

认知协作网络中非正交多址接入技术性能研究

李美玲¹, 李莹¹, SAMI Muhaidat², 董增寿¹, 王安红¹, 梁杰¹, 丁丽萍³

(1. 太原科技大学电子信息工程学院, 山西 太原 030024; 2. 英国萨里大学, 萨里 GU27XH; 3. 中国科学院软件研究所, 北京 100190)

摘 要: 将 NOMA 技术应用于下行认知中继协作网络, 提出基于 AF 的认知多用户中继协作 NOMA 系统 (CM-RC-NOMA), 给出了不同认知中继协作方案下 PU 和 SU 中断性能, 并推导了其闭合表达式; 同时将 AF 中继协作方式与 DF 中继协作方式进行了对比。仿真结果表明, 当 SU 到 PU 信道链路条件不差于 BS 到 PU 信道链路条件时, AF 方式相比 DF 方式可以使 PU 获得更低的中断概率; 另一方面, 所提最佳认知中继协作方案相比传统最佳认知中继协作方案可以获得更佳的 PU 中断性能。

关键词: 认知协作网络; 非正交多址接入; 最佳中继; 中断概率

中图分类号: TN911.1

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018152

Research on the NOMA performance in cognitive cooperation network

LI Meiling¹, LI Ying¹, SAMI Muhaidat², DONG Zengshou¹, WANG Anhong¹, LIANG Jie¹, DING Liping³

1. School of Electronic and Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China

2. University of Surrey, Surrey GU27XH, UK

3. Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: The non-orthogonal multiple access (NOMA) technology was studied in a downlink cognitive relay cooperation network. A cognitive multiuser relay cooperation based NOMA scheme was proposed (CM-RC-NOMA), in which, the outage performance of PU and SU were given under different cognitive relay cooperation schemes and the corresponding outage expressions were also derived. At the same time, the AF based relay cooperation method and the DF based relay cooperation method were compared. The simulation results show that the lower outage of PU can be achieved by AF method compared with DF method, when the channel condition of BS to PU is no more than that of SU to PU. It is also revealed that the optimal outage performance of PU can be achieved by the proposed best cognitive relay cooperation scheme in contrast to the traditional best cognitive relay cooperation scheme.

Key words: cognitive cooperation network, NOMA, best relay, outage probability

1 引言

非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal mul-

ti-ple access) 技术通过为不同的用户信号分配不同的功率, 从而实现在相同的频带上同时为多个用户提供服务, 与传统正交多址接入技术(OMA, or-

收稿日期: 2018-04-22; 修回日期: 2018-08-02

通信作者: 李莹, 564932926@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61672373, No.U1510115, No.91646203); 山西省高等学校科技创新基金资助项目 (No.201802090); 山西省晋城科技攻关基金资助项目 (No.201501004-4); 山西省互联网+3D 打印协同创新中心基金资助项目, 山西省科技创新团队基金资助项目 (No. 201705D131025); 山西省 1331 工程重点创新团队基金资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 61672373, No. U1510115, No. 91646203), STIP (No.201802090), Jincheng Technology Research Projects of Shanxi Province (No.201501004-4), CiCi3DP, STITSX (No. 201705D131025), KITSX1331

thogonal multiple access)相比,可大大提高频谱利用率^[1-2]。研究表明 NOMA 相比 OMA 方案可以有效提高频谱利用率^[3-5]。

在无线网络中,信道的多径传播、阴影衰落和路径损耗等特性将会严重影响到系统性能。而协作通信技术可以有效抵抗无线信道衰落,提高传输可靠性^[6-8]。关于协作传输在 NOMA 系统(C-NOMA)中的应用正在业界广泛研究。文献[9]基于 NOMA 系统,考虑一个基站通过单个放大转发(AF, amplify and forward)中继与多个移动端同时通信,对系统中断概率性能进行了分析。文献[10]则考虑基于 NOMA 的蜂窝网络,分析了单个中继采用解码转发(DF, decode and forward)时全双工协作 NOMA 系统的中断性能。文献[11]进一步考虑 NOMA 系统存在 2 个用户和一个中继的场景,并分析了全双工中继模式下用户的中断性能。文献[12]将 NOMA 应用于具有多播业务和单播业务的多用户网络,设计了一种可以在确保多播业务可靠性的同时提高单播业务性能的赋形方案及功率分配方法。

认知无线电技术可以为多用户提供开放的频谱资源提高频谱效率,因此,将认知无线电中的频谱共享策略与 NOMA 技术结合可以进一步提高频谱利用率。通过将 NOMA 引入到认知系统,可以提高 SU 的接入机会以及系统吞吐量。在传统 OMA 系统中,即使主用户(PU, primary user)的信道条件较差,次用户(SU, secondary user)也无法接入授权频谱,从而导致资源的空闲,降低系统吞吐量。利用 NOMA 技术,基站可以同时为 PU 和 SU 提供服务,而不会引起 PU 性能明显降低,从而有效提高频谱利用率。NOMA 系统与 OMA 系统中用户性能分析的不同,关键在于基站对多个用户信号的功率分配和终端所使用的 SIC 技术带来的性能提升。在文献[13]中,作者研究了 NOMA 技术应用于认知网络时的系统性能,结果表明基于 NOMA 的认知网络系统性能明显优于传统基于 OMA 的认知网络系统性能。文献[14]则研究了利用 NOMA 技术实现认知无线网络中认知用户的频谱共享。文献[15]首次提出, SU 利用连续干扰删除(SIC, successive interference cancellation)技术来避免同信道干扰从而得到期望信号,将接收到的基站消息发送给 PU 从而提高认知 NOMA 系统性能,文中考虑 SU 采用 DF 方式转发数据。在中继转发协议方式中,DF 协议可以避免噪声前传,适合于源节点—中继节点信道

质量较好的环境,但是操作方式相对复杂,而且一定存在解码转发延时。而 AF 方式操作简单,同时中继也会将噪声放大化转发到目的节点。但是在 NOMA 系统中,由于 SU 和 PU 均采用 SIC 技术消除干扰,PU 可获得的信号干扰噪声比与传统 OMA 系统有所不同,因此基于 AF 的认知中继协作 NOMA 系统性能值得深入研究。

本文考虑一个下行认知多用户中继协作 NOMA (CM-RC-NOMA, cognitive multiuser relay cooperation based NOMA)系统,如图 1 所示,基站发送 2 个不同消息的复合信号,分别给一个单播 PU 和一组多播业务的 SU,其中, SU 将作为认知中继以 AF 方式辅助 PU 传输数据。基于所考虑 CM-RC-NOMA 系统提出基于 AF 的多认知中继协作方案和最佳认知中继协作方案,推导了各种方案下 CM-RC-NOMA 系统 PU 中断概率和 SU 中断概率;分析了认知用户数对系统性能的影响情况。结果表明,当 SU 到 PU 信道链路条件不差于 BS 到 PU 信道链路条件时,AF 方式相比 DF 方式可以使 PU 获得更低的中断概率;另一方面,所提最佳认知中继协作方案相比传统最佳认知中继协作方案可以使 PU 中断概率更低。

