doi:10.11887/j.cn.202204022 http://journal.nudt.edu.cn

采用无线携能技术的中继辅助 CR-NOMA 系统能效分析*

苗丰满,张海军,蔺 莹,薛建彬,张永刚
(兰州理工大学 计算机与通信学院,甘肃 兰州 730050)

摘 要:针对现有关于认知无线电非正交多址接入网络的研究中终端电池容量有限和能源利用率低的缺点,采用了中继辅助用户进行传输,并且引入无线信息和能量同时传输的方式。在用户服务质量和最小能量捕获的约束条件下推导了次用户传输能效表达式,通过分式规划方法把非凸的目标函数转化为优化中继发射功率、中继功率分配和接收端功率分配三个凸的单目标问题,并分别用函数单调性、黄金分割算法、拉格朗日对偶算法和多目标联合优化算法进行优化,求得了全局最优解,使次用户系统传输能效最大化。对所采用的算法复杂度进行分析,仿真结果表明:与传统的正交多址接入方案相比较,在提高系统频谱利用率的同时,次用户传输能效有47%的提高。

关键词:非正交多址接入;认知无线电;无线携能;解码转发;系统能效
中图分类号:TN92 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2022)04-198-06

Energy efficiency analysis of relay-assisted CR-NOMA system using SWIPT technology

MIAO Fengman, ZHANG Haijun, LIN Ying, XUE Jianbin, ZHANG Yonggang
(School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In view of the shortcomings of limited terminal battery capacity and low energy efficiency in the existing research on CR-NOMA (cognitive radio non-orthogonal multiple access) networks, a relay was used to assist users in transmission, and a method of simultaneous transmission of wireless information and energy was introduced. Under the constraints of user service quality and minimum energy capture, the sub-user transmission energy efficiency expression was derived. The non-convex objective function was transformed into three convex single-objective problems of optimizing relay transmission power, relay power allocation and receiver power allocation by fractional programming method. Using function monotonicity, golden section algorithm, Lagrangian dual algorithm and multi-objective joint optimization algorithm for optimization, the global optimal solution was obtained to maximize the transmission energy efficiency of the secondary user system. The complexity of the adopted algorithm was analyzed. The simulation results show that compared with the traditional OMA (orthogonal multiple access) scheme, while the system spectrum utilization was improved, the sub-user transmission energy efficiency has been improved by 47%.

Keywords: non-orthogonal multiple access; cognitive radio; simultaneous wireless information and power transfer; decode and forward; energy efficiency

随着社会发展进入新的信息时代,智能化已经深入人们的生活,大量的智能设备和新的应用程序不断地涌现,这刺激了对大规模移动接入和巨大的数据流量的需求的不断增长,激发了广大研究者对5G接入技术的研究热情[1-2]。在5G的主要技术的候选者中,非正交多址(non-orthogonal multiple access, NOMA)由于其高频谱效率被一致认为是实现增加系统吞吐量的一个很有前景的候选技术[3]。与传统的在频域、时域或者码域正交的独立信道中对用户进行复用的正交多址接入(orthogonal multiple access, OMA)技术不同,NOMA在同一信道中进行多用户复用[4]。更具体地说,在NOMA系统中,发送端主动引入干扰,而在接收端牺牲接收机的复杂度来通过串行干扰消除(successive interference cancellation, SIC)技术实现目标信号的正确解调[5]。基于用户公平性,NOMA根据用户信道增益的强弱来进行功率分配,即信道增益强的用户分配相对较少的传输功率,信道增益弱的用户分配较多的功率[6]。

如何利用有限的频谱资源应对爆炸式的数据流量增长,是5G中一个非常重要的研究课题[7]。

* **收稿日期**:2020-11-24
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61841107);甘肃省自然科学基金资助项目(18JR3RA153)
作者简介:苗丰满(1982—),男,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:fmmiao_lut@126.com

而 5G 中提高频谱效率的另外一项关键技术是底层认知无线电(cognitive radio, CR)网络。底层 CR 网络的原则是只要次级用户(secondary user, SU)满足主要网络(primary network, PN)的干扰阈值,则允许每个次要用户访问主用户(primary user, PU)的频谱[8]。

