

• 成电青年学者·信息与通信工程专栏 •



## 下行协作 NOMA 系统中断概率分析与优化

刘承鹏, 张 茵, 陈 智\*, 李少谦

(电子科技大学通信抗干扰国家级重点实验室 成都 611731)

**【摘要】** 研究了一个下行协作无线数据传输系统, 其中基站采用非正交多址接入 (NOMA) 技术在一个频段上同时为一个近用户和一个远用户提供无线数据传输服务。由于严重的物理阻挡和阴影效应, 基站与远用户之间没有直接通信链路。为了实现基站向远用户的无线数据传输, 近用户采用无线携能通信技术, 为远用户充当协作中继。与现有的大多数研究不同, 考虑了实际场景中能量采集电路的非线性特点, 采用一个非线性能量采集模型并分析整个系统的中断性能。具体地, 首先推导了上述系统的中断概率的积分形式, 为了刻画系统相关参数设计对中断性能的影响, 进一步采用近似技术获得系统中断概率闭式解并分析了系统参数的最优设计。最后, 仿真结果验证了理论分析与优化设计的正确性。

**关键词** 协作中继; NOMA; 非线性; 中断概率; 无线携能通信

**中图分类号** TN92 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2022103

## Outage Probability Analysis and Optimization in Downlink Cooperative NOMA System

LIU Chengpeng, ZHANG Lin, CHEN Zhi\*, and LI Shaoqian

(National Key Lab of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** A downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) system is studied, in which a base station serves a near user and a far user on the same frequency band simultaneously. Due to physical obstacles or heavy shadowing, there is no direct link from the base station to the far user and the near user acts as a cooperative relay for the far user by adopting the simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) technique. Unlike most existing works, a non-linear model for energy harvesting is adopted to study the system outage performance by considering the non-linear features of the energy harvesting circuits. Specifically, the system outage probability with integral expressions is derived. To characterize the impact of system parameter design on outage probability, the approximated closed-form expression of outage probability can be obtained by further applying the approximation technique, and the optimal design of system parameters is analyzed. Simulation results validate the correctness of the theoretical analysis and the optimal design.

**Key words** cooperative relaying; NOMA; non-linear; outage probability; SWIPT

近年来, 物联网技术发展迅速并被视为支持未来泛在智能的有效手段, 如智慧家居<sup>[1]</sup>、自动驾驶<sup>[2]</sup>等。在新兴应用的推动下, 无线智能设备数量呈现指数级增长趋势<sup>[3]</sup>。这一发展趋势给物联网技术的无线接入能力带来了巨大挑战。为了应对该挑战, 亟需研究新型多址接入技术, 形成对未来海量无线设备实时入网的支持能力。

非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 是一种有望大幅度提高网络接入能力的重要方案<sup>[4-5]</sup>。与传统正交多址接入 (orthogonal multiple

access, OMA) 不同, NOMA 可以在相同的资源块上, 利用功率复用为多个用户同时提供服务。因此, NOMA 比 OMA 具有更强的无线设备服务能力。根据是否采用协作通信, NOMA 可进一步分为两种类型, 即协作 NOMA 和非协作 NOMA。与非协作 NOMA 相比<sup>[6-7]</sup>, 协作 NOMA 表现出更广的覆盖范围和更高的无线传输可靠性, 因此, 也引起了全球电信科学家和工程师的更多关注<sup>[8-9]</sup>。文献 [8] 研究了一个协作 NOMA 系统, 提出利用专用中继协助基站与远用户之间通信的系统架构,

收稿日期: 2022-04-11; 修回日期: 2022-07-05

基金项目: 四川省重点专项 (2022YFG0024)

作者简介: 刘承鹏 (1985-), 男, 博士生, 主要从事无线通信方面的研究。

\*通信作者: 陈智, E-mail: chenzhi@uestc.edu.cn

并推导了系统中断概率。文献 [9] 考虑了一个包含多个专用中继的协作 NOMA 系统, 并研究了中继选择对系统中断概率的影响。由于专用中继部署成本高, 文献 [10-11] 进一步研究了利用近用户为远用户充当中继的可能性。具体而言, 文献 [10] 研究了一个协作 NOMA 系统, 通过采用自适应多址接入的方案降低了中断概率; 文献 [11] 首先通过优化基站功率分配因子最小化系统中断概率, 同时考虑用户公平性, 实现了用户最小可达速率的最大化。