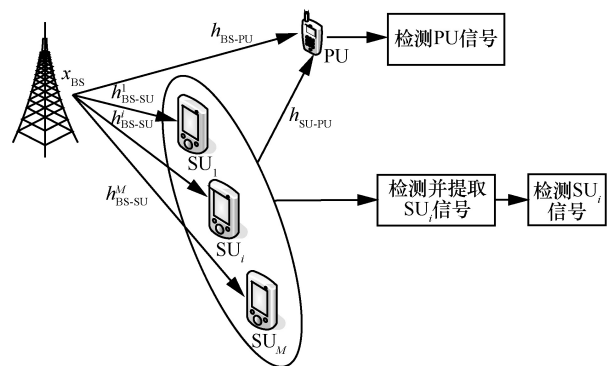


图 1 CM-RC-NOMA 系统模型

2 系统模型

本文考虑的下行 CM-RC-NOMA 系统包括一个基站 (BS, base station)、一个 PU 和 M 个 SU。每个 SU 配置单天线并以半双工模式工作。BS 发射的信号包含发送给 PU 的信号 ξ_{PU} 和发送给 SU 的信号 ξ_{SU} 。PU 作为高优先级服务用户, SU 作为第二服务用户。考虑 BS 与 SU、BS 与 PU 和 SU 与 PU 之间的链路服从独立同分布的瑞利衰落,用 h_{BS-SU}^m 表

示 BS 到第 m ($m=1,2,\dots,M$) 个 SU 的信道条件, $h_{\text{SU-PU}}^m$ 表示第 m ($m=1,2,\dots,M$) 个 SU 到 PU 的信道条件, $h_{\text{BS-PU}}$ 表示 BS 到 PU 的信道条件。当 BS \rightarrow PU 链路信道条件较差时, SU 可以作为协作中继为 PU 转发信号, 则根据此建立的 CM-RC-NOMA 系统模型, 可以得到 $|h_{\text{BS-SU}}^m|^2 > |h_{\text{BS-PU}}|^2$ 。

BS 发送包括 PU 用户消息和 SU 用户消息的下行复合 NOMA 信号 $x_{\text{BS}} = \alpha_{\text{PU}} P_S \xi_{\text{PU}} + \alpha_{\text{SU}} P_S \xi_{\text{SU}}$, P_S 为基站发射功率, α_{PU} 为 PU 的功率分配系数, α_{SU} 为 SU 的功率分配系数, 且 $\alpha_{\text{PU}} + \alpha_{\text{SU}} = 1$, $\alpha_{\text{SU}} < \alpha_{\text{PU}}$ 。在第一个时隙, 当 BS 在全网广播 NOMA 信号后, PU 和 SU 将接收包含 ξ_{PU} 和 ξ_{SU} 的复合信息, PU 和第 i 个 SU 接收到的信号可以分别表示为

$$y_{\text{PU}}^1 = h_{\text{BS-PU}} \sqrt{P_S} (\alpha_{\text{PU}} \xi_{\text{PU}} + \alpha_{\text{SU}} \xi_{\text{SU}}) + n_{\text{PU}}^1 \quad (1)$$

$$y_{\text{SU}}^i = h_{\text{BS-SU}}^i \sqrt{P_S} (\alpha_{\text{PU}} \xi_{\text{PU}} + \alpha_{\text{SU}} \xi_{\text{SU}}) + n_{\text{SU}}^i \quad (2)$$

其中, $n_{\text{PU}}^1 \sim \text{CN}(0, \sigma_{\text{PU}}^2)$ 和 $n_{\text{SU}}^i \sim \text{CN}(0, \sigma_{\text{SU}}^2)$ 分别为 BS \rightarrow PU 和 BS \rightarrow SU _{i} 链路上的信道加性高斯白噪声。

在第二个时隙, 所有 SU 接收到复合 NOMA 信号后, 采用 AF 方式将接收到的信号转发给 PU, 其发射功率为 P_i , 假设 SU _{i} 的放大转发系数为 G_i , 其中, G_i 进行归一化可表示为

$$G = \sqrt{\frac{P_i}{P_S |h_{\text{BS-SU}}^i|^2 + \sigma_{\text{SU}}^2}} \quad (3)$$

因此, 结合式 (2), 在第 2 个时隙, PU 接收到的来自第 i 个 SU 的信号可以表示为

$$\begin{aligned} y_{\text{PU}}^{2,\text{AF}} &= h_{\text{SU-PU}}^i G y_{\text{SU}}^i + n_{\text{PU}}^2 \\ &= h_{\text{SU-PU}}^i G h_{\text{BS-SU}}^i \sqrt{P_S} (\alpha_{\text{PU}} \xi_{\text{PU}} + \alpha_{\text{SU}} \xi_{\text{SU}}) + \\ &\quad h_{\text{SU-PU}}^i G n_{\text{SU}}^i + n_{\text{PU}}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

而当 SU 采用 DF 方式转发信号时, PU 接收到的信号可表示为

$$y_{\text{PU}}^{2,\text{DF}} = h_{\text{SU-PU}}^i \sqrt{P_i} (\alpha_{\text{PU}} \xi_{\text{PU}} + \alpha_{\text{SU}} \xi_{\text{SU}}) + n_{\text{PU}}^2 \quad (5)$$

其中, $n_{\text{PU}}^2 \sim \text{CN}(0, \sigma_{\text{PU}}^2)$ 为 SU \rightarrow PU 链路上的加性高斯白噪声。在后面的分析中, 为方便表示, 考虑所有信道上加性噪声方差为 σ^2 。

在认知中继网络中, 次网络可以选择全部 SU 转发原始 NOMA 信号, 也可以选择其中一个 SU 来转发, 由于 PU 会利用 SIC 技术来应对干扰从而对

接收到的信号进行解码, 因此, 在单认知中继协作 NOMA 系统中, 认知中继的选择对于 PU 性能的影响情况如何值得深入研究。后面的仿真结果也表明, 本文给出的基于 PU 的 SINR 的最佳中继选择方案, 相比传统仅考虑信道条件的最佳中继选择方案, 可以降低 PU 中断性能, 提高 PU 传输可靠性。

下面, 对如图 1 所示的模型分别对 SU 中断性能和基于多用户认知中继协作 NOMA (MCR-C-NOMA, multi-user cognitive relay based C-NOMA) 方案和单用户认知中继协作 NOMA (SCR-C-NOMA, single-user cognitive relay based C-NOMA) 方案下 PU 中断性能进行分析, 其中, 在 SCR-C-NOMA 情况下, 本文讨论 3 种最佳认知中继协作方式: 基于 SU 的 SINR 最大化的最佳认知中继 C-NOMA (SU-S-BCR-C-NOMA, SU-S based best cognitive relay C-NOMA) 方案、基于 PU 的 SINR 最大化的最佳认知中继 C-NOMA (PU-S-BCR-C-NOMA, PU-S based best cognitive relay C-NOMA) 方案和联合考虑 SU 和 PU SINR 最大化的最佳认知中继 C-NOMA (C-SU-PU-BCR-C-NOMA, C-SU-PU based best cognitive relay C-NOMA) 方案。