NOMA 与 CR 组合成底层 CR-NOMA 网络能进一步提高系统性能。从未来的 6G 甚至更远的发展来看,海量机器类通信(massive machine communication, mMTC)是间歇性激发的,因此先验资源分配会造成极大的资源浪费,从而提供随机访问的共享资源十分必要,CR-NOMA 网络的巨大应用前景恰在于此[9]。文献[10]将协作通信的优点引入 CR-NOMA 网络,文献[11]研究了协作式 CR-NOMA 网络在有硬件损害和干扰下的中断性能。在次级网络中加入中继辅助传输可以有效地改善次级用户功率受限的问题,所以 CR 网络的中继选择、中断概率等问题在文献[12]中有所研究。

无线携能(simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)技术是无线能量传输和无线信息传输相结合的产物,可以实现能量收集和信息的同时传输[13]。文献[14]提出了两种用于能量收集中继网络的时间切换和功率分配的能量收集策略,并推导了系统的吞吐量表达式。文献[15]比较了系统连续时间获取策略和离散时间获取策略两方面的中断概率。

随着现代软硬件技术的不断发展,网络中的终端设备将越来越轻巧便捷,如智能手机、智能手表、可穿戴机器人等,这就导致了终端设备的电池容量只能是很小且有限的,而出于节能和网络干扰的限制,基站发射功率应尽可能小。这种情况下,如何在保证终端正常通信的同时优化系统能效是一个很值得研究的课题。为此,本文通过在用户端引入 SWIPT 技术[16],在考虑主网络干扰的情况下,研究了在最小能量捕获和保证主网络可靠通信等条件的约束下次级网络的传输能效问题,并与 OMA 传输方案进行比较。

1　系统模型

考虑了一个基于 SWIPT 的蜂窝网络下行链路中继辅助的协作底层 CR-NOMA 系统。在这个网络中,包含一个主网络用户 PU,一个辅助源节点 S,一个中继 R 和两个目标用户 D_i($\forall i \in \{1,2\}$),其中 D_1 是远用户,D_2 是近用户。系统模型如图 1 所示,S 和 D_i 的信息传输需要两个阶段来完成。第一阶段,S 向中继 R 传输信息,R 采用解码转发(decode and forward, DF)协议在第二阶段来转发信息。针对所有系统节点有以下假设:

1)所有网络节点均配备单天线,并且遵循半双工模式工作,所有信道服从瑞利衰落且独立同分布。

2)分别定义 S 到 PU,S 到 R,R 到 PU,R 到 D_i 链路信道系数为 $g_j \sim \mathrm{CN}(0,\lambda_i)$,$\lambda_i = d_i^{-\theta}$,$h_j \sim \mathrm{CN}(0,\lambda_j)$,$\lambda_j = d_j^{-\theta}$,$j \in \{SP, SR, RP, 1, 2\}$。$\theta$ 是路径损耗指数,d 是节点间的距离。

3)$P_I \sim \mathrm{CN}(0,\eta\sigma^2)$ 是来自主网络的干扰,所有节点受到的干扰视为相同的高斯白噪声,η 为 P_I 的缩放系数[17]。SN 和 PN 分别表示次级源节点和中继对主用户的干扰。

4)R 以 DF 方式运行,这可能对 PU 造成干扰,假定仅当 PU 没有受到来自 SU 的有害干扰时,才允许进行辅助通信,因此,次级节点的发射功率要受到限制[18],即:

$$P_S = \min\{I/|h_{SP}|^2, \tilde{P}\} \tag{1}$$

$$P_R = \min\{I/|h_{RP}|^2, \hat{P}\} \tag{2}$$

其中,I 表示 PU 处的干扰温度约束,$\tilde{P}$ 和 $\hat{P}$ 分别表示 S 和 R 的最大平均发射功率。

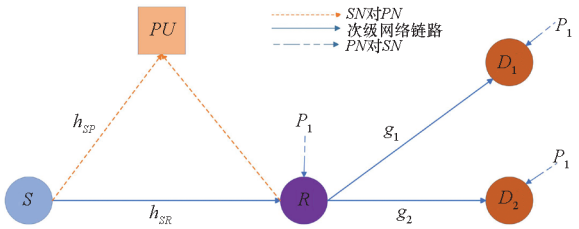


图 1　系统模型

Fig. 1　System model

在第一阶段,S 发送的叠加编码的混合信号为 $\sqrt{P_S a_1}\, x_1 + \sqrt{P_S a_2}\, x_2$,其中 x_i 表示发送给 D_i 的信息,a_i 表示相对应的分配给 D_i 的功率分配因子,为了保证用户公平性[19],$E(|x_i|^2) = 1$,$\sum_{i=1}^{2} a_i = 1$,$|h_1|^2 < |h_2|^2$,$a_1 > a_2$。接收端采用串行干扰消除(successive interference cancellation, SIC)技术解码进行用户信号检测,根据下行链路 NOMA 原理[20],接收端先解码 x_1 信号,然后从叠加信号中作为干扰把 x_1 删除。在第一阶段,R 接收的信息为:

$$y_R = h_{SR}\sqrt{P_S}(\sqrt{a_1}\, x_1 + \sqrt{a_2}\, x_2) + P_I + \omega_R \tag{3}$$

式中,$\omega(\cdot) \sim \mathrm{CN}(0,\sigma^2)$ 表示接收端引入的 AWGN 噪声。R 分别解码 x_1 和 x_2 的接收信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)为:

$$\gamma_{R,1} = \frac{a_1\rho_S|h_{SR}|^2}{a_2\rho_S|h_{SR}|^2 + 1 + \eta} \tag{4}$$

$$\gamma_{R,2}=\frac{a_2\rho_S|h_{SR}|^2}{1+\eta} \tag{5}$$

其中，$\rho_S=P_S/\sigma^2$，$\rho_R=P_R/\sigma^2$。第二阶段，R 将叠加编码信号 $\sqrt{P_R b_1}x_1+\sqrt{P_R b_2}x_2$ 转发给 SU，SU 采用功率分割接收机来对接收信号进行解码和能量捕获，其中接收信号功率的 $\sqrt{1-\vartheta}$ 部分用于信息解码，$\sqrt{\vartheta}$ 部分用于能量捕获。其中，b_i 为中继转发功率分配因子，且 $b_1>b_2$，ϑ 为次用户功率分配因子，D_i 接收的信号和捕获的能量分别为：

$$y_{D_i}=\sqrt{1-\vartheta}\,g_i\left(\sqrt{P_R}\left(\sqrt{b_1}\,x_1+\sqrt{b_2}\,x_2\right)+P_I+\omega_{Di}\right) \tag{6}$$

$$E_i=\vartheta\alpha g_i P_R \tag{7}$$

其中，α 为能量转化效率。

D_1 译码 x_1 时的 SINR 为：

$$\gamma_{D_1,1}=\frac{(1-\vartheta)b_1\rho_R|g_1|^2}{b_2\rho_R|g_1|^2+1+\eta} \tag{8}$$

D_2 译码 x_1 和 x_2 时的 SINR 分别为：

$$\gamma_{D_2,1}=\frac{(1-\vartheta)b_1\rho_R|g_2|^2}{b_2\rho_R|g_2|^2+1+\eta} \tag{9}$$

$$\gamma_{D_2,2}=\frac{(1-\vartheta)b_2\rho_R|g_2|^2}{1+\eta} \tag{10}$$

对应的解码速率分别为：

$$R_{D_1}=\frac{1}{2}\log_2\left[1+\frac{(1-\vartheta)b_1\rho_R|g_1|^2}{b_2\rho_R|g_1|^2+1+\eta}\right] \tag{11}$$

$$R_{D_2}=\frac{1}{2}\log_2\left[1+\frac{(1-\vartheta)b_2\rho_R|g_2|^2}{1+\eta}\right] \tag{12}$$