由于物理尺寸或成本的限制, 一般物联网设备仅配置容量较小的电池。然而, 利用用户充当中继可能会消耗该用户有限的电能, 这将会极大地缩短中继用户工作时间。为了缓解该问题, 无线携能通信技术被引入协作 NOMA 系统<sup>[12-13]</sup>。通过利用无线携能通信技术, 用户既能从接收信号中收到信息, 也能利用接收信号采集能量。在现有文献中, 能量采集模型可分为两类, 一类是线性模型<sup>[14-15]</sup>, 该模型中能量采集器输出功率与输入功率呈线性关系; 另一类是非线性模型, 此类模型中能量采集器输出功率与输入功率呈非线性关系。如基于线性模型, 文献 [14] 研究了一个由无线携能通信技术辅助的协作 NOMA 系统, 推导了用户中断概率。文献 [15] 也考虑线性模型, 研究了一个基于无线携能通信技术并由专用中继协作的 NOMA 系统, 最小化了基站能耗。文献 [16] 考虑了一个协作 NOMA 系统, 提出了一种基于非线性能量采集模型的波束赋形设计。与线性能量采集模型相比, 基于非线性能量采集模型的研究结果与实际场景更加匹配。然而, 非线性能量采集模型复杂, 这使得基于该模型的系统分析与优化设计极具挑战, 相关研究还十分有限。因此, 基于无线携能通信技术, 本文研究了一个下行协作 NOMA 无线传输系统。

## 1 系统模型

下行协作 NOMA 无线传输系统模型如图 1 所示。基站向一个近用户 U1 和一个远用户 U2 同时提供无线数据传输服务。由于严重的物理阻挡和阴影效应, 基站与 U2 之间没有直接通信链路, 为了实现基站向 U2 传输无线数据, U1 为 U2 充当半双工中继。由于能量受限, U1 采用无线携能通信技术从基站发射的信号中采集能量, 并用采集的能量向 U2 转发信号。如图 1 所示,  $h_1$  和  $h_2$  分别表示

从基站到 U1 和从 U1 到 U2 的信道。假设所有信道经历瑞利衰落, 即  $h_i \sim CN(0, \lambda_i)$ ,  $i \in \{1, 2\}$ 。

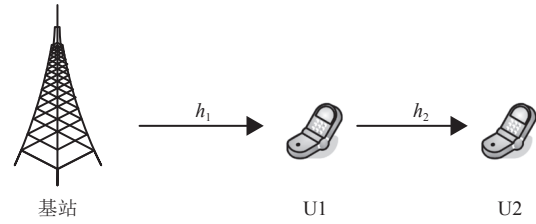


图 1 系统模型

类似于文献 [16], 本文采用了一个实际的非线性能量采集模型。因此, U1 接收到基站信号后采集的能量可表示为:

$$E = \begin{cases} 0 & \xi \in [0, P^{\text{sen}}] \\ \eta(\xi - P^{\text{sen}})t & \xi \in [P^{\text{sen}}, P^{\text{sat}}] \\ \eta(P^{\text{sat}} - P^{\text{sen}})t & \xi \in [P^{\text{sat}}, +\infty) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\xi$  表示 U1 处的接收信号功率;  $P^{\text{sen}}$  表示能量采集功率敏感阈值;  $P^{\text{sat}}$  表示能量采集功率饱和阈值;  $t$  表示能量采集时间;  $\eta$  ( $0 < \eta < 1$ ) 表示能量转换效率。

## 2 信号模型

### 2.1 下行传输协议

本文采用的传输协议如图 2 所示。一个下行传输周期为  $T$ , 被等分成  $T/2$  的两个阶段。在第一阶段, 基站采用 NOMA 技术广播 U1 和 U2 的叠加信号, 同时 U1 接收基站广播的信号, 并将接收信号划分为两部分, 一部分用于采集能量, 另一部分用于解码信息。在第二阶段, 如果 U1 已经成功解码叠加信号中的所有信息, 那么 U1 用采集到的全部电能转发 U2 的信号, 同时 U2 接收 U1 转发的信号并对其进行解码; 否则, U1 保持静默。

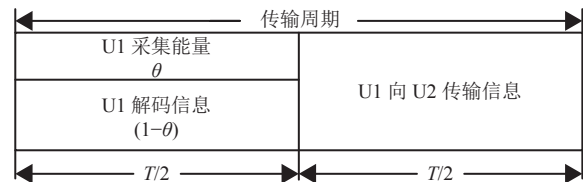


图 2 下行传输协议

### 2.2 可达速率

在第一阶段, 基站采用 NOMA 技术广播一个叠加信号:

$$x(t) = \sqrt{\alpha_1}x_1(t) + \sqrt{\alpha_2}x_2(t) \quad (2)$$

式中,  $x_1(\mathbb{E}[|x_1|^2] = 1)$  和  $x_2(\mathbb{E}[|x_2|^2] = 1)$  分别表示基站发送给用户 U1 和 U2 的信号;  $\alpha_1$  ( $0 \leq \alpha_1 \leq 1$ ) 和  $\alpha_2 =$

$1 - \alpha_1$  是对应于信号  $x_1$  和  $x_2$  的功率分配系数。

那么, U1 接收到的信号可表示为:

$$y_1(t) \approx h_1(t) [\sqrt{\alpha_1 p} x_1(t) + \sqrt{\alpha_2 p} x_2(t)] \quad (3)$$

