文章编号：1003-0530(2020)02-0196-07

两级中继选择的协作 CR-NOMA 网络性能分析

乔宇航 贺玉成 杨键泉 周 林
（华侨大学厦门市移动多媒体通信重点实验室，福建厦门 361021）

摘 要：本文研究了中继选择方案对协作下认知非正交多址（CR-NOMA）网络中断性能的影响，提出了一种两级中继选择方案。第一时隙在保证主用户服务质量的基础上，次级网络源节点向认知中继集群广播叠加信号。第二时隙认知中继提供解码转发服务，协助源节点传输信息。基于上述假设，推导了次级用户中断概率的闭合表达式并给出了分析结果。证明相比于部分中继选择策略，两级中继选择策略可以达到更好的中断性能和更大的分集增益。同时本文的分析结果验证了备选中继节点数目和功率分配因子对系统中断性能的影响，蒙特卡罗仿真验证了理论结果。

关键词：非正交多址；认知无线电；中继选择；中断概率

中图分类号：TN92 **文献标识码：**A **DOI：**10.16798/j.issn.1003-0530.2020.02.005

引用格式：乔宇航，贺玉成，杨键泉，等. 两级中继选择的协作 CR-NOMA 网络性能分析[J]. 信号处理，2020，36(2)：196-202. DOI：10.16798/j.issn.1003-0530.2020.02.005.

Reference format：Qiao Yuhang, He Yucheng, Yang Jianquan, et al. Performance Analysis for Cooperative CR-NOMA with Two-Stage Relay Selection[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(2): 196-202. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2020.02.005.

Performance Analysis for Cooperative CR-NOMA with Two-Stage Relay Selection

Qiao Yuhang He Yucheng Yang Jianquan Zhou Lin
(Xiamen Key Laboratory of Mobile Multimedia Communications, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract: This paper studied the impact of relay selection scheme on the outage performance of cognitive non-orthogonal multiple access (CR-NOMA) networks. A two-stage relay selection scheme is proposed. In the first time slot, on the basis of ensuring the quality of service of the primary user, the source broadcasts the superimposed signal to the cognitive relay cluster. In the second time slot, decode and-forward (DF) protocol is used at the selected relay to assist simultaneous transmission from the source to destination users. Based on the above assumptions, the closed expression of the secondary user outage probability is derived and the analysis results are given. It is proved that the two-stage relay selection strategy can achieve better outage performance and greater diversity gain than partial relay selection strategy. At the same time, the analysis results verify the influence of the number of alternate relay nodes and the power allocation factor on the system outage performance. The Monte Carlo simulation verified the theoretical results.

Key words: non-orthogonal multiple access; cognitive radio; relay selection; outage probability

收稿日期：2019-11-21；修回日期：2020-01-15
基金项目：福建省自然科学基金(2018J01096)；华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(18013082031)；重庆市/信息产业部“计算机网络与通信技术重点实验室”开放基金(CY-CNCL-2017-05)

1　引言

非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术被认为是一种很有应用前景的技术,具有高频谱效率,高容量和低时延等特点。已有的研究表明,NOMA 技术不仅能进一步提高频谱效率,也是逼近多用户信道容量界的有效手段。在系统设计方面,NOMA 通过时域、频域、码域/空域的非正交设计,在相同的资源上为更多的用户服务,进而有力地提升系统容量和用户接入能力。在 NOMA 网络中,主要通过功率域复用区分多用户。根据用户优先级的不同分配不同的功率,优先级通常由信道质量或服务质量决定。即信道质量较差的远端用户分配的传输功率较大,而近端用户的功率较小。因此为了解码自己的信号,近端用户使用串行干扰消除技术首先解码其他功率更高的信号,并将其从叠加信号中删除。

文献[1]研究了放大转发的 NOMA 系统的中断性能,提出了一种使用部分中继选择的最佳方案。文献[2]针对协作 NOMA 中继选择问题,提出了一种次优的中继选择方案,采用 max-min 中继选择策略满足用户的服务质量,剩余中继继续接收信号,等待机会。但都研究建立在信道状态信息已知,且具备完备串行干扰消除的前提下。文献[3]研究了基于非正交多址的部分中继选择系统在过时信道状态信息估计下的中断性能。文献[4]分析了 NOMA 网络中不同优先级用户的中继选择问题,推导了未知优先级情况下 NOMA 系统中两用户的中断概率闭式解。文献[5]针对协作 NOMA 系统提出了一种第 N 个最佳中继的选择策略,同时利用能量采集技术延长了中继的工作时间。文献[6]针对 NOMA 网络的中继选择问题,首次提出了一种新的两级中继选择策略,并证明了该方案能够在所有可能的中继选择方案中实现最小中断概率和最大分集增益。

上述研究仅仅针对 NOMA 网络,认知无线电技术是另一种提升频谱效率,解决频谱资源短缺的有效方法。在未来的海量机器类通信(Massive machine type communications,mMTC)中 mMTC 是间歇性激活的,由于存在大量潜在活动的 mMTC 设备,先验资源分配会造成极大的资源浪费,提供随机访问的共享资源十分必要,这是 CR-NOMA 网络最重要的应用场景。文献[7]针对 CR-NOMA 的混合系统提出了一种功率分配算法。文献[8]研究了 Nakagami-m 信道下,解码转发的 CR-NOMA 系统的中断性能。文献[9-10]研究了非完备信道状态信息下,两用户和多用户 CR-NOMA 网络的中断性能。文献[11]研究了不完全串行干扰消除下,CR-NOMA 网络的中断性能。

文献[8-11]的研究主要集中在非完备信道状态信息和不完全串行干扰消除下 CR-NOMA 网络的性能分析。CR 的网间干扰和 NOMA 的网内干扰会降低协作 CR-NOMA 网络的通信性能,文献[12-13]提出了一种强用户协助弱用户进行通信的方案,推导了各次级网络用户中断概率和渐进遍历容量闭合表达式。文献[14]设计了一种具备直通链路的 CR-NOMA 网络协作通信方案,利用分集增益提升系统的中断性能。文献[12-14]主要通过强用户协助弱用户通信或增加直通链路的方式提升 CR-NOMA 网络的中断性能。但在未来的 mMTC 通信网络中大量的传感器、执行器等类似设备相互连接,彼此之间可以互为中继,提供了大量的中继机会。文献[15]利用部分中继选择技术提升 CR-NOMA 系统的中继性能,但根据源节点到中继节点集群的瞬时状态信息的中继选择方案对系统中断性能的提升有限。本文提出了一种基于 CR-NOMA 混合系统的两级中继选择技术,分析和仿真结果证明,该方案能够达到比文献[15]方案更好的中断性能。

2　系统模型

系统模型如图 1 所示,考虑了一个下行协作 NOMA 网络,该网络包括一个主网络用户 PU、一个次级网络源节点 S,N 个次级中继 $\{R_n\}_{n=1}^{N}$ 和两个目标用户(D_1 和 D_2),所有中继采用解码转发协议(DF)。假设所有的节点都配备单天线以半双工模式工作,系统中所有的信道均经历准静态平坦瑞利衰落和加性高斯白噪声,且源节点与目的节点之间距离过远或建筑物遮挡,不存在直通链路。P_I 表示主网络源节点对次级网络的干扰,可以被视为加性高斯白噪声,$P_I \sim CN(0,\sigma_I^2)$。同时假设所考虑的 CR-NOMA 网络中所有的信道都是独立同分布的瑞利衰落信道。

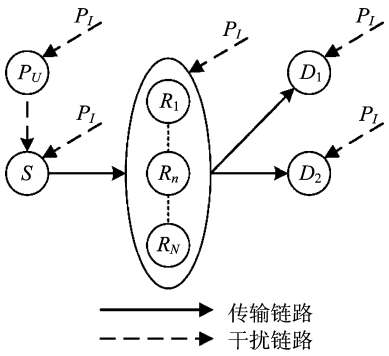

图 1 系统模型

Fig. 1 System model

在第一时隙中源节点 S 向所有中继节点广播发送叠加信号 $\sqrt{P_S\alpha_1}x_1+\sqrt{P_S\alpha_2}x_2$，其中 P_S 为源节点 S 的发射功率，α_i 为功率分配因子，$\alpha_1+\alpha_2=1$，x_i 为预备发送给目的节点 D_i 的信号，$E(|x_i|^2)=1$。根据 NOMA 原理，接收机进行串行干扰消除从而实现多用户信号检测。在下行链路中，最优 SIC 算法通常是根据信道增益增序进行的。在不失一般性的前提下，假设中继 R_n 到用户 D_2 的信道质量优于中继 R_n 到用户 D_1 的信道质量。为了平衡所有用户之间吞吐量的公平性，要求 $\alpha_1>\alpha_2$。因此中继 R_n 接收到的信号可以表示为：

$$y_{R_n}=h_{SR_n}\sum_{i=1}^{2}\sqrt{P_S\alpha_i}x_i+n_{R_n}+P_I \tag{1}$$

中继 R_n 解码信号 x_1 的信噪比为：

$$\gamma_{R_n\to x_1}=\frac{|h_{SR_n}|^2P_S\alpha_1}{|h_{SR_n}|^2P_S\alpha_2+\sigma_{R_n}^2+\sigma_I^2} \tag{2}$$

中继 R_n 解码信号 x_2 的信噪比为：

$$\gamma_{R_n\to x_2}=\frac{|h_{SR_n}|^2P_S\alpha_2}{\sigma_{R_n}^2+\sigma_I^2} \tag{3}$$