考虑了次用户能耗效率对中继 CR-NOMA 网络进行评估，把能效定义为传输和速率与系统总能耗的比值[21]。SU 传输的和速率为：

$$R_{\text{total}}=R_{D_1}+R_{D_2} \tag{13}$$

根据次用户传输过程中的能源消耗以及自身捕获的能量，SU 传输系统的实际能耗为：

$$Q_{\text{total}}=P_{\text{els}}+P_R-(E_1+E_2) \tag{14}$$

式中，P_{els} 为除 R 发射功率外的所有 SU 的链路功耗。

次用户传输能效最大化问题为：

$$\begin{aligned}&\max_{P_R,b_2,\vartheta}\ E_{EE}=R_{\text{total}}/Q_{\text{total}}\\&\text{s.t.}\ \ R_{D_1}\geqslant r_{\text{th}}\\&\qquad E_{\text{total}}\geqslant E_{\min}\\&\qquad P_R\leqslant P_{\max}\\&b_1+b_2=1,0<b_2<0.5,0\leqslant\vartheta\leqslant1\end{aligned} \tag{15}$$

其中，r_{th} 代表近用户可以成功解码远用户的最小传输速率，$P_{\max}$ 表示系统最大发射功率限制，$E_{\min}$ 表示最低能量捕获阈值。

2 问题分析

2.1 优化中继功率分配

在给定次用户功率分配因子的条件下优化中继发射功率，分析可知 b_2 只与和速率有关，对 R_{total} 求关于 b_2 的偏导数有：

$$R'_{\text{total}}(b_2)=\bar{\omega}_1-\bar{\omega}_2 \tag{16}$$

其中：

$$\bar{\omega}_1=\frac{(1-\vartheta)P_R|g_2|^2}{1+\eta+(1-\vartheta)b_2\rho_R|g_2|^2}$$

$$\bar{\omega}_2=\frac{(1-\vartheta)P_R|g_1|^2}{1+\eta+(1-\vartheta)b_2\rho_R|g_1|^2}$$

为了方便说明，$\bar{\omega}_i$ 表达式直接省略了对函数性质没有影响的所乘常数部分。为了说明问题，这里定义一个函数 $L(y)$ 并求其关于 y 的偏导数，结果有：

$$L(y)=\frac{(1-\vartheta)\rho_R y}{1+\eta+(1-\vartheta)b_2 y} \tag{17}$$

$$L'(y)=\frac{(1+\eta)(1-\vartheta)\rho_R}{\left[1+\eta+(1-\vartheta)b_2 y\right]^2}\geqslant0 \tag{18}$$

由式(18)得出，$L(y)$ 是关于 y 的单调增函数。又 $|g_2|^2>|g_1|^2$，$\bar{\omega}_1>\bar{\omega}_2$，所以 $R'_{\text{total}}(b_2)>0$，故而系统能效是关于 b_2 的单调增函数[22]，即：

$$b_2^*=\min\left\{\frac{(1-\vartheta)\rho_R|g_2|^2-(1+\eta)(2^{r_{\text{th}}}-1)}{(1-\vartheta)\rho_R|g_2|^2+(1-\vartheta)\rho_R|g_2|^2(2r_{\text{th}}-1)},0.5\right\} \tag{19}$$

2.2 优化用户接收端功率分配系数

给定 P_R 和 b_2 优化 ϑ。对目标函数(15)中第 2 个和第 4 个约束条件变换得到 $\vartheta_{\min}\leqslant\vartheta\leqslant1$。

$$\vartheta_{\min}=\frac{E_{\min}}{\alpha|g_2|^2P_R+\alpha|g_1|^2P_R} \tag{20}$$

以 ϑ 为自变量的函数 $f(\vartheta)$，利用黄金分割算法获得最优 ϑ，即 ϑ^*，如算法 1 所示。

算法 1　利用黄金分割算法获取 ϑ^*

Alg. 1　Using the golden ratio algorithm to get ϑ^*

1. 输入初变始量 $e_1=\vartheta_{\min}$，$c_1=1$，$k=1$，公差 $\varepsilon>0$ 用于停止算法持续迭代，是一个给定的精度，然后计算 $f(\omega_1)$ 和 $f(\mu_1)$，$\omega_1=e_1+0.382(c_1-e_1)$，$\mu_1=e_1+0.618(c_1-e_1)$

2. 若 $|c_k-e_k|<\varepsilon$，输出 $\vartheta^*=(e_k+c_k)/2$，则停止迭代，否则继续迭代。若 $f(\omega_1)>f(\mu_1)$，执行第 3 步，否则执行第 4 步

3. 设 $e_{k+1}=\omega_k$，$c_{k+1}=\mu_k$，$\mu_{k+1}=\omega_k$，$\mu_{k+1}=e_{k+1}+0.618(c_{k+1}-e_{k+1})$，计算 $f(\mu_{k+1})$，然后执行第 5 步

4. 设 $e_{k+1}=e_k$，$c_{k+1}=\mu_k$，$\mu_{k+1}=\omega_k$，$\omega_{k+1}=e_{k+1}+0.382(c_{k+1}-e_{k+1})$，计算 $f(\omega_{k+1})$，然后执行第 5 步

5. $k=k+1$，然后执行第 2 步

2.3　优化中继发射功率

通过分式规划的方法将目标函数转化为等式最优解问题,即:

$$\max_{P_R} E_{EE} = R^*_{\text{total}} - \mu(P_{\text{els}} + P_R - E_1 - E_2) \tag{21}$$

式中,μ 为辅助变量, R^*_{total}为 R_{total}的变形。

$$R^*_{\text{total}} = \log_2\left[1 + \frac{(1-\vartheta)b_2\rho_R|g_2|^2}{1+\eta}\right] + \log_2[1+\eta+(1-\vartheta)\rho_R|g_1|^2] - \log_2[1+\eta+(1-\vartheta)b_2\rho_R|g_1|^2] \tag{22}$$

由于和速率的存在导致目标函数是非凸问题,以泰勒展开法对 R^*_{total}的第三项在 P_0 处进行展开,变换后的和速率为:

$$\hat{R}^*_{\text{total}} = \log_2[1+\eta+(1-\vartheta)\rho_R|g_1|^2] + \log_2\left[1+\frac{1+(1-\vartheta)\rho_R|g_2|^2}{1+\eta}\right] + \frac{(1-\vartheta)b_2\rho_R|g_1|^2}{\ln 2[1+\eta+(1-\vartheta)b_2\rho_0|g_1|^2]} + \phi \tag{23}$$

式中:

$$\phi = \frac{(1-\vartheta)b_2\rho_0|g_1|^2}{\ln 2[1+\eta+(1-\vartheta)b_2\rho_0|g_1|^2]} - \log_2[1+\eta+(1-\vartheta)b_2\rho_0|g_1|^2] - \zeta$$

其中,$\rho_0 = P_0/\sigma^2$,ζ 为泰勒展开误差。当给定 P_0 时 ϕ 是定值。

$$R^*_{D_1}(P_R) = \log_2[(1-\vartheta)\rho_R|g_2|^2+1+\eta] - \frac{(1-\vartheta)b_2|g_2|^2\rho_R}{2\ln 2[(1-\vartheta)b_2]\rho_0|g_2|^2+1+\eta} + \varphi \tag{24}$$

当 P_0 给定时 φ 为定值,即:

$$\varphi = \frac{(1-\vartheta)b_2\rho_0|g_2|^2}{2\ln 2[(1-\vartheta)b_2\rho_0|g_2|^2]+1+\eta} - \frac{1}{2}\log_2[(1-\vartheta)b_2\rho_0|g_2|^2+1+\eta] \tag{25}$$

$$\begin{aligned} \max_{P_R} & E_{EE} = \hat{R}^*_{\text{total}}(P_R) - \mu(P_{\text{total}} - E_1 - E_2) \\ \text{s.t.}\ & R^*_{D_1}(P_R) \geqslant r_{\text{th}} \\ & E_{\text{total}}(P_R) \geqslant E_{\min} \\ & P_R \leqslant P_{\max} \end{aligned} \tag{26}$$

综上,目标函数近似为凸优化问题[23],通过拉格朗日对偶算法求解 P_R 的最优解,即:

$$L(P_R,w,\beta,\nu) = R'_{\text{total}}(P_R) - \mu(P_R + P_{\text{els}} - E_1 - E_2) + \omega[R'_P(P_R) - r_{\text{th}}] + \beta[E_{\text{total}}(P_R) - E_{\min}] + \nu(P_{\max} - P_R) \tag{27}$$

其中,w,β,ν 分别为拉格朗日乘子,分别对 P_R,w,β,ν 求偏导,求得对应的极值点 P^*_R,w^*,β^*,ν^*,则 P_R 的最优值在边界处或目标函数的极值点处取得,即:

$$P_R = \begin{cases} P^*_R, \max(\chi_1,\chi_2) \leqslant P^*_R \leqslant P_{\max} \\ \chi_1, \max(\chi_2,P^*_R) \leqslant \chi_1 \leqslant P_{\max} \\ \chi_2, \max(\chi_1,P^*_R) \leqslant \chi_2 \leqslant P_{\max} \\ P_{\max}, \max(\chi_1,\chi_2) \leqslant P_{\max} \leqslant P^*_R \end{cases} \tag{28}$$

其中:

$$\chi_1 = (2^{r_{\text{th}}}-1)(1+\eta)/[b_2|g_1|^2 - b_2(2^{r_{th}}-1)\cdot|g_1|^2(1-\vartheta)]$$

$$\chi_2 = E_{\min}/(\vartheta\alpha|g_2|^2) + \vartheta\alpha|g_1|^2$$

2.4　多目标联合优化

经过前面部分的过程优化,总结提出一种多目标的交替迭代优化算法来获得最优解,详见算法 2。

算法 2　利用多目标联合优化算法获取 E^*_{EE}

Alg. 2　Using multi-objective joint optimization algorithm to get E^*_{EE}

1. 初始化输入变量,$\alpha,P_R,P_{\text{els}},r_{\text{th}},E_{\min},P_{\max},b_2(0)$,$\vartheta(0)$,迭代次数 k,$E_{EE}(0)=\tau$,τ 为收敛精度
2. $|E_{EE}(k)-E_{EE}(k-1)| \geqslant \tau$
3. 根据式(28)计算 $P_R(k)$,根据式(19)计算 $b_2(k)$
4. 通过算法 1 求得 $\vartheta(k)$
5. 根据式(15)计算 $E_{EE}(k)$,并输出最优解 E^*_{EE}

算法复杂度分析:黄金分割算法的复杂度是 $O(\log_2(2n))$,而多目标联合优化算法的复杂度是 $O(n)$,所以本文算法具有低复杂度。

3　仿真分析

通过 MATLAB 对此系统进行仿真,仿真参数设置见表 1。

表 1　仿真参数设置

Tab. 1　Simulation parameter setting

参数	取值
α	0.8
$r_{\text{th}}/(\text{bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1})$	0.1
I/dB	20
E_{min}/μW	50
θ	3
d_1/m	10
d_2/m	2
σ^2	1
η	0.5
$\bar{P}$/dB	30
P_{els}	0.01

图 2 所示为次用户和速率与不同的中继功率分配因子的关系。由图可知,随着功率因子的增大次用户的传输和速率逐渐增大。

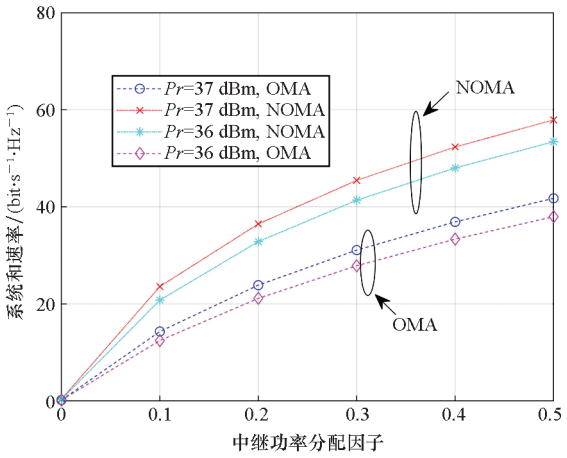


图 2 次用户和速率与不同的中继功率分配因子的关系

Fig. 2 Relationship between secondary users and rates and different relay power allocation factors

图 3 所示为中继传输功率与能效的关系。由图可知,SN 系统的能效随着发射功率的增加先增大后减小,从图中可以看到在发射功率为 20 dBm 附近能效达到最大值以后逐渐降低。不难理解,增大发射功率会使得传输和速率增加的同时也会造成传输能耗的增加,增大主用户干扰。

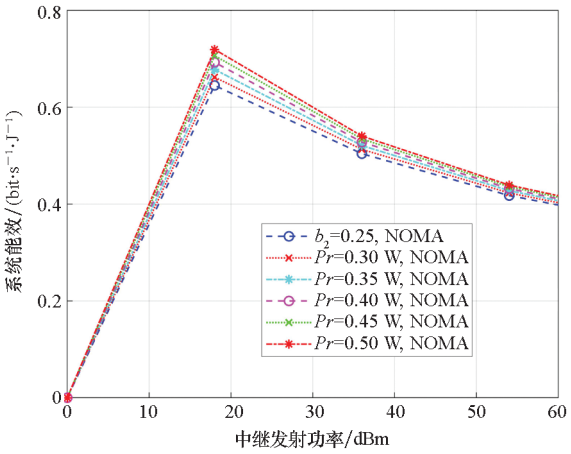


图 3 中继传输功率与能效的关系

Fig. 3 Relationship between relay transmission power and energy efficiency

图 4 所示为用户端接收功率分配因子与能效的关系。由图可知,随着功率因子的增加,能效先增大后减小,采用 NOMA 方式传输比 OMA 方案能效提升 47%,这是由于 NOMA 方案在相同的时间内频谱利用效率更高。在用户功率分配系数 ϑ 达到 0.8 时系统能效逐渐减小,这是由于当功率分配系数增加到一定程度的时候其已经不能成为影响能效的主要积极因素。

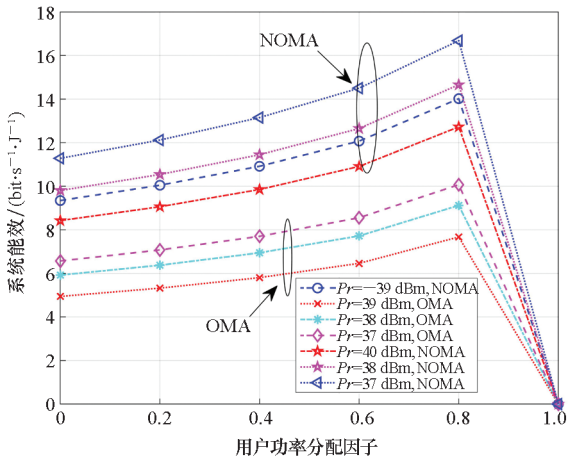


图 4 用户端接收功率分配系数与能效的关系

Fig. 4 Relationship between the user end received power allocation factor and energy efficiency

4 结论

本文考虑了底层 CR-NOMA 中继网络中次级网络的传输能效。其中,中继传输采用了发展绿色通信的重要方案中的 SWIPT 技术,对中继发射功率、功率分配因子与源端以及用户接收端的功率分配进行了优化,在保证主用户可靠通信的条件下分析各个因子对系统性能的影响。仿真结果说明了分析与方案是合理有效的,为方案在未来更加轻巧便捷的终端环境中得以应用提供了支撑。

参考文献(References)

[1] DING Z G, LEI X F, 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.

[2] LI A X, LAN Y, CHEN X H, et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for future downlink radio access of 5G[J]. China Communications, 2015, 12(Suppl): 28 – 37.

[3] LIU Y W, QIN Z J, ELKASHLAN M, et al. Nonorthogonal multiple access for 5G and beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(12): 2347 – 2381.

[4] 田心记, 张丹青, 李晓静. 下行 NOMA 系统中公平的功率分配方案[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(1): 36 – 41.
TIAN X J, ZHANG D Q, LI X J. Fairly power allocation scheme in downlink NOMA systems[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(1): 36 – 41. (in Chinese)

[5] ARZYKULOV S, NAURYZBAYEV G, TSIFTSIS T A, et al. On the outage of underlay CR-NOMA networks with detect-and-forward relaying[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2019, 5(3): 795 – 804.

[6] ZHU L P, ZHANG J, XIAO Z Y, et al. Optimal user pairing for downlink non-orthogonal multiple access (NOMA)[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 328 – 331.

[7] LIU Y W, DING Z G, ELKASHLAN M, et al. Nonorthogonal multiple access in large-scale underlay cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 10152 – 10157.

[8] FU Y H, HE Z M. Bayesian-inference-based sliding window trust model against probabilistic SSDF attack in cognitive radio networks[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(2): 1764 – 1775.

[9] NAURYZBAYEV G, ARZYKULOV S, TSIFTSIS T A, et al. Performance of cooperative underlay CR-NOMA networks over Nakagami-m channels [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops, 2018: 1 – 6.

[10] DAHI N, HAMDI N. Relaying in non-orthogonal multiple access systems with simultaneous wireless information and power transfer [C]//Proceedings of the 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference, 2018: 164 – 168.

[11] DO D T, NGUYEN M S V, JAMEEL F, et al. Performance evaluation of relay-aided CR-NOMA for beyond 5G communications[J]. IEEE Access, 2020, 8: 134838 – 134855.

[12] 鲍慧, 佘蕊, 石梦倩, 等. CR-NOMA 双向中继自干扰能量回收传输方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 121 – 126.
BAO H, SHE R, SHI M Q, et al. Research on CR-NOMA two-way relay self-interference energy harvesting transmission method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(12): 121 – 126. (in Chinese)

[13] ARZYKULOV S, TSIFTSIS T A, NAURYZBAYEV G, et al. Outage performance of cooperative underlay CR-NOMA with imperfect CSI[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(1): 176 – 179.

[14] NASIR A A, ZHOU X Y, DURRANI S, et al. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7): 3622 – 3636.

[15] NASIR A A, ZHOU X Y, DURRANI S, et al. Wireless-powered relays in cooperative communications: time-switching relaying protocols and throughput analysis [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(5): 1607 – 1622.

[16] 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.

[17] QUEK T Q S, ROCHE G D I, GVEN I, et al. Small cell networks: deployment, PHY techniques, and resource management[M]. New York: Cambridge University Press, 2013.

[18] ARZYKULOV S, NAURYZBAYEV G, TSIFTSIS T A. Underlay cognitive relaying system over α-μ fading channels[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(1): 216 – 219.

[19] ARZYKULOV S, TSIFTSIS T A, NAURYZBAYEV G, et al. Outage performance of underlay CR-NOMA networks with detect-and-forward relaying[C]//Proceedings of IEEE Global Communications Conference, 2018: 1 – 6.

[20] YU W J, CHORTI A, MUSAVIAN L, et al. Effective secrecy rate for a downlink NOMA network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(12): 5673 – 5690.

[21] PEI L, YANG Z H, PAN C H, et al. Energy-efficient D2D communications underlaying NOMA-based networks with energy harvesting[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(5): 914 – 917.

[22] MOUNCHILI S, HAMOUDA S. Pairing distance resolution and power control for massive connectivity improvement in NOMA systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 4093 – 4103.

[23] 鲍慧, 佘蕊, 赵伟. 基于 SWIPT 的双向中继 CR-NOMA 系统研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(10): 111 – 115, 132.
BAO H, SHE R, ZHAO W. Study on two-way Relay CR-NOMA System based on SWIPT[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(10): 111 – 115, 132. (in Chinese)