3 SU 中断性能分析

对于本文考虑的如图 1 所示 CM-RC-NOMA 系统模型而言, 当 SU 采用 SIC 技术对自身信号进行解码时, 根据 NOMA 技术原理, SU 先对 ξ_{PU} 进行解码, 然后再对 ξ_{SU} 进行解码。因此, SU 发生中断的情况分为 2 个方面: 1) SU 对 ξ_{PU} 解码失败; 2) SU 对 ξ_{SU} 解码成功, 但对 ξ_{SU} 解码失败。所以, SU _{i} 的中断概率可计算为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^{\text{SU}_i} &= \Pr \left(\frac{\rho_S \alpha_{\text{PU}} |h_{\text{BS-SU}}^i|^2}{\rho_S \alpha_{\text{SU}} |h_{\text{BS-SU}}^i|^2 + 1} < \gamma_{\text{PU}} \right) + \\ &\quad \Pr \left(\frac{\rho_S \alpha_{\text{PU}} |h_{\text{BS-SU}}^i|^2}{\rho_S \alpha_{\text{SU}} |h_{\text{BS-SU}}^i|^2 + 1} > \gamma_{\text{PU}}, \rho_S \alpha_{\text{PU}} |h_{\text{BS-SU}}^i|^2 < \gamma_{\text{SU}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

本文考虑所有信道链路均服从瑞利衰落且独

立同分布, 其概率密度函数 $f_{|h|^2}(x) = \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)$, λ 为瑞利衰落信道平均信噪比。在后面的分析中, 分别用 λ_{BP} 、 λ_{BS} 和 λ_{SP}^i 表示 BS \rightarrow PU、BS \rightarrow SU _{i} 和

SU_i → PU 链路上的平均信噪比。

因此可以得到, 式(6)可分别计算为

$$\Pr\left(\frac{\rho_S \alpha_{PU} |h_{BS-SU}^i|^2}{\rho_S \alpha_{SU} |h_{BS-SU}^i|^2 + 1} < \gamma_{PU}\right) \stackrel{\textcircled{1}}{=} 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{PU}}{\rho_S \beta \lambda_{BS}^i}\right) \quad (7)$$

$$\Pr\left(\frac{\rho_S \alpha_{PU} |h_{BS-SU}^i|^2}{\rho_S \alpha_{SU} |h_{BS-SU}^i|^2 + 1} > \gamma_{PU}, \rho_S \alpha_{SU} |h_{BS-SU}^i|^2 < \gamma_{SU}\right)$$

$$= \Pr\left(\rho_S \beta |h_{BS-SU}^i|^2 > \gamma_{PU}, |h_{BS-SU}^i|^2 < \frac{\gamma_{SU}}{\alpha_{SU} \rho_S}\right)$$

$$\stackrel{\textcircled{1}}{=} \Pr\left(|h_{BS-SU}^i|^2 > \frac{\gamma_{PU}}{\rho_S \beta}, |h_{BS-SU}^i|^2 < \frac{\gamma_{SU}}{\alpha_{SU} \rho_S}\right) \quad (8)$$

其中, 条件①为 $\beta > 0$ 。

对于式(8), 若 $\frac{\gamma_{SU}}{\gamma_{PU} + \gamma_{SU}(1 + \gamma_{PU})} > \alpha_{SU}$, 则可进

一步计算为

$$\exp\left(-\frac{\gamma_{PU}}{\lambda_{BS} \rho_S \beta}\right) - \exp\left(-\frac{\gamma_{SU}}{\lambda_{BS} \alpha_{SU} \rho_S}\right) \quad (9)$$

结合式(6)、式(7)和式(9), 可以得到, 当

$\frac{\gamma_{SU}}{\gamma_{PU} + \gamma_{SU} + \gamma_{SU} \gamma_{PU}} > \alpha_{SU}$ 时,

$$P_{out}^{SU_i} = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{SU}}{\lambda_{BS} \alpha_{SU} \rho_S}\right) \quad (10)$$

而当 $\frac{\gamma_{SU}}{\gamma_{PU} + \gamma_{SU} + \gamma_{SU} \gamma_{PU}} < \alpha_{SU}$ 时

$$\Pr\left(|h_{BS-SU}^i|^2 > \frac{\gamma_{PU}}{\rho_S (\alpha_{PU} - \gamma_{PU} \alpha_{SU})}, |h_{BS-SU}^i|^2 < \frac{\gamma_{SU}}{\alpha_{SU} \rho_S}\right) = 0 \quad (11)$$

此时, 结合式(6)可以得到

$$P_{out}^{SU_i} = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{PU}}{\rho_S \beta \lambda_{SU}^i}\right) \quad (12)$$

4 MCR-C-NOMA PU 中断性能

在 MCR 方案中, 网络中的所有 SU 都会接收到 BS 信号并采用 AF 方式转发给 PU。因此, PU 将接收到第一时隙来自 BS 的复合信号和第 2 时隙来自 M 个 SU 转发的信号。PU 可以采用最大比合并 (MRC, maximum ratio combining)、等增益合并 (EGC, equal gain combining) 和选择式合并 (SC, selective combining) 等分集合并技术来处理接收到

的多路信号, 其中, SC 合并方式实现复杂度低, 方法简单, 而且本文的主要目的在于衡量基于 AF 的认知中继协作 NOMA 系统的性能。所以, 本文考虑 PU 采用 SC 方式合并来自 BS 的信号和 M 路 SU 的信号。

需要说明的是, 由于 PU 接收到的是 NOMA 复合信号, 因此, 需要利用 SIC 技术将自身所需要的信号 ξ_{PU} 进行解码, 这就需要将 ξ_{PU} 和 ξ_{SU} 分离, 因此, PU 将首先对每路信号进行分离, 然后再采用 SC 方式合并接收到的多路 SU 转发的信号。根据式(1), PU 在第一个时隙, 将 ξ_{SU} 视为干扰信号, 此阶段可获得的信号干扰噪声比为

$$SINR_{BS-PU} = \frac{P_S \alpha_{PU} |h_{BS-PU}|^2}{P_S \alpha_{SU} |h_{BS-PU}|^2 + \sigma^2} \quad (13)$$