其中 h_{SR_n} 为源节点 S 到中继 R_n 的信道系数，服从参数为 λ_{SR_n} 的复高斯分布，$h_{SR_n}\sim CN(0,\lambda_{SR_n})$，$n_{R_n}$ 为中继 R_n 处的加性高斯白噪声，$n_{R_n}\sim CN(0,\sigma_{R_n}^2)$。根据 NOMA 原理，中继 R_n 首先检测强信号，然后将信号 x_1 从叠加信号中解码并消除，最后在没有其他信号干扰的情况下检测并解码信号 x_2。中继节点成功解码的条件可以表示为：$\gamma_{R_n\to x_1}>\xi_1$，$\gamma_{R_n\to x_2}>\xi_2$。

在第二时隙中，假设中继 R_n 可以成功解码信号 x_1 和 x_2 并转发叠加信号 $\sqrt{P_R\alpha_1}x_1+\sqrt{P_R\alpha_2}x_2$。因此，用户 D_i 接收到的信号可以表示为：

$$y_{D_i}=h_{R_nD_i}\sum_{i=1}^{2}\sqrt{P_R\alpha_i}x_i+n_{D_i}+P_I \tag{4}$$

用户 D_i 解码信号 x_1 的信噪比为：

$$\gamma_{D_i\to x_1}=\frac{|h_{R_nD_i}|^2P_R\alpha_1}{|h_{R_nD_i}|^2P_R\alpha_2+\sigma_{D_i}^2+\sigma_I^2} \tag{5}$$

用户 D_i 解码信号 x_2 的信噪比为：

$$\gamma_{D_i\to x_2}=\frac{|h_{R_nD_i}|^2P_R\alpha_2}{\sigma_{D_i}^2+\sigma_I^2} \tag{6}$$

其中 $h_{R_nD_i}$ 表示中继 R_n 到用户 D_i 的信道系数，服从参数为 $\lambda_{R_nD_i}$ 的复高斯分布，$h_{R_nD_i}\sim CN(0,\lambda_{R_nD_i})$，$i\in\{1,2\}$，$n_{D_i}$ 表示用户 D_i 的加性高斯白噪声，$n_{n,i}^d\sim CN(0,\sigma_{D_i}^2)$。为了方便计算令 $\sigma_{D_i}^2=\sigma_{R_n}^2=\sigma_1^2$，各节点接收的高斯白噪声为 $\sigma^2=\sigma_1^2+\sigma_I^2$。

在底层 CR 网络中，次级网络传输节点只能在 P_U 不受到有害干扰的情况下使用与 P_U 相同的频段，因此，为了保证通信的可靠性，次级网络源节点 S 发射功率设定为 $P_S=\min\{P_S^M,Q/|h_{SP}|^2\}$，其中 P_S^M 为 S 的最高发射功率，Q 为 P_U 处的噪声温度限（interference temperature constraint，ITC）。h_{SP} 表示源节点 S 到主用户 P_U 之间的信道系数，服从参数为 λ_{SP} 的复高斯分布，$h_{SP}\sim CN(0,\lambda_{SP})$。

3 中继选择策略

（1）部分中继选择策略（Partial Relay Selection Scheme，PRSS）：这种中继选择策略根据瞬时信道状态信息（$S\to R_n$）选择最佳中继，可以表示为：

$$R_b=\arg\max_{n=1,2,\cdots N}|h_{SR_n}|^2 \tag{7}$$

（2）两级中继选择策略（Two-Stage Relay Selection Scheme，TSRSS）：这种中继选择策略同时实现两个目的，一是保证用户 D_1 目标速率的实现，二是为用户 D_2 提供尽可能大的数据传输速率。这种中继选择策略分为两步，第一步是通过用户 D_1 的目标速率构建中继子集：

$$\mathrm{S_r}=\left\{\begin{matrix}n:1\leqslant n\leqslant N,\\ \gamma_{R_n\to x_1}\geqslant\xi_1,\gamma_{D_1\to x_1}\geqslant\xi_1,\gamma_{D_2\to x_1}\geqslant\xi_1\end{matrix}\right\} \tag{8}$$

其中 $\xi_1=2^{2R_1}-1$，R_1 为信号 x_1 的目标速率。

因此中继子集中所有的中继都能够将信号 x_2 视为干扰成功解码信号 x_1。第二步是在中继子集中选择使用户 D_2 速率最大化的中继。

$$n^*=\arg\max_n\{\min\{\gamma_{R_n\to x_2},\gamma_{D_2\to x_2}\},n\in\mathrm{S_r}\} \tag{9}$$

4　性能分析

本节将分析两级中继选择策略下系统的中断概率，整个系统的中断情况可以分为两类，第一种情况为中继子集的大小为 0，记为事件 O_1，第二种情况是被选中的最优中继或用户 D_2 无法成功解码信号 x_2，记为事件 O_2，系统总中断情况可以表示为：

$$O = O_1 \cup O_2 \tag{10}$$

因此整个系统的中断概率可以表示为：

$$P(O) = P(O_1) + P(O_2) \tag{11}$$

$P(O_1)$ 项计算如下：

$$P(O_1) = P\{|S_r| = 0\} = \prod_{n=1}^{N}\left[1 - \underbrace{P\begin{Bmatrix}\gamma_{R_n\to x_1} \geqslant \xi_1, \\ \gamma_{D_1\to x_1} \geqslant \xi_1, \\ \gamma_{D_2\to x_1} \geqslant \xi_1\end{Bmatrix}}_{\Phi}\right] \tag{12}$$

其中 $|S_r|$ 表示集合 S_r 的大小。因为所有的信道服从准静态平坦瑞利信道且相互独立，根据公式(2)、(5)，通过数学计算可以得到：

$$P(O_1) = P\{|S_r| = 0\} = \left(1 - \underbrace{\left(\begin{matrix} e^{-\frac{\Theta\sigma^2}{P_S^M\lambda_{SR_n}}}\left(1 - e^{-\frac{Q}{P_S^M\lambda_{SP}}}\right) + \\ \frac{Q}{\Theta\sigma^2\lambda_{SP} + Q} e^{-\left(\frac{\Theta\sigma^2\lambda_{SP}+Q}{\lambda_{SP}P_S^M}\right)}\end{matrix}\right) \times e^{-\frac{\Theta\sigma^2}{P_R\lambda_{R_nD_1}}} e^{-\frac{\Theta\sigma^2}{P_R^M\lambda_{R_nD_2}}}}_{\Phi}\right)^N \tag{13}$$

其中 $\Theta = \xi_1/(\alpha_1 - \alpha_2\xi_1)$，该式成立的条件为 $\Theta > 0$，否则 $P(O_1) = 1$。

如果 $|S_r| > 0$，$P(O_2)$ 项可以表示为：

$$P(O_2) = P\{\min\{\gamma_{R_{n*}\to x_2}, \gamma_{D_2\to x_2}\} < \xi_2, |S_r| > 0\} = P\{x_{n*} < \xi_2, |S_r| > 0\} = \sum_{l=1}^{N} P\{x_{n*} < \xi_2 \,|\, |S_r| = l\} P\{|S_r| = l\} \tag{14}$$

其中

$$x_n = \min\{\gamma_{R_n\to x_2}, \gamma_{D_2\to x_2}\} \tag{15}$$

$$x_{n*} = \max\{x_i, \forall i \in S_r\} \tag{16}$$

$$F(\xi_2) = P\left\{\min\begin{Bmatrix}\gamma_{R_n\to x_2}, \\ \gamma_{D_2\to x_2}\end{Bmatrix} < \xi_2 \,|\, n \in S_r, |S_r| > 0\right\} = \frac{\underbrace{P\begin{Bmatrix}\min\{\gamma_{R_n\to x_2}, \gamma_{D_2\to x_2}\} < \xi_2, \\ \gamma_{R_n\to x_1} \geqslant \xi_1, \gamma_{D_2\to x_1} \geqslant \xi_1\end{Bmatrix}}_{\Delta_1}}{\underbrace{P\{\gamma_{R_n\to x_1} \geqslant \xi_1, \gamma_{D_2\to x_1} \geqslant \xi_1\}}_{\Delta_2}} \tag{17}$$

其中 $F(x)$ x_n 的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)，上述表达式成立的前提条件为 $\xi_2 > \Theta\alpha_2$，否则 $F(x)$ 为 0。

由于是 P_S 是关于 P_S^M 和关于 $Q/|h_{SP}|^2$ 的函数，所以可以将 Δ_1 改写为：

$$\Delta_1 = \Delta_3 + \Delta_4 \tag{18}$$

$$\Delta_2 = P\{\gamma_{R_n\to x_1} > \xi_1, \gamma_{D_2\to x_1} > \xi_1\} = e^{-\frac{\Theta\sigma^2}{P_R\lambda_{R_nD_1}}} e^{-\frac{\Theta\sigma^2}{P_R^M\lambda_{R_nD_2}}} \tag{19}$$

$$\Delta_3 = P\begin{Bmatrix}\min\left\{\frac{P_S^M|h_{SR_n}|^2\alpha_2}{\sigma^2}, \frac{P_R|h_{R_nD_2}|^2\alpha_2}{\sigma^2}\right\} < \xi_2, \\ \gamma_{R_n\to x_1} > \xi_1, \gamma_{D_2\to x_1} > \xi_1, P_S^M \leqslant \frac{Q}{|h_{SP}|^2}\end{Bmatrix} \tag{20}$$

$$\Delta_4 = P\begin{Bmatrix}\min\left\{\frac{Q|h_{SR_n}|^2\alpha_2}{|h_{SP}|^2\sigma^2}, \frac{P_R|h_{R_nD_2}|^2\alpha_2}{\sigma^2}\right\} < \xi_2, \\ \gamma_{R_n\to x_1} > \xi_1, \gamma_{D_2\to x_1} > \xi_1, |h_{SP}|^2 > \frac{Q}{P_S^M}\end{Bmatrix} \tag{21}$$

先分析 Δ_3 的计算，Δ_4 的计算与 Δ_3 类似，在之后给出。Δ_3 仍然无法直接写出积分表达式计算，通过概率论知识可以将 Δ_3 表示为：

$$\Delta_3 = \Delta_5 + \Delta_6 \tag{22}$$

$$\Delta_5 = P\begin{Bmatrix}|h_{SR_n}|^2 < \frac{\xi_2\sigma^2}{P_S^M\alpha_2}, |h_{R_nD_2}|^2 \geqslant \frac{P_S^M|h_{SR_n}|^2}{P_R}, \\ |h_{SR_n}|^2 > \frac{\Theta\sigma^2}{P_S^M}, |h_{SP}|^2 \leqslant \frac{Q}{P_S^M}\end{Bmatrix} \tag{23}$$

$$\Delta_6 = P\begin{Bmatrix}|h_{R_nD_2}|^2 < \frac{\xi_2\sigma^2}{P_R\alpha_2}, |h_{SR_n}|^2 > \frac{|h_{R_nD_2}|^2\sigma^2P_R}{P_S^M\sigma^2}, \\ |h_{R_nD_2}|^2 > \frac{\Theta\sigma^2}{P_R}, |h_{SP}|^2 \leqslant \frac{Q}{P_S^M}\end{Bmatrix} \tag{24}$$

通过概率论知识可以得到 Δ_5 的积分表达式与数值

结果为：

$$\Delta_5=\int_0^{\frac{Q}{P_S^M}}\int_{\frac{\Theta\sigma^2}{P_S^M}}^{\frac{\xi_2\sigma^2}{P_S^M\alpha_2}}\int_{\frac{P_S^M y}{P_R}}^{\infty}f(w,y,z)\,\mathrm{d}w\mathrm{d}y\mathrm{d}z=$$

$$\Theta_1\left(\mathrm{e}^{-\frac{\Theta\sigma^2}{\Theta_1 P_S^M\lambda_{SR_n}}}-\mathrm{e}^{-\frac{\xi_2\sigma^2}{\Theta_1 P_S^M\alpha_2\lambda_{SR_n}}}\right)\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{Q}{P_S^M\lambda_{SP}}}\right)\tag{25}$$

其中 $\Theta_1=(P_R\sigma_{R_n}^2\lambda_{R_nD_2})/(P_S^M\sigma_{D_2}^2\lambda_{SR_n}+P_R\sigma_{R_n}^2\lambda_{R_nD_2})$，$f(w,y,z)$ 为 $|h_{SR_n}|^2$、$|h_{R_nD_2}|^2$、$|h_{SR_n}|^2$ 的联合概率密度函数(Joint Probability Density Function，JPDF)。

$$f(w,y,z)=\frac{1}{\lambda_{R_nD_2}\lambda_{SR_n}\lambda_{SP}}\mathrm{e}^{-\frac{w}{\lambda_{R_nD_2}}+\frac{y}{\lambda_{SR_n}}+\frac{z}{\lambda_{SP}}}\tag{26}$$

与 Δ_5 的相类似，Δ_6 的数值结果为：

$$\Delta_6=\Theta_2\left(\mathrm{e}^{-\frac{\Theta\sigma^2}{\Theta_2 P_R\lambda_{R_nD_2}}}-\mathrm{e}^{-\frac{\xi_2\sigma^2}{\Theta_2 P_R\alpha_2\lambda_{R_nD_2}}}\right)\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{Q}{P_S^M\lambda_{SP}}}\right)\tag{27}$$

其中 $\Theta_2=(P_S^M\sigma^2\lambda_{SR_n})/(P_S^M\sigma^2\lambda_{SR_n}+P_R\sigma^2\lambda_{R_nD_2})$。

与 Δ_3 类似，Δ_4 可以表示为：

$$\Delta_4=\Delta_7+\Delta_8\tag{28}$$

$$\Delta_7=P\left\{\begin{array}{l}|h_{SR_n}|^2<\dfrac{\xi_2\sigma^2|h_{SP}|^2}{Q\alpha_2},\ |h_{R_nD_2}|^2>\dfrac{Q|h_{SR_n}|^2}{P_R|h_{SP}|^2},\\ |h_{SR_n}|^2>\dfrac{\Theta\sigma^2|h_{SP}|^2}{Q},\ |h_{SP}|^2>\dfrac{Q}{P_S^M}\end{array}\right\}\tag{29}$$

$$\Delta_8=P\left\{\begin{array}{l}|h_{R_nD_2}|^2<\dfrac{\xi_2\sigma^2}{P_R\alpha_2},\ |h_{R_nD_2}|^2>\dfrac{\Theta\sigma^2}{P_R},\\ |h_{SR_n}|^2>\dfrac{P_R|h_{R_nD_2}|^2|h_{SP}|^2}{Q},\ |h_{SP}|^2>\dfrac{Q}{P_S^M}\end{array}\right\}\tag{30}$$

通过概率论知识可以得到 Δ_7 的积分表达式与数值结果为：

$$\Delta_7=\int_{\frac{Q}{P_S^M}}^{\infty}\int_{\frac{\Theta\sigma^2 z}{Q}}^{\frac{\xi_2\sigma^2 z}{Q\alpha_2}}\int_{\frac{Q\sigma^2 y}{P_R\sigma^2 z}}^{\infty}f(w,y,z)\,\mathrm{d}w\mathrm{d}y\mathrm{d}z=$$

$$\varsigma_1\mathrm{e}^{-\frac{\Theta\sigma^2}{P_R\lambda_{R_nD_2}}}\mathrm{e}^{-\frac{Q}{P_S^M\varsigma_1\lambda_{SP}}}-\varsigma_2\mathrm{e}^{-\frac{\xi_2\sigma^2}{P_R\alpha_2\lambda_{R_nD_2}}}\mathrm{e}^{-\frac{Q}{P_S^M\varsigma_2\lambda_{SP}}}+$$

$$\zeta_1\mathrm{e}^{-\frac{\Theta\sigma^2}{P_R\lambda_{R_nD_2}}-\lambda_{SP}\zeta_1\zeta_3}Ei\left(-\frac{Q\zeta_3}{P_S^M}-\lambda_{SP}\zeta_1\zeta_3\right)-$$

$$\zeta_1\mathrm{e}^{-\frac{\xi_2\sigma^2}{P_R\alpha_2\lambda_{R_nD_2}}-\lambda_{SP}\zeta_1\zeta_2}Ei\left(-\frac{Q\zeta_2}{P_S^M}\zeta_2-\lambda_{SP}\zeta_1\zeta_2\right)\tag{31}$$

其中 $\varsigma_1=Q\lambda_{SR_n}/(\Theta\sigma^2\lambda_{SP}+Q\lambda_{SR_n})$，

$\varsigma_2=Q\alpha_2\lambda_{SR_n}/(\xi_2\sigma^2\lambda_{SP}+Q\alpha_2\lambda_{SR_n})$，

$\zeta_1=Q\sigma^2\lambda_{SR_n}/P_R\sigma^2\lambda_{R_nD_2}\lambda_{SP}$，

$\zeta_2=(\xi_2\sigma^2\lambda_{SP}+Q\alpha_2\lambda_{SR_n})/Q\alpha_2\lambda_{SR_n}\lambda_{SP}$，

$\zeta_3=(\Theta\sigma^2\lambda_{SP}+Q\lambda_{SR_n})/Q\lambda_{SR_n}\lambda_{SP}$。

与 Δ_7 的相类似，Δ_8 的积分表达式与数值结果为：

$$\Delta_8=\int_{\frac{Q}{P_S^M}}^{\infty}\int_{\frac{\Theta\sigma^2}{P_R}}^{\frac{\xi_2\sigma^2}{P_R\alpha_2}}\int_{\frac{P_R\sigma^2 wz}{Q\sigma^2}}^{\infty}f(w,y,z)\,\mathrm{d}y\mathrm{d}w\mathrm{d}z=$$

$$\zeta_1\mathrm{e}^{-\frac{\xi_2\sigma^2}{P_R\alpha_2\lambda_{R_nD_2}}-\lambda_{SP}\zeta_1\zeta_2}Ei\left(-\frac{Q\zeta_2}{P_S^M}\zeta_2-\lambda_{SP}\zeta_1\zeta_2\right)-$$

$$\zeta_1\mathrm{e}^{-\frac{\Theta\sigma^2}{P_R\lambda_{R_nD_2}}-\lambda_{SP}\zeta_1\zeta_3}Ei\left(-\frac{Q\zeta_3}{P_S^M}-\lambda_{SP}\zeta_1\zeta_3\right)\tag{32}$$

因此事件 O_2 的概率 $P(O_2)$ 可以表示为：

$$P(O_2)=\sum_{l=1}^{N}P(x_{n*}<\xi_2\,\big|\,|S_r|=l)P(|S_r|=l)=$$

$$\sum_{l=1}^{N}(F(\xi_2))^l P(|S_r|=l)\tag{33}$$

另一方面，中继子集大小为 l 的概率可以表示为：

$$P(|S_r|=l)=\binom{N}{l}\prod_{N=1}^{N-l}[1-\Phi]\prod_{N-l+1}^{N}\Phi=$$

$$\binom{N}{l}[1-\Phi]^{N-l}\Phi^l\tag{34}$$

通过公式(11)、(12)、(14)和(34)可以得到整个系统的中断概率，并如下所示。

两级中继选择方案可以获得的总中断概率为：

$$P(O)=P(O_1)+P(O_2)=$$

$$\sum_{l=0}^{N}\binom{N}{l}(F(\xi_2))^l\Phi^l(1-\Phi)^{N-l}\tag{35}$$

5 数值结果与分析

针对部分中继选择和两级中继选择的协作 CR-NOMA 网络系统模型在瑞利衰落信道下进行 MTALAB 仿真，对上述中断概率数值分析结果进行验证。除另有阐述外，系统参数默认设置为 $\lambda_{SR}=1$，$\lambda_{SP}=1$，$\lambda_{RD_1}=1$，$\lambda_{RD_2}=2$，$R_1=0.8$ bit/s，$R_2=1.5$ bit/s，源节点发送功率峰值 $P_S^M=20$ dBm，$P_R=20$ dBm，$Q=20$ dBm，$\alpha_1=0.75$。通过观察仿真结果，发现分析结果与蒙特卡罗仿真结果相同。

图 2 展示了中继数量为 10 时功率分配因子 α_1

对系统中断性能的影响。首先当 $\alpha_1 > \xi_1\alpha_2$ 时用户 D_2 发生中断。随着功率分配因子的增大，系统中断概率先减小后增大。这是因为，功率分配因子 α_1 越大，解码信号 x_1 越容易，解码信号 x_2 越困难，中继节点与用户 D_2 需要解码信号 x_1 和信号 x_2，所以存在最优功率分配因子使系统的中断概率达到最低，可以看出此条件下，当 $\alpha_1 = 0.75$ 系统能够达到最小中断概率。在同等条件下，两级中继选择方案相比于部分中继选择方案，中断性能提升了 1000 倍左右。

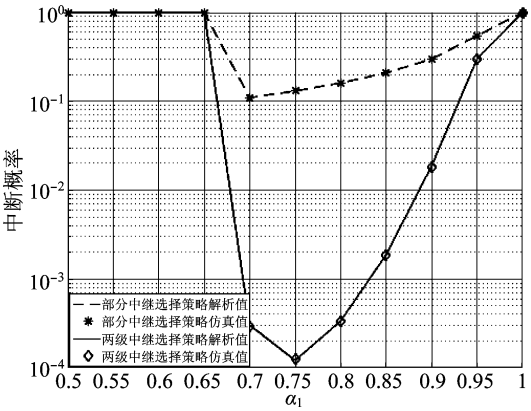

图 2　系统中断概率与功率分配因子 α_1 的关系

Fig. 2　System outage probability versus power allocation factor α_1

图 3 展示了备选中继数量与系统中断概率的关系，容易看出的是，在部分中继选择方案下，当中继数量大于 5 时，系统中断概率不再随着中继数量的增加而减小，即通过增加备选中继数量带来的性能增益有限。在两级中继选择方案下，增加备选中继数量能够带来明显的性能增益，备选中继数量越大，两种方案中断性能差异越大。中继数量为 10 时，两种方案的性能相差约 1000 倍，与上图仿真结果相同。

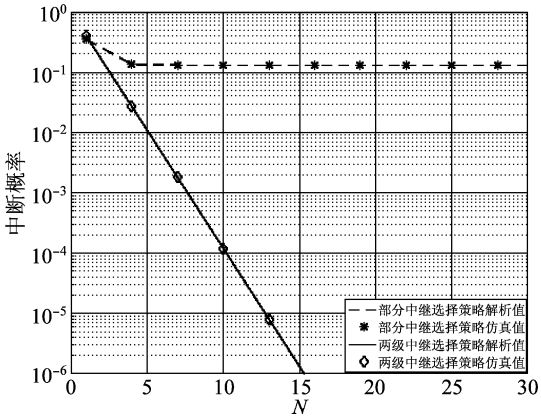

图 3　系统中断概率与中继数量的关系

Fig. 3　System outage probability versus number of relay

图 4 展示了源发射功率峰值对中断概率的影响，系统中断概率随 P_S^M 的增大而降低，后由于源节点发射功率受到限制趋于一定值。部分中继选择方案下，系统中断概率在 $P_S^M = 15$ dBm 时达到最低，两级中继选择方案在 $P_S^M = 30$ dBm 系统中断概率达到最低。相比于部分中继选择方案，两级中继选择方案在高信噪比区间能够达到更好的中断性能，通过提升源节点发射功率带来的性能增益也更明显。

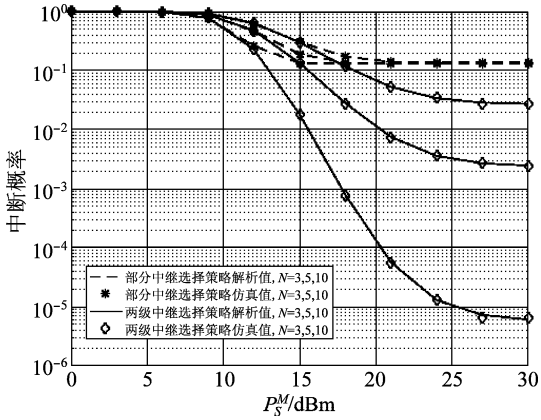

图 4　源发射功率峰值与系统中断概率的关系

Fig. 4　System outage probability versus the maximum available power of S

图 5 展示了主网络用户能够容忍的最大噪声功率对次级网络中断性能的影响。容易看出，在只改变噪声温度限的情况下，两级中继选择方案在高低信噪比区间都能够达到比部分中继选择方案更好的中断性能。

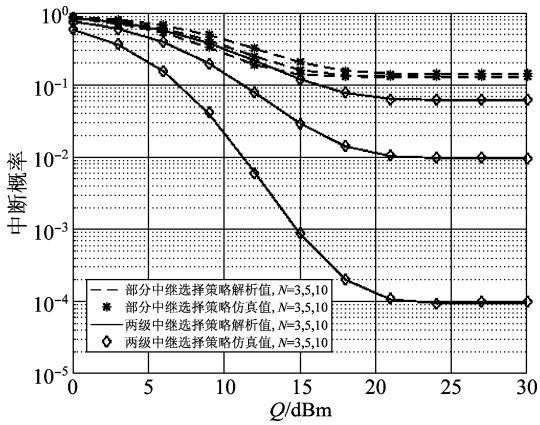

图 5　系统中断概率与噪声温度限的关系

Fig. 5　System outage probability versus interference temperature constraint Q

6　结论

本文研究了底层 CR-NOMA 网络中中继选择方案对于协作 NOMA 系统的影响，分析结果表明，两

级中继选择方案相比于部分中继选择方案,在高低信噪比区间都能够获得更好的中断性能和更高的分集增益,尤其在中继数量大的情况下,两级中继选择方案的性能远优于部分中继选择方案。

参考文献

[1] Jameel F, Wyne S, Nawaz S J, et al. Outage Analysis of Relay-Aided Non-Orthogonal Multiple Access with Partial Relay Selection[C]//2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). United Arab Emirates: IEEE, 2018: 1-6.

[2] Ju Jinjuan, Duan Wei, Sun Qiang, et al. Performance Analysis for Cooperative NOMA with Opportunistic Relay Selection[J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 131488-131500.

[3] Odeyemi K O, Owolawi P A. Performance Analysis of Cooperative NOMA with Partial Relay Selection under Outdated Channel Estimate[C]//2019 IEEE 2nd Wireless Africa Conference (WAC). Pretoria, South Africa: IEEE, 2019: 1-5.

[4] Li Yan, Li Yongzhao, Chu Xiaoli, et al. Performance Analysis of Relay Selection in Cooperative NOMA Networks[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(4): 760-763.

[5] Liu Xinxin, Yang Liang, Chen Jianchao, et al. On the Performance of Nth Best Relay Selection Scheme for NOMA-Based Cooperative Relaying Networks with SWIPT[C]//2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2019: 1-5.

[6] Ding Zhiguo, Dai Huaiyu, Poor V H. Relay Selection for Cooperative NOMA[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(4): 416-419.

[7] 时安谊, 杨震. 针对 NOMA 和 CR 网络的功率分配方法[J]. 信号处理, 2019, 35(7): 1224-1234.
Shi Anyi, Yang Zhen. Power Allocation Method for Non-Orthogonal Multiple Access and Cognitive Radio Network [J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(7): 1224-1234. (in Chinese)

[8] Nauryzbayev G, Arzykulov S, Tsiftsis T A, et al. Performance of Cooperative Underlay CR-NOMA Networks over Nakagami-m Channels[C]//2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Kansas City, MO: IEEE, 2018: 1-6.

[9] 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.

[10] 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.

[11] Im G, Lee J H. Outage Probability for Cooperative NOMA Systems With Imperfect SIC in Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(4): 692-695.

[12] Liau Q Y, Leow C Y. Successive User Relaying in Cooperative NOMA System[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(3): 921-924.

[13] Chu Yuzhi, Champagne B, Zhu Weiping. NOMA-based cooperative relaying for secondary transmission in cognitive radio networks[J]. Institute of Engineering of Technology, 2019, 23(12): 1840-1851.

[14] Li Cheng, Guo Daoxing, Guo Kefeng, et al. Outage Performance of Partial Relay Selection in Underlay CR-NOMA Networks[C]//2019 28th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC). Beijing, China: IEEE, 2019:1-5.

[15] Yang Mengqi, Chen Jian, Yang Long, et al. Design and Performance Analysis of Cooperative NOMA with Coordinated Direct and Relay Transmission[J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 73306-73323.

作者简介

乔宇航 男, 1996 年生, 山西晋城人。华侨大学信息科学与工程学院, 硕士研究生。主要研究方向为协作通信、认知无线电和非正交多址接入技术。
E-mail: 1878742207@qq.com

贺玉成 男, 1964 年生, 山西太原人。华侨大学信息科学与工程学院, 教授, 博士学位。主要研究方向为无线通信和信道编码等。
E-mail: yucheng.he@hqu.edu.cn

杨键泉 男, 1996 年生, 广东肇庆人。华侨大学信息科学与工程学院, 硕士研究生。主要研究方向为协作通信、认知无线电和物理层安全技术。
E-mail: jianquan.Yang@stu.hqu.edu.cn

周 林 男, 1982 年生, 河南南阳人。华侨大学信息科学与工程学院, 副教授, 博士学位。主要研究方向为无线通信、信道编码等。
E-mail: linzhou@hqu.edu.cn