式中,  $p$  是基站的发射功率。

根据下行传输协议, 接收到  $y_1(t)$  之后, U1 将  $y_1(t)$  划分为两部分, 一部分用于采集能量, 另一部分用于解码信息。

若采用文献 [17] 中的信号划分方案, 用于采集能量的信号可表示为  $\sqrt{\theta} y_1(t)$ , 功率为  $\theta p |h_1|^2$ , 其中,  $\theta (0 \leq \theta \leq 1)$  为功率划分比。此时根据式 (1), U1 采集的电能为:

$$E = \begin{cases} 0 & \theta p |h_1|^2 \in [0, P^{\text{sen}}] \\ \eta(\theta p |h_1|^2 - P^{\text{sen}}) \frac{T}{2} & \theta p |h_1|^2 \in [P^{\text{sen}}, P^{\text{sat}}] \\ \eta(P^{\text{sat}} - P^{\text{sen}}) \frac{T}{2} & \theta p |h_1|^2 \in [P^{\text{sat}}, +\infty) \end{cases} \quad (4)$$

同时, 用于解码的信号部分为  $\sqrt{1 - \theta} y_1(t)$ , 即  $\sqrt{1 - \theta} h_1(t) x(t)$ 。针对此信号, U1 先检测  $x_2$ , 其信号干扰噪声比为<sup>[17]</sup>:

$$\gamma_{12} = \frac{(1 - \theta) \alpha_2 p |h_1|^2}{(1 - \theta) \alpha_1 p |h_1|^2 + \sigma^2} \quad (5)$$

式中,  $\sigma^2$  为 U1 检测信号时的噪声功率。

若成功解码  $x_2$ , U1 则可利用串行干扰消除技术将  $x_2$  从叠加信号中消除再检测  $x_1$ , 此时检测  $x_1$  的信号噪声比为:

$$\gamma_{11} = \frac{(1 - \theta) \alpha_1 p |h_1|^2}{\sigma^2} \quad (6)$$

若 U1 解码  $x_2$  不成功, 则不再继续检测  $x_1$  并等待接收基站的下一个广播信号。

在第二阶段, 如果解码成功, U1 将采集的全部电能用于转发  $x_2$ 。因此, U1 的发射功率可表示为:

$$p_1 = \frac{E}{T/2} = \begin{cases} 0 & \theta p |h_1|^2 \in [0, P^{\text{sen}}] \\ \eta(\theta p |h_1|^2 - P^{\text{sen}}) & \theta p |h_1|^2 \in [P^{\text{sen}}, P^{\text{sat}}] \\ \eta(P^{\text{sat}} - P^{\text{sen}}) & \theta p |h_1|^2 \in [P^{\text{sat}}, +\infty) \end{cases} \quad (7)$$

依据 U1 转发的信号, U2 检测  $x_2$ , 其信噪比为:

$$\gamma_{22} = \frac{p_1 |h_2|^2}{\sigma^2} \quad (8)$$

式中,  $\sigma^2$  为 U2 检测信号时的噪声功率。

因此, 从基站到 U1 的信息传输过程中, 信号

$x_1$  和  $x_2$  的可达速率分别为<sup>[12-15, 17]</sup>:

$$R_{11} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{11}) \quad (9)$$

$$R_{12} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{12}) \quad (10)$$

从 U1 向 U2 传输信号  $x_2$  的可达速率为:

$$R_{22} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{22}) \quad (11)$$

### 3 系统中断概率分析与优化

为了方便讨论系统中断性能, 需要先定义系统中断事件。如果 U1 没有成功解码  $x_1$  或者 U2 没有成功解码  $x_2$ , 则认为系统发生中断。假设传输  $x_1$  和  $x_2$  的目标速率分别为  $R_1'$  和  $R_2'$ , 则系统中断概率可表示为:

$$P^{\text{out}} = 1 - \underbrace{\Pr\{R_{12} \geq R_2', R_{11} \geq R_1', R_{22} \geq R_2'\}}_{P^s} \quad (12)$$

式中,  $P^s$  表示系统成功传输概率。

将式 (9)、式 (10) 及式 (11) 代入式 (12), 系统成功传输概率可进一步表示为:

$$P^s = \Pr\{\gamma_{12} \geq \gamma_2', \gamma_{11} \geq \gamma_1', \gamma_{22} \geq \gamma_2'\} \quad (13)$$

式中,  $\gamma_1' = 2^{2R_1'} - 1$ ;  $\gamma_2' = 2^{2R_2'} - 1$ 。

将式 (5)、式 (6) 及式 (8) 代入式 (13), 当  $0 \leq \alpha_1 \leq \frac{1}{1 + \gamma_2'}$  时, 系统成功传输概率可表示为:

$$P^s = \Pr\left\{|h_1|^2 \geq \frac{\max\{a, b\}}{(1 - \theta)p}, p_1 |h_2|^2 \geq \sigma^2 \gamma_2'\right\} \quad (14)$$

式中,  $a = \frac{\sigma^2 \gamma_2'}{\alpha_2 - \alpha_1 \gamma_2'}$ ;  $b = \frac{\sigma^2 \gamma_1'}{\alpha_1}$ 。

从式 (14) 可以看出, 系统成功传输概率与 U1 发射功率  $p_1$  密切相关。根据式 (7) 可知, U1 发射功率  $p_1$  由  $\theta p |h_1|^2$  的取值决定。因此, 系统成功传输概率与  $\theta p |h_1|^2$  取值相关。接下来, 讨论不同  $\theta p |h_1|^2$  取值下的系统成功传输概率。

1)  $\theta p |h_1|^2 \in [0, P^{\text{sen}}]$

在此情况下, 可以直接得到 U1 的发射功率为  $p_1 = 0$ 。此时, 系统成功传输概率为  $P^s = 0$ 。

2)  $\theta p |h_1|^2 \in [P^{\text{sen}}, P^{\text{sat}}]$

在此情况下, U1 的发射功率为  $p_1 = \eta(\theta p |h_1|^2 - P^{\text{sen}})$ 。将其代入式 (14), 则系统成功传输概率可表示为:

$$P^s = \Pr \left\{ \frac{\delta}{p} \leq |h_1|^2 \leq \frac{P^{sat}}{\theta p}, |h_2|^2 \geq \frac{\sigma^2 \gamma_2'}{\eta(|h_1|^2 - P^{sen})} \right\} = \begin{cases} \int_{\frac{P^{sen}}{\theta p}}^{\frac{P^{sat}}{\theta p}} \int_{\phi(x)}^{+\infty} \frac{e^{-\frac{x}{\lambda_1} - \frac{y}{\lambda_2}}}{\lambda_1 \lambda_2} dy dx & q(\alpha_1) \in [0, \kappa P^{sen}] \\ \int_{\frac{q(\alpha_1)}{(1-\theta)p}}^{\frac{P^{sat}}{\theta p}} \int_{\phi(x)}^{+\infty} \frac{e^{-\frac{x}{\lambda_1} - \frac{y}{\lambda_2}}}{\lambda_1 \lambda_2} dy dx & q(\alpha_1) \in [\kappa P^{sen}, \kappa P^{sat}] \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $\delta = \max\{P^{sen}/\theta, q(\alpha_1)/(1-\theta)\}$ ;  $q(\alpha_1) = \max\{a, b\}$ ;  
 $\kappa = (1-\theta)/\theta$ ;  $\phi(x) = \frac{\sigma^2 \gamma_2'}{\eta(\theta p x - P^{sen})}$ 。

经过整理, 式 (15) 可进一步表示为:

$$P^s = \begin{cases} \int_{\frac{P^{sen}}{\theta p}}^{\frac{P^{sat}}{\theta p}} \frac{e^{-\frac{x}{\lambda_1} - \frac{\phi(x)}{\lambda_2}}}{\lambda_1} dx & q(\alpha_1) \in [0, \kappa P^{sen}] \\ \int_{\frac{q(\alpha_1)}{(1-\theta)p}}^{\frac{P^{sat}}{\theta p}} \frac{e^{-\frac{x}{\lambda_1} - \frac{\phi(x)}{\lambda_2}}}{\lambda_1} dx & q(\alpha_1) \in [\kappa P^{sen}, \kappa P^{sat}] \end{cases} \quad (16)$$

3)  $\theta p |h_1|^2 \in [P^{sat}, +\infty)$

在此情况下, U1 的发射功率为  $p_1 = \eta(P^{sat} - P^{sen})$ 。

将其代入式 (14), 则系统成功传输概率可表示为:

$$P^s = \Pr \left\{ |h_1|^2 \geq \frac{q(\alpha_1)}{(1-\theta)p}, |h_2|^2 \geq \frac{\sigma^2 \gamma_2'}{\eta(P^{sat} - P^{sen})}, |h_1|^2 \geq \frac{P^{sat}}{\theta p} \right\} = \begin{cases} \int_{\frac{P^{sat}}{\theta p}}^{+\infty} \int_{\phi(\frac{P^{sat}}{\theta p})}^{+\infty} \frac{e^{-\frac{x}{\lambda_1} - \frac{y}{\lambda_2}}}{\lambda_1 \lambda_2} dy dx & q(\alpha_1) \in [0, \kappa P^{sat}] \\ \int_{\frac{q(\alpha_1)}{(1-\theta)p}}^{+\infty} \int_{\phi(\frac{P^{sat}}{\theta p})}^{+\infty} \frac{e^{-\frac{x}{\lambda_1} - \frac{y}{\lambda_2}}}{\lambda_1 \lambda_2} dy dx & q(\alpha_1) \in [\kappa P^{sat}, +\infty) \end{cases} \quad (17)$$

经过整理, 式 (17) 可进一步表示为:

$$P^s = \begin{cases} e^{-\frac{P^{sat}}{\lambda_1(1-\theta)p} - \frac{\sigma^2 \gamma_2'}{\lambda_2 \eta(P^{sat} - P^{sen})}} & q(\alpha_1) \in [0, \kappa P^{sat}] \\ e^{-\frac{q(\alpha_1)}{\lambda_1(1-\theta)p} - \frac{\sigma^2 \gamma_2'}{\lambda_2 \eta(P^{sat} - P^{sen})}} & q(\alpha_1) \in [\kappa P^{sat}, +\infty) \end{cases} \quad (18)$$

联立以上 3 种情况, 系统成功传输概率可表示为:

$$P^s = \begin{cases} \int_{\frac{P^{sen}}{\theta p}}^{\frac{P^{sat}}{\theta p}} \frac{e^{-\frac{x}{\lambda_1} - \frac{\phi(x)}{\lambda_2}}}{\lambda_1} dx + \frac{e^{-\frac{P^{sat}}{\lambda_1(1-\theta)p}}}{\sigma^2 \gamma_2' / \eta(P^{sat} - P^{sen})} & q(\alpha_1) \in [0, \kappa P^{sen}] \\ \int_{\frac{q(\alpha_1)}{(1-\theta)p}}^{\frac{P^{sat}}{\theta p}} \frac{e^{-\frac{x}{\lambda_1} - \frac{\phi(x)}{\lambda_2}}}{\lambda_1} dx + \frac{e^{-\frac{P^{sat}}{\lambda_1(1-\theta)p}}}{\sigma^2 \gamma_2' / \eta(P^{sat} - P^{sen})} & q(\alpha_1) \in [\kappa P^{sen}, \kappa P^{sat}] \\ \frac{e^{-\frac{q(\alpha_1)}{\lambda_1(1-\theta)p}}}{\sigma^2 \gamma_2' / \eta(P^{sat} - P^{sen})} & q(\alpha_1) \in [\kappa P^{sat}, +\infty) \end{cases} \quad (19)$$

因此, 系统中断概率可表示为:

$$P^{out} = 1 - P^s =$$

$$\begin{cases} 1 - \int_{\frac{P^{sen}}{\theta p}}^{\frac{P^{sat}}{\theta p}} \frac{e^{-\frac{x}{\lambda_1} - \frac{\phi(x)}{\lambda_2}}}{\lambda_1} dx - \frac{e^{-\frac{P^{sat}}{\lambda_1(1-\theta)p}}}{\sigma^2 \gamma_2' / \eta(P^{sat} - P^{sen})} & q(\alpha_1) \in [0, \kappa P^{sen}] \\ 1 - \int_{\frac{q(\alpha_1)}{(1-\theta)p}}^{\frac{P^{sat}}{\theta p}} \frac{e^{-\frac{x}{\lambda_1} - \frac{\phi(x)}{\lambda_2}}}{\lambda_1} dx - \frac{e^{-\frac{P^{sat}}{\lambda_1(1-\theta)p}}}{\sigma^2 \gamma_2' / \eta(P^{sat} - P^{sen})} & q(\alpha_1) \in [\kappa P^{sen}, \kappa P^{sat}] \\ 1 - \frac{e^{-\frac{q(\alpha_1)}{\lambda_1(1-\theta)p}}}{\sigma^2 \gamma_2' / \eta(P^{sat} - P^{sen})} & q(\alpha_1) \in [\kappa P^{sat}, +\infty) \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

为了刻画相关参数设计对系统中断概率的影响, 本文利用高斯-切比雪夫求积公式得到系统中断概率的闭式解。具体而言, 高斯-切比雪夫求积公式表示为<sup>[18]</sup>:

$$\int_{-1}^1 \frac{f(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx \approx \frac{\pi}{K} \sum_{k=1}^K f[\cos(\frac{2k-1}{2K}\pi)] \quad (21)$$

式中,  $K$  表示精度与复杂度的平衡参数。

因此, 系统中断概率可近似为:

$$P^{out} \approx \begin{cases} 1 - \frac{e^{-\frac{P^{sat}}{\lambda_1(1-\theta)p}}}{\sigma^2 \gamma_2' / \eta(P^{sat} - P^{sen})} - A_1 \frac{\pi}{K} \sum_{k=1}^K \sqrt{1-z^2} e^{-\varphi_1(z)} & q(\alpha_1) \in [0, \kappa P^{sen}] \\ 1 - \frac{e^{-\frac{P^{sat}}{\lambda_1(1-\theta)p}}}{\sigma^2 \gamma_2' / \eta(P^{sat} - P^{sen})} - A_2 \frac{\pi}{K} \sum_{k=1}^K \sqrt{1-z^2} e^{-\varphi_2(z)} & q(\alpha_1) \in [\kappa P^{sen}, \kappa P^{sat}] \\ 1 - \frac{e^{-\frac{q(\alpha_1)}{\lambda_1(1-\theta)p}}}{\sigma^2 \gamma_2' / \eta(P^{sat} - P^{sen})} & q(\alpha_1) \in [\kappa P^{sat}, +\infty) \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

式中,  $A_1 = \frac{P^{sat} - P^{sen}}{2\lambda_1 \theta p} e^{-\frac{P^{sen}}{\lambda_1 \theta p}}$ ;  $A_2 = \frac{P^{sat} - q(\alpha_1)}{2\lambda_1 \theta p} e^{-\frac{P^{sen}}{\lambda_1 \theta p}}$ ;

$\varphi_1(z) = \frac{(P^{sat} - P^{sen})(1-z)}{2\lambda_1 \theta p} + \frac{2\sigma^2 \gamma_2'}{\eta \lambda_2 (P^{sat} - P^{sen})(1-z)}$ ;  $\varphi_2(z) =$

$\frac{1}{2p\lambda_1} \left[ \frac{q(\alpha_1)}{1-\theta} + \frac{(P^{sat} - 2P^{sen})}{\theta} - \left( \frac{P^{sat}}{\theta} - \frac{q(\alpha_1)}{1-\theta} \right) z \right] + \frac{2\sigma^2 \gamma_2'}{\lambda_2 \eta \theta} \times$   
 $\left\{ \frac{q(\alpha_1)}{1-\theta} + \frac{P^{sat} - 2P^{sen}}{\theta} + \left[ \frac{P^{sat}}{\theta} - \frac{q(\alpha_1)}{1-\theta} \right] z \right\}^{-1}$ ;  $z = \cos$



$\left(\frac{2k-1}{2K}\pi\right)$ ;  $K$ 表示精度与复杂度的平衡参数。

通过分析式(22)发现, 可通过优化参数( $p, \alpha_1, \theta$ )降低系统中断概率 $P^{\text{out}}$ 。为了方便讨论, 令 $\zeta_1 =$

$$1 - e^{-\frac{P^{\text{sat}}}{\lambda_1(1-\theta)p} - \frac{\sigma^2\gamma_2'}{\lambda_2\eta(P^{\text{sat}}-P^{\text{sen}})}} - A_1 \frac{\pi}{K} \sum_{k=1}^K \sqrt{1-z^2} e^{-\varphi_1(z)}; \zeta_2 =$$

$$1 - e^{-\frac{P^{\text{sat}}}{\lambda_1(1-\theta)p} - \frac{\sigma^2\gamma_2'}{\lambda_2\eta(P^{\text{sat}}-P^{\text{sen}})}} - A_2 \frac{\pi}{K} \sum_{k=1}^K \sqrt{1-z^2} e^{-\varphi_2(z)}; \zeta_3 =$$

$$1 - e^{-\frac{q(\alpha_1)}{\lambda_1(1-\theta)p} - \frac{\sigma^2\gamma_2'}{\lambda_2\eta(P^{\text{sat}}-P^{\text{sen}})}}。具体优化过程可分为两步。$$

首先, 由于 $\zeta_1 \leq \zeta_2 \leq \zeta_3 \leq 1$ , 可优化 $q(\alpha_1) = \max\{a, b\}$ 使其满足 $q(\alpha_1) \in [0, \kappa P^{\text{sen}}]$ , 即 $\alpha_1 \in [\alpha_l, \alpha_r]$ ,

其中,  $\alpha_l = \frac{\sigma^2\gamma_2'}{\kappa P^{\text{sen}}}$ ;  $\alpha_r = \left(1 - \frac{\sigma^2\gamma_2'}{\kappa P^{\text{sen}}}\right) / (1 + \gamma_2')$ , 从而得

到系统中断概率 $P^{\text{out}} = \zeta_1$ 。其次, 当 $\alpha_1 \in [\alpha_l, \alpha_r]$ 时,

系统中断概率 $P^{\text{out}} = \zeta_1$ 是关于 $\theta$ 的单变量函数。此时

可通过优化 $\theta$ 使 $\zeta_1$ 达到最小。由 $\alpha_l \leq \alpha_r$ 可知,  $\theta \in$

$[0, \theta_r]$ , 其中,  $\theta_r = P^{\text{sen}} / (P^{\text{sen}} + \sigma^2\gamma_2')$ ;  $\gamma_2' = 2^{2(R_1^t + R_2^t)} - 1$ 。

因此, 可以采用二分法在 $\theta \in [0, \theta_r]$ 上搜索最优 $\theta^*$ 使

$\zeta_1$ 达到最小, 算法复杂度为 $O(\log_2 \frac{1+\theta_r}{\varepsilon})$ , 其中,

$\varepsilon$ 为搜索精度。需要说明的是, 本文主要针对系统中断

概率进行分析与优化, 仅需要统计信道状态信息, 而不

需要瞬时信道状态信息。

## 4 数值仿真

此部分提供仿真结果。在仿真过程中, 假设噪声功率 $\sigma^2 = -111$  dBm, 对应带宽为 2 MHz。类似于文献[16], 路径损耗模型描述为 $\lambda_i = \rho(d_i/d_0)^{-\omega}$  ( $i=1,2$ ), 其中,  $\rho = 10^{-3}$ 为常系数;  $\omega = 2.7$ 表示路径损耗指数; 参考距离为 $d_0 = 10$  m;  $d_i$ 表示从基站到用户距离。因此, 本文参数设置为:  $T=1$ ,  $\eta=0.7$ ,  $P^{\text{sen}} = -35$  dBm,  $P^{\text{sat}} = -15$  dBm,  $d_1 = 15$  m,  $d_2 = 20$  m, 仿真中每个数据的蒙特卡洛次数为 $10^6$ 。

图3显示了系统中断概率随基站发射功率变化曲线, 其中,  $\alpha_1=0.1$ ,  $\theta=0.2$ ,  $R_1^t=2R_2^t=0.2$  bit/s/Hz。从图中可以看到, 系统中断概率仿真曲线可以很好地匹配对应的理论曲线。这证实了理论分析的正确性。同时看到, 系统中断概率随基站发射功率增大而降低, 这是因为基站发射功率越大, 系统成功传输概率越高, 从而降低了系统中断概率。而且, 当 $K$ 接近 50 时, 近似曲线与理论曲线几乎重合。这表明, 当 $K>50$ 时, 系统中断概率近似值有效, 并且近似误差可以忽略。此外观察到, NOMA 系统中断概率小于 OMA 系统中断概率, 这展示了 NOMA 系统的优越性。

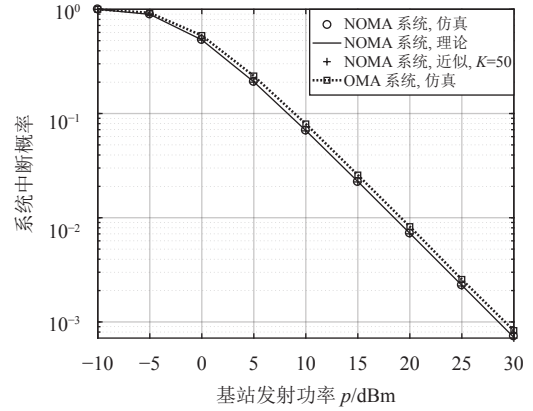


图3 系统中断概率随基站发射功率变化曲线

图4显示了系统中断概率随功率分配系数 $\alpha_1$ 变化的变化关系, 其中,  $\theta=0.2$ ,  $R_1^t=2R_2^t=0.2$  bit/s/Hz。从图中可以看到, 系统中断概率先降低再变平然后升高。如果 $\alpha_1$ 较小, 系统中断概率受限于基站发射 $x_1$ 的功率。随着 $\alpha_1$ 增加, 基站发射 $x_1$ 功率越大, 系统成功传输概率越高, 从而降低了系统中断概率。当 $\alpha_1 \in [\alpha_l, \alpha_r]$ 时, 系统中断概率降低到 $\zeta_1$ , 曲线变平, 这是因为 $\zeta_1$ 与 $\alpha_1$ 无关。如果 $\alpha_1$ 较大, 系统中断概率受限于基站发射 $x_2$ 的功率。随着 $\alpha_1$ 增加而 $\alpha_2 = 1 - \alpha_1$ 减小, 基站发射 $x_2$ 功率越小, 系统成功传输概率越小, 从而导致系统中断概率升高。

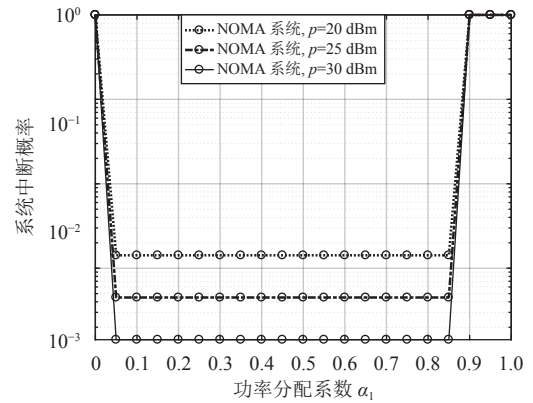


图4 系统中断概率随功率分配系数 $\alpha_1$ 变化曲线

图5展示了系统中断概率随功率划分比 $\theta$ 变化的变化关系, 其中,  $\alpha_1=0.1$ ,  $R_1^t=2R_2^t=0.2$  bit/s/Hz。从图中可以看到, 系统中断概率先降低再升高。如果 $\theta$ 较小, 系统中断概率受限于U1采集的能量。随着 $\theta$ 增大, U1采集的能量增加, 系统成功传输概率越高, 从而降低了系统中断概率。如果 $\theta$ 较大, 系统中断概率受限于U1解码信号的功率。随着 $\theta$ 增加而 $1-\theta$ 减小, U1用于解码信号的功率减小, 系统成功传输的概率下降, 从而导致中断概率升

高。因为系统中断概率随 $\theta$ 增大先降低再升高，所以存在最优 $\theta^*$ 使系统中断概率达到最小，最优 $\theta^*$ 可通过二分法进行搜索得到，这也验证了本文的分析。此外还观察到，随着基站发射功率增大，系统中断概率降低。

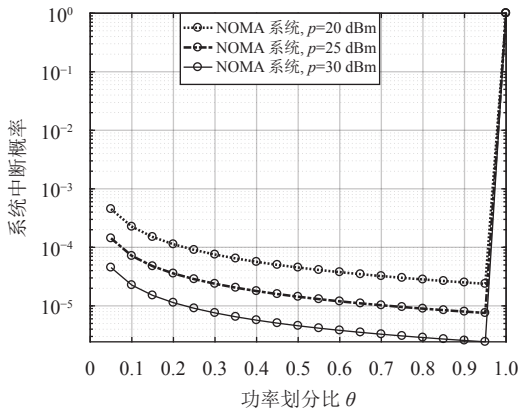


图 5 系统中断概率随功率划分比 $\theta$ 变化曲线

## 5 结束语

本文基于无线携能通信技术研究了一个下行协作 NOMA 无线数据传输系统。基于一个实际的非线性能量采集模型，本文首先推导了积分形式的系统中断概率。为了刻画相关参数设计对系统中断概率的影响，进一步采用近似技术获得积分形式中断概率的闭式解并分析了系统参数的最优设计。仿真结果验证了理论分析与优化设计的正确性。

**致谢** 感谢李少谦教授对本文研究思路和技术路线的全面指导，以及对我国通信学科、教育事业和国防事业做出的巨大贡献。

## 参 考 文 献

- [1] GUO F, YU F R, ZHANG H, et al. Enabling massive IoT toward 6G: A comprehensive survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(15): 11891-11915.
- [2] MAO W, ZHAO Z, CHANG Z, et al. Energy-efficient industrial internet of things: Overview and open issues[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 8(15): 11891-11915.
- [3] ZHANG L, LIANG Y C, NIYATO D. 6G visions: Mobile ultra-broadband, super internet of things, and artificial intelligence[J]. *China Communications*, 2019, 16(8): 1-14.
- [4] DING Z, LEI X, KARAGIANNIDIS G 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.
- [5] DING Z, AI Y, LIU N, et al. Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(2): 185-191.
- [6] DING Z, YANG Z, FAN P, et al. On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users[J]. *IEEE Signal Processing Letter*, 2014, 21(12): 1501-1505.
- [7] SUN Q, HAN S, YI C L, et al. On the ergodic capacity of MIMO NOMA systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letter*, 2015, 4(4): 405-408.
- [8] KIM J B, LEE I H. Non-orthogonal multiple access in coordinated direct and relay transmission[J]. *IEEE Communications Letter*, 2015, 19(11): 2037-2040.
- [9] ZHONG C, ZHANG Z. Non-orthogonal multiple access with cooperative full-duplex relaying[J]. *IEEE Communications Letter*, 2016, 20(12): 2478-2481.
- [10] ZHANG Z, MA Z, XIAO M, et al. Full-duplex device-to-device aided cooperative non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(5): 4467-4471.
- [11] ZHANG L, LIU J, XIAO M, et al. Performance analysis and optimization in downlink NOMA systems with cooperative full-duplex relaying[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(10): 2398-2412.
- [12] LIU Y, DING Z, 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.
- [13] ATAPATTU S, EVANS J. Optimal energy harvesting protocols for wireless relay networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(8): 5789-5803.
- [14] LIU Y, DING H, SHEN J, et al. Outage performance analysis for SWIPT-based cooperative NOMA systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(9): 1501-1505.
- [15] LI G, MISHRA D, HU Y, et al. Optimal designs for relay-assisted NOMA networks with hybrid SWIPT scheme[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(6): 3588-3601.
- [16] HAKIMI A, MOHAMMADI M, MOBINI Z, et al. Full-Duplex non-orthogonal multiple access cooperative spectrum-sharing networks with non-linear energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 10925-10936.
- [17] YANG Z, DING Z, FAN P, et al. The impact of power allocation on cooperative non-orthogonal multiple access networks with SWIPT[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(7): 4332-4343.
- [18] HILDEBRAND E. Introduction to numerical analysis [M]. New York: Dover, 1987: 330-331.

编辑 刘飞阳