在第二个阶段, PU 将接收到来自 M 路 SU 转发的信号。当 SU 分别采用 AF 和 DF 中继方式时, 根据式(4)和式(5), 可以得到 SU^{*i*} → PU 链路上可获得的信号干扰噪声比分别为

$$SINR_{SU-PU}^{i,AF} = \frac{\rho_S \rho_i \alpha_{PU} |h_{SU-PU}^i|^2 |h_{BS-SU}^i|^2}{\rho_S |h_{BS-SU}^i|^2 (\rho_i \alpha_{SU} |h_{SU-PU}^i|^2 + 1) + \rho_i |h_{SU-PU}^i|^2 + 1} \quad (14)$$

$$SINR_{SU-PU}^{i,DF} = \frac{\rho_i \alpha_{PU} |h_{SU-PU}^i|^2}{\rho_i \alpha_{SU} |h_{SU-PU}^i|^2 + 1} \quad (15)$$

其中, $\rho_S = \frac{P_S}{\sigma^2}$, $\rho_i = \frac{P_i}{\sigma^2}$ 。关于仿真部分所对比的 DF 中继方式的分析, 本文单独在第 5 节讨论, 如非特别说明, 下面的分析均针对 AF 中继方式。结合式(4)~式(6), 当 PU 采用 SC 合并方式合并检测到的期望信号时, 可获得的信号干扰噪声比可表示为

$$SINR_{PU}^{MCR} = \max(SINR_{BS-PU}, \max_{i=1,2,\dots,M} SINR_{SU-PU}^i) \quad (16)$$

当 PU 处可获得的信号干扰噪声比 $SINR_{PU}^{MCR}$ 小于所能解码的最小要求信噪比 γ_{PU} 时, PU 无法正确获得自身信号, 从而发生中断现象。因此, 中断概率 P_{out}^{MCR} 可表示为

$$P_{out}^{MCR} = \Pr(SINR_{PU}^{MCR} < \gamma_{PU}) \quad (17)$$

结合式(16)和式(17)可以写为

$$P_{\text{out}}^{\text{MCR}} = \Pr(SINR_{\text{BS-PU}} < \gamma_{\text{PU}}) \prod_{i=1}^M \Pr(SINR_{\text{SU-PU}}^i < \gamma_{\text{PU}}) \quad (18)$$

因此，对于式(18)，结合式(13)，可以得到

$$\Pr(SINR_{\text{BS-PU}} < \gamma_{\text{PU}}) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{PU}}}{\rho_s \lambda_{\text{BP}} \beta}\right), (\beta > 0) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \Pr(SINR_{\text{SU-PU}}^i < \gamma_{\text{PU}}) \\ &= \int_0^{\frac{\gamma_{\text{PU}}}{\beta \rho_i}} f_{|h_{\text{SU-PU}}^i|^2}(y) dy + \\ & \int_{\frac{\gamma_{\text{PU}}}{\beta \rho_i}}^{\infty} f_{|h_{\text{SU-PU}}^i|^2}(y) \int_0^{\frac{\gamma_{\text{PU}}(\rho_i y + 1)}{\rho_s(\rho_i \beta y - \gamma_{\text{PU}})}} f_{|h_{\text{BS-SU}}^i|^2}(x) dx dy, (\beta > 0) \end{aligned} \quad (20)$$

其中， $\beta = \alpha_{\text{PU}} - \gamma_{\text{PU}} \alpha_{\text{SU}}$ ，根据文献[16]，式(20)可以进一步计算为

$$\begin{aligned} & \Pr(SINR_{\text{SU-PU}}^i < \gamma_{\text{PU}}) \\ &= 1 - \frac{2}{\lambda_{\text{SP}} \beta \rho_s \rho_i} \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{PU}}}{\lambda_{\text{SP}} \beta} \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{1}{\rho_i}\right)\right) \\ & \left(\rho_s \rho_i \gamma_{\text{PU}} (\gamma_{\text{PU}} + \beta)\right)^{\frac{1}{2}} K_1 \left(2\sqrt{\frac{\gamma_{\text{PU}}^2 + \gamma_{\text{PU}} \beta}{\beta^2 \rho_s \rho_i \lambda_{\text{SP}} \lambda_{\text{BS}}}}\right) \end{aligned} \quad (21)$$

将式(19)和式(21)代入式(18)即可得到 MCR 方案下采用 AF 中继转发方式下 PU 中断概率。

5 SCR-C-NOMA PU 中断性能

在如图 1 所示的 CM-RC-NOMA 系统中，可以选择其中一个最佳的 SU 为 PU 转发数据，以节约信令开销。文献[8]的研究表明，传统 OMA 系统同时考虑 BS → SU 链路和 SU → PU 链路信道条件选择最佳认知中继可以获得与多认知中继协作相同的系统性能。而在认知协作 NOMA 系统中，PU 和传统 OMA 系统操作方式不同，会先对信号利用 SIC 进行解码，因此最终 PU 获得的信号干扰噪声比不同，因此有必要研究不同最佳认知中继协作方案下 NOMA 系统性能，仿真结果也表明 NOMA 系统中基于 PU 的 SINR 最大化的最佳认知中继选择方案与传统基于 PU 信道链路条件最大化的最佳认知中继选择方案不同。

用 $SINR_{\text{PU}}^{\text{BCR}}$ 表示最佳中继协作方案中 PU 可获得的信号干扰噪声比， $SU_{\text{best}}^{\text{s}}$ 表示所选择的最佳认知中继。根据系统模型所述，由于 PU 采用 SC 合并方式合并第一时隙得到的信号和第二时隙得到

的信号，最终 PU 可获得的信号干扰噪声比为

$$SINR_{\text{PU}}^{\text{BCR}} = \max(SINR_{\text{BS-PU}}, SINR_{\text{SU}_{\text{best}}-\text{PU}}) \quad (22)$$

因此，可以得到最佳 SCR 方案 PU 中断概率可以表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^{\text{BCR}} &= \Pr(SINR_{\text{PU}}^{\text{BCR}} < \gamma_{\text{PU}}) \\ &= \Pr(SINR_{\text{BS-PU}} < \gamma_{\text{PU}}) \Pr(SINR_{\text{SU}_{\text{best}}-\text{PU}} < \gamma_{\text{PU}}) \end{aligned} \quad (23)$$

对于式(23)，等号后面第一项与认知中继的选择无关，而第二项根据式(14)，可以得到

$$\begin{aligned} & \Pr(SINR_{\text{SU}_{\text{best}}-\text{PU}} < \gamma_{\text{PU}}) \\ &= \Pr\left(\frac{\rho_s \rho_i \alpha_{\text{PU}} |h_{\text{SU}_{\text{best}}-\text{PU}}|^2 |h_{\text{BS-SU}_{\text{best}}}|^2}{\left(\rho_s |h_{\text{BS-SU}_{\text{best}}}|^2 \left(\rho_i \alpha_{\text{SU}} |h_{\text{SU}_{\text{best}}-\text{PU}}|^2 + 1\right)\right) + \rho_i |h_{\text{SU}_{\text{best}}-\text{PU}}|^2 + 1} < \gamma_{\text{PU}}\right) \end{aligned} \quad (24)$$

根据式(24)，可以看到，PU 中断概率主要取决于所选择的认知中继，其决定了它与 BS 和 PU 的信道条件。下面分别讨论 SU-S-BCR、PU-S-BCR 和 C-SU-PU-BCR 这 3 种最佳认知中继协作 NOMA 方案下 PU 中断概率。

1) SU-S-BCR 方案

SU-S-BCR 方案以 BS → SU_i 链路上 SU 获得的信号干扰噪声比最大化为准则选择最佳的 SU 为 PU 转发信号，此时，最佳 SU 选择方案可表示为

$$SU_{\text{best}}^{\text{s}} = \arg \max_i (SINR_{\text{SU}}^i), i \in \{1, 2, \dots, M-1\} \quad (25)$$

根据式(2)，可以得到式(25)可退化为传统 OMA 系统基于源链路信道条件最大化的最佳认知中继选择方案(S-BCR, source based best cognitive relay)。

$$SU_{\text{best}}^{\text{s}} = \arg \max_i \left(|h_{\text{BS-SU}}^i|^2\right), i \in \{1, 2, \dots, M-1\} \quad (26)$$

因此，当采用 SU-S-BCR 方案转发 PU 信号时，根据式(24)，PU 的中断概率最终可计算如式(27)所示。

2) PU-S-BCR 方案

PU-S-BCR 方案以 SU_i → PU 链路上 PU 获得的信号干扰噪声比最大化为准则选择最佳的 SU 为 PU 转发信号，最佳 SU 选择方案可表示为式(28)。

$$\Pr\left(SINR_{SU_{best}^S-PU} < \gamma_{PU}\right) = \sum_{i=1}^M \Pr\left(\begin{array}{l} \frac{\rho_S \rho_i \alpha_{PU} |h'_{SU-PU}|^2 |h'_{BS-SU}|^2}{\left(\rho_S |h'_{BS-SU}|^2 \left(\rho_i \alpha_{SU} |h'_{SU-PU}|^2 + 1\right) + \rho_i |h'_{SU-PU}|^2 + 1\right)} < \gamma_{PU}, \\ \max_{i,i \neq j} |h'_{BS-SU}|^2 < |h'_{BS-SU}|^2 \end{array}\right) \quad (27)$$

$$SU_{best}^D = \arg \max_i \left(SINR_{SU_{best}^i-PU}\right), i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (28)$$

由于 PU 收到的是包含 ξ_{PU} 和 ξ_{SU} 的复合信号, PU 需要利用 SIC 技术得到其可获得的 SINR 值, 从式(14)可以看出, 它与传统 OMA 系统认知中继转发时 PU 得到的 SINR 值是不同的, 因此, 式(28)中所描述的最佳 SU 选择方案不能退化为传统 OMA 系统中继到目的链路信道最大化的最佳中继选择方案, 即以 $SU_i \rightarrow PU$ 链路信道条件最大化选择最佳 SU (D-BCR, destination based best cognitive relay), 仿真结果也证实了这一点。

因此, 经推导, 当采用 PU-S-BCR 方案转发 PU 信号时, PU 的中断概率为

$$\Pr\left(SINR_{SU_{best}^D-PU} < \gamma_{PU}\right) = \sum_{i=1}^M \Pr\left(\begin{array}{l} \frac{\rho_S \rho_i \alpha_{PU} |h^j_{SU-PU}|^2 |h^j_{BS-SU}|^2}{\left(\rho_S |h^j_{BS-SU}|^2 \left(\rho_i \alpha_{SU} |h^i_{SU-PU}|^2 + 1\right) + \rho_i |h^j_{SU-PU}|^2 + 1\right)} < \gamma_{PU}, \\ \max_{i,i \neq j} SINR^i_{SU-PU} < SINR^j_{SU-PU} \end{array}\right) \quad (29)$$

3) C-SU-PU-BCR 方案

C-SU-PU-BCR 方案综合考虑 $BS \rightarrow SU_i$ 和 $SU_i \rightarrow PU$ 链路信道条件, 以 PU 最终获得的信号干扰噪声比最大化为准则选择最佳的 SU 为 PU 转发信号, 最佳 SU 选择方案可表示为

$$SU_{best}^{Max-Min} = \arg \max_i \left(\min\left(SINR^i_{BS-SU}, SINR^i_{SU-PU}\right)\right), i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (30)$$

同理, 由于 PU 收到的是包含 ξ_{PU} 和 ξ_{SU} 的复合信号, 最终 PU 可获得的 SINR 值与传统 OMA 系统采用最大最小准则选择认知中继转发时 PU 得到的 SINR 值是不同的, 因此, 式(30)中所描述的最佳 SU

选择方案不能退化为传统 OMA 系统中的联合信道中继选择方案, 即以 $BS \rightarrow SU_i$ 和 $SU_i \rightarrow PU$ 链路信道条件均最佳的准则选择最佳 SU (Max-Min-BCR, max-min based best cognitive relay), 仿真结果也证实了这一点。

经推导, 当采用 C-SU-PU-BCR 方案转发 PU 信号时, PU 的中断概率为

$$\Pr\left(SINR_{SU_{best}^{Max-Min}-PU} < \gamma_{PU}\right) = \sum_{i=1}^M \Pr\left(\begin{array}{l} \frac{\rho_S \rho_i \alpha_{PU} |h^m_{SU-PU}|^2 |h^m_{BS-SU}|^2}{\left(\rho_S |h^m_{BS-SU}|^2 \left(\rho_i \alpha_{SU} |h^m_{SU-PU}|^2 + 1\right) + \rho_i |h^m_{SU-PU}|^2 + 1\right)} < \gamma_{PU}, \\ \max_{i,i \neq m} Y_i < Y_m \end{array}\right) \quad (31)$$

其中, $Y_i = \min\left(SINR^i_{BS-SU}, SINR^i_{SU-PU}\right)$ 。

需要说明的是, 对于式(27)、式(29)和式(31)很难得到精确的计算表达式, 但是本文已经给出了简单的求和表达式, 很容易借助计算机仿真辅助得到其结果。

4) DF 中继方式时 PU 中断性能

在仿真中, 本文对比了 AF 中继方式和 DF 中继方式对认知 NOMA 系统性能影响情况。本节给出仿真中 SU 采用 DF 中继转发方式时, PU 中断概率的计算。根据文献[15], PU 中断概率为

$$P_{out}^{DF} = \Pr(D = \emptyset) \Pr(SINR_{BS-PU} < \gamma_{PU}) + \sum_{i=1}^M \sum_{\substack{D_i \in \Psi \\ |D_i|=i}} \Pr(D \neq \emptyset) \Pr(SINR_{PU}^{DF} < \gamma_{PU}) \quad (32)$$

其中, D 表示 SU 解码集, Ψ 表示 SU 成功解码的集合。

$$\Pr(D = \emptyset) = \prod_{i=1}^M P_{out}^{SU_i} \quad (33)$$

$$\Pr(D \neq \emptyset) = \prod_{m \in D_k} \Pr\left(\begin{array}{l} \frac{\rho_S \alpha_{PU} |h^m_{BS-SU}|^2}{\rho_S \alpha_{SU} |h^m_{BS-SU}|^2 + 1} > \gamma_{PU}, \\ \rho_S \alpha_{PU} |h^m_{BS-SU}|^2 > \gamma_{SU} \end{array}\right) \cdot \left(1 - \prod_{n \in D_k} \Pr\left(\begin{array}{l} \frac{\rho_S \alpha_{PU} |h^n_{BS-SU}|^2}{\rho_S \alpha_{SU} |h^n_{BS-SU}|^2 + 1} > \gamma_{PU}, \\ \rho_S \alpha_{PU} |h^n_{BS-SU}|^2 > \gamma_{SU} \end{array}\right)\right) \quad (34)$$

$$\begin{aligned} & \Pr(SINR_{PU}^{DF} < \gamma_{PU}) \\ &= \Pr(\min(SINR_{BS-PU}, SINR_{SU-PU}^{i,DF}) < \gamma_{PU}) \\ &= 1 - \Pr(SINR_{BS-PU} > \gamma_{PU}) \Pr(SINR_{SU-PU}^{i,DF} > \gamma_{PU}) \end{aligned} \quad (35)$$

而根据式(15)可得

$$\Pr(SINR_{SU-PU}^{i,DF} < \gamma_{PU}) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{PU}}{\rho_i \lambda_{SP} \beta}\right) \quad (36)$$

结合式(32)~式(36)可以得到本文参考的 SU 采用 DF 中继方式时 PU 的中断概率。

6 仿真结果

本节对比了认知 NOMA 系统 AF 方案和 DF 方案对于 PU 中断性能的影响情况。另一方面，在认知 NOMA 系统中，PU 收到的是包含自身所需信号和 SU 信号的复合信号，需利用 SIC 技术将 SU 信号视为干扰信号而提取 PU 信号，因此接收到的信号干扰噪声比不仅取决于其信道链路条件，还与认知中继的选择有关，本文分别对比了 MCR-C-NOMA、SU-S-BCR-C-NOMA、PU-S-BCR-C-NOMA 和 C-SU-PU-BCR-C-NOMA 以及最佳单认知中继方案下 PU 中断性能，并与采用传统 OMA 系统最佳中继选择方案时的 C-NOMA 系统进行了性能对比，即 S-BCR-C-NOMA、D-BCR-C-NOMA 和 Max-Min-BCR-C-NOMA。

图 2(a)和图 2(b) 分别为当选择认知中继辅助 PU 传输时，在不同的信道条件下，认知中继分别采用 AF 和 DF 方式时 PU 和 SU 的中断概率。其中， λ 单位为 dB， $P_S = P_i$ ， $\alpha_{PU} = 0.8$ ， $\alpha_{SU} = 1 - \alpha_{PU}$ ， $N=2$ ，PU 目标传输速率为 $1 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ ，SU 目标传输速率为 $1.5 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 。由图 2(a)可以看出，在 CM-RC-NOMA 系统中，当认知中继到 PU 链路条件差于基站到 PU 链路条件时，认知中继采用 AF 方式和 DF 方式为 PU 转发数据时对于 PU 中断性能几乎相同；否则，在其他链路条件下，认知中继采用 AF 方式为 PU 转发数据时可以使 PU 获得更低的中断概率，即提高 PU 的传输性能，这是因为虽然 AF 方式会将噪声放大转发，但是 PU 在接收到认知中继转发的信号后，首先采用 SIC 消除干扰信号，同时也会消除大部分加性噪声干扰，因此采用 AF 方式可以获得更优的性能。此外本文还可以看出，当基站到 SU 链路条件较差时，PU 中断概率明显升高。当基站到 SU 链路条件与 SU 到 PU 链路条件总

是有其中一条链路条件较差时，AF 方式对于 PU 中断性能的影响较小。

而对于 SU 而言，由于本文不考虑 SU 网络内部的转发，因此其中断性能与认知中继转发方式无关，而仅与 BS 到 SU 链路条件有关，由图 2(b)可以看出，BS 到 SU 链路条件越好，SU 中断概率越低。

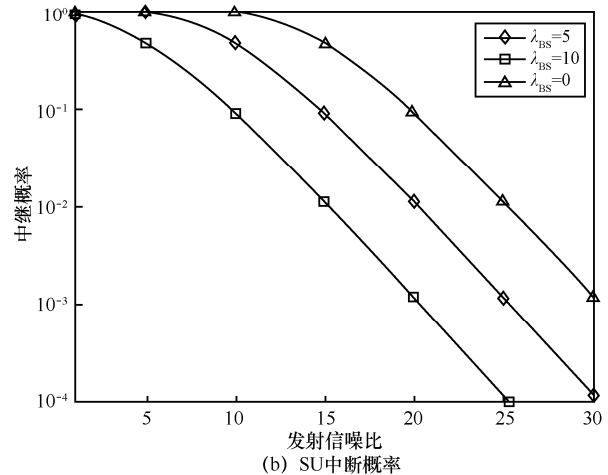
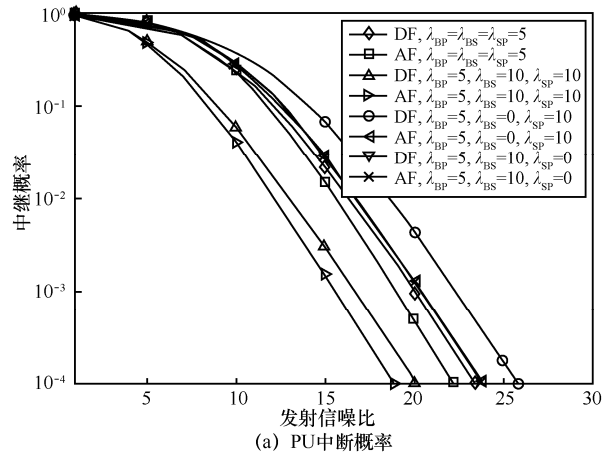
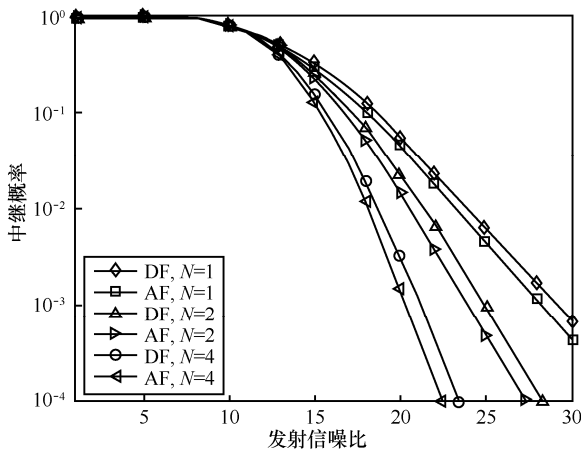
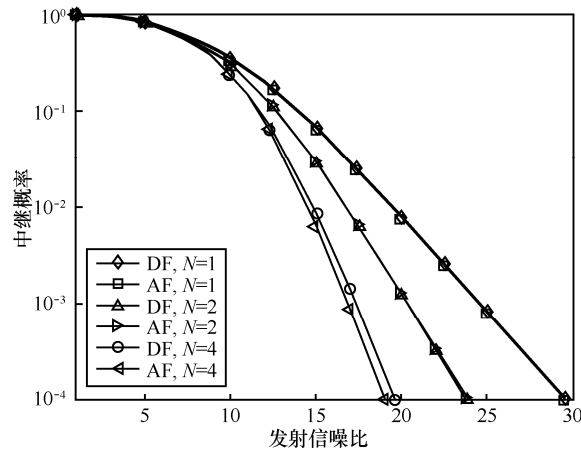


图 2 中断概率随发射信噪比的变化情况

如图 3 所示，在不同的认知中继数量下，认知中继分别采用 AF 方式和 DF 方式转发数据时 PU 的中断概率。图 3(a)中， $\lambda_{BP} = \lambda_{BS} = \lambda_{SP} = 5 \text{ dB}$ ， $P_S = P_i$ ， $\alpha_{PU} = 0.8$ ， $\alpha_{SU} = 1 - \alpha_{PU}$ ，PU 目标传输速率为 $1 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 。由图 3 可以看出，随着认知中继个数的增加，PU 中断概率下降，且不论认知中继个数为多少，AF 方式始终可以使 PU 实现较低的中断概率。但是从图 3(b)中可以看出，当 $\lambda_{BP} = 5 \text{ dB}$ ， $\lambda_{BS} = 10 \text{ dB}$ ， $\lambda_{SP} = 0 \text{ dB}$ ，即 SU 到 PU 信道条件差于 BS 到 PU 信道链路条件时，AF 和 DF 方式下的 PU 中断性能几乎相同，这是因为此时，BS 到 PU 链路上传输的信息对于 PU 接收信息起主要作用。



(a) BS→PU, BS→SU, SU→PU链路信道条件相同

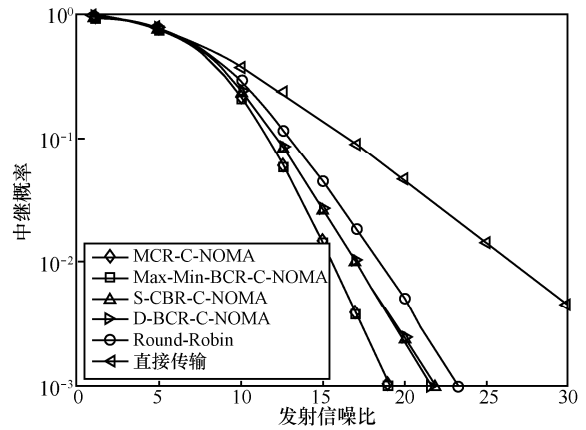


(b) SU→PU链路信道条件比BS→PU链路信道条件差

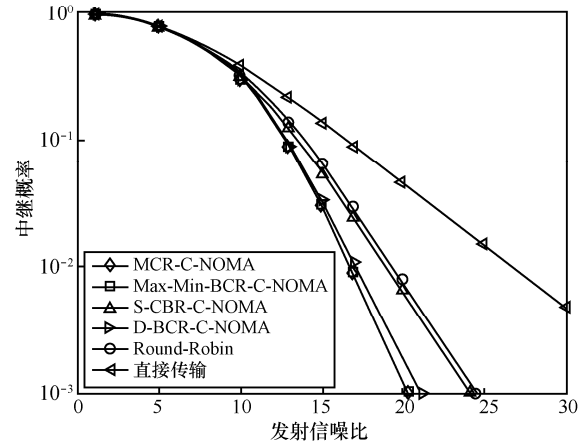
图 3 PU 中断概率随发射信噪比的变化情况

如图 4 所示，不同认知中继选择方案下 PU 中断性能对比。其中在图 4(a)中， $\lambda_{BP} = \lambda_{BS} = \lambda_{SP} = 5 \text{ dB}$ ， $P_s = P_i$ ， $\alpha_{PU} = 0.8$ ， $\alpha_{SU} = 1 - \alpha_{PU}$ ，PU 目标传输速率为 $1 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 。由图 4(a)可以看出，Max-Min-BCR 方案可以实现与 MCR 方案几乎相同的性能，而 S-BCR 方案和 D-BCR 方案的性能几乎相同，这一点也说明了 AF 中继转发方式的优势。因此，在实际中，本文可以采用 Max-Min-BCR 方案选择最佳的认知中继辅助 PU 传输，从而实现较低的信令开销和 PU 端的计算复杂度。但是从图 4(b)可以看出，当 $\lambda_{BP} = 5 \text{ dB}$ ， $\lambda_{BS} = 10 \text{ dB}$ ， $\lambda_{SP} = 0 \text{ dB}$ ，即 SU 到 PU 信道条件差于 BS 到 PU 信道链路条件时，S-BCR 方案性能差于 D-BCR 方案性能，而与 Round-Robin 方案性能几乎相同，但不论在何种条件下，Max-Min-BCR 方案始终可以实现最佳的 PU 中断性能。

图 5 所示为所提 MCR、SU-S-BCR、PU-S-BCR、C-SU-PU-BCR 方案与传统 S-BCR、D-BCR、Max-Min-BCR 方案对比， $\lambda_{BP} = 5 \text{ dB}$ ， $\lambda_{BS} = 10 \text{ dB}$ ，



(a) BS→PU, BS→SU, SU→PU链路信道条件相同



(b) SU→PU链路信道条件比BS→PU链路信道条件差

图 4 不同认知中继协作方案下的 PU 中断性能

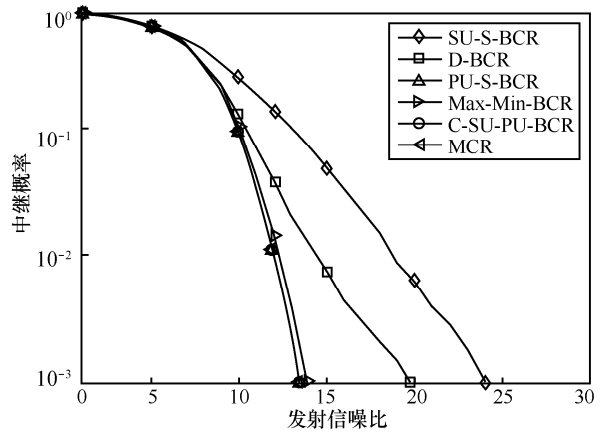


图 5 所提方案与传统方案对比

$\lambda_{SP} = 0 \text{ dB}$ 。可以看出，PU-S-BCR 方案性能优于 D-BCR 方案，C-SU-PU-BCR 方案性能也略优于 Max-Min-BCR 方案。在 CM-RC-NOMA 系统中，C-SU-PU-BCR 方案与 MCR 方案性能几乎相同，PU-S-BCR 方案性能最佳，这是由于在 CM-RC-NOMA 系统中，PU 已经利用 SIC 技术消除了干扰信号，因此，SU 到 PU 链路上的 SINR 值

总是高于 BS 到 SU 链路上的 $SINR$ ，因此，C-SU-PU-BCR 方案与 PU-S-BCR 方案性能相同。

如图 6 所示，不同认知用户数和认知中继转发功率情况下，采用 C-SU-PU-BCR 方案时 PU 中断概率随目标传输速率的变化情况。 $\lambda_{BP} = \lambda_{BS} = \lambda_{SP} = 0 \text{ dB}$ ， $P_S = 20 \text{ dB}$ ， $\alpha_{PU} = 0.75$ 。可以看出，随着认知中继转发功率的增大，PU 中断概率降低，而且认知中继数越多，PU 中断性能下降越明显，因为随着认知中继数量的增加，可选择的信道范围增加，而 C-SU-PU-BCR 方案始终选择最优的 SU 转发数据，因而 PU 可以获得最佳的协作性能。另一方面，PU 需要较高的 $SINR$ 才能满足要求的最低传输速率，而最低传输速率越高，要求的 $SINR$ 也越高，因此，从图 6 中可以看出，在发射功率一定的条件下，随着 PU 目标传输速率的增加，PU 中断概率增加。

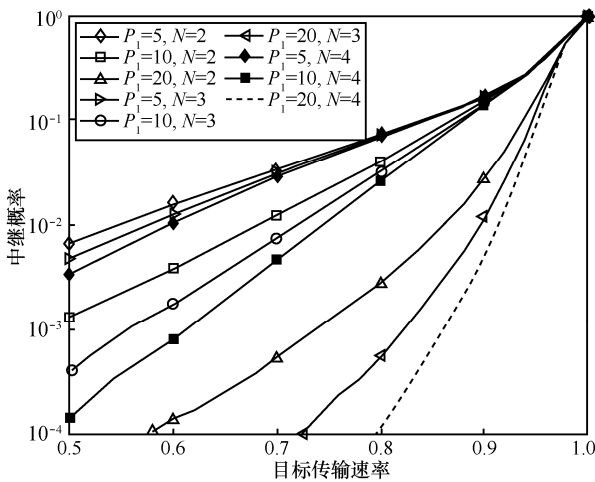


图 6 PU 中断概率随目标传输速率变化情况

如图 7 所示，采用 C-SU-PU-BCR 方案时，PU 中断概率在不同的认知中继转发功率和不同的认知中继个数情况下随 PU 所分配的功率比变化情况。其中， $\lambda_{BP} = \lambda_{BS} = \lambda_{SP} = 0 \text{ dB}$ ， $P_S = 20 \text{ dB}$ ，PU 目标传输速率为 $0.8 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 。可以看出，随着 PU 功率比的增大，PU 中断概率降低，而其降低的速度则与认知中继转发功率 P_i 有关， P_i 越大，PU 中断概率降低的速度越快，由于认知中继的协作传输，PU 传输性能改善明显；而随着认知中继数的增加，认知中继协作的优势尤为突出。

7 结束语

本文提出了基于 AF 的认知多用户中继协作

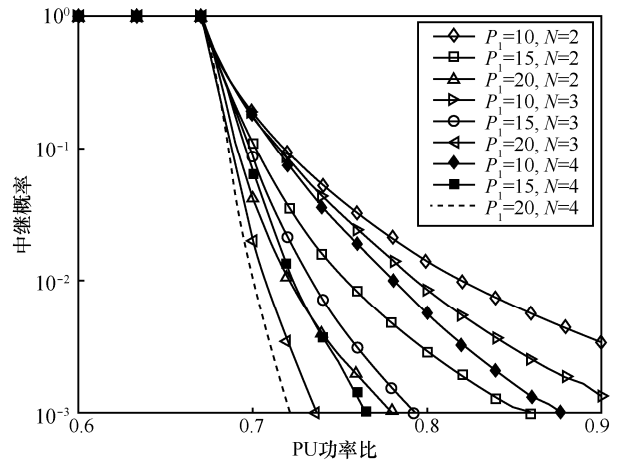


图 7 PU 中断概率随 PU 分配的功率比变化情况

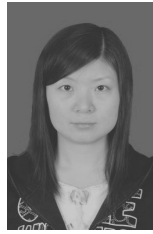
NOMA 系统，推导并分析了 MCR、SU-S-BCR、PU-S-BCR 和 C-SU-PU-BCR 这 4 种认知中继协作方案下 CM-RC-NOMA 系统中 PU 和 SU 中断性能。仿真结果表明，当 SU 到 PU 信道链路条件不差于 BS 到 PU 信道链路条件时，AF 方式相比 DF 方式可以使 PU 获得更低的中断概率；所提 C-SU-PU-BCR 方案可以实现最佳的 PU 中断性能，可应用于实际节约信令开销。需要说明的是，本文仅从 PU 角度分析了基于 AF 方式的 CM-RC-NOMA 性能，下一步将考虑包括 PU 和 SU 的全网性能，以便更实际地测量 CM-RC-NOMA 系统整体网络性能，以及采用 NOMA 技术所带来的 PU 和 SU 性能折衷情况。

参考文献：

- [1] GE X H, CHEN J Q, WANG C X, et al. 5G Green cellular networks considering power allocation schemes[J]. Science China Information Sciences, 2016, 59(2): 1-14.
- [2] DING Z G, LIU Y W, CHOI J H, et al. Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 185-191.
- [3] DING Z G, 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 Letters, 2014, 21(12): 1501-1505.
- [4] TIMOTHEOU S, KRIKIDIS I. Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(10): 1647-1651.
- [5] YANG Z, DING Z, FAN P, et al. A general power allocation scheme to guarantee quality of service in downlink and uplink NOMA system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(11): 7244-7257.
- [6] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W, et al. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.

- [7] HUNTER T E, SANAYEI S, NOSRATINIA A. Outage analysis of coded cooperation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 375-391.
- [8] 李美玲. 基于中继的协作频谱感知性能分析及优化[J]. 通信学报, 2013, 34, (9): 33-40.
LI M L. Performance analysis and optimization of cooperative spectrum sensing with relay[J]. Journal on Communications, 2013, 34(9): 33-40.
- [9] MEN J, GE J, ZHANG C. Performance analysis of nonorthogonal multiple access for relaying networks over Nakagami-m fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017, 66(2): 1200-1208.
- [10] DING Z, DAI H, POOR H V. Relay selection for cooperative NOMA[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(4): 416-419.
- [11] ZHONG C, ZHANