna selection scheme for NOMA systems[C]// Proceedings of 2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). Piscataway: IEEE Press, 2018: 597-602.

[13] 李美玲, 李莹, Sami Muhaidat, 等. 非理想干扰删除下全双工中继 NOMA 系统的物理层安全性能研究[J]. 电子学报, 2019, 47(1): 183-189.

LI M L, LI Y, MUHAIDAT S, et al. Physical layer security for NOMA-based full duplex relay networks with non-ideal interference cancellation[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(1): 183-189.

[14] DENG D, LI C, FAN L S, et al. Impact of antenna selection on physical-layer security of NOMA networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2018: 2390834.

[15] LIU Y W, QIN Z J, ELKASHLAN M, et al. Enhancing the physical layer security of non-orthogonal multiple access in large-scale networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1656-1672.

[16] ZHANG Y J, LIANG T. Secrecy wireless information and power transfer with transmit antenna selection in MISO systems[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Computer and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2015: 362-367.

[17] PAN G F, TANG C Q, LI T T, et al. Secrecy performance analysis for SIMO simultaneous wireless information and power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(9): 3423-3433.

[18] 钱辉, 李光球, 丁一凡. 随机位置窃听场景下 SWIPT 系统的物理层安全性能[J]. 电信科学, 2020, 36(5): 65-72.
QIAN H, LI G Q, DING Y F. Physical layer security performance of SWIPT system in the presence of randomly located eavesdroppers[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(5): 65-72.

[19] BADAWYA, SHAFIEAE. Securing OFDM-based NOMA SWIPT systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 12343-12347.

[20] SUN X L, YANG W W, CAI Y M. Secure communication in NOMA-assisted millimeter-wave SWIPT UAV networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(3): 1884-1897.

[21] BAO H, ZHANG C X, WU L L, et al. Design of physical layer secure transmission scheme based on SWIPT NOMA systems[C]//Proceedings of 2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology. Piscataway: IEEE Press, 2017: 6-9.

[22] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series and products[M]. Pittsburgh: Academic Press, 2007.

[作者简介]

丁一凡（1996– ），男，杭州电子科技大学通信工程学院硕士生，主要研究方向为无线通信。

李光球（1966– ），男，博士，杭州电子科技大学通信工程学院教授，主要研究方向为无线通信、信息论与编码。

李辉（1996– ），男，杭州电子科技大学通信工程学院硕士生，主要研究方向为无线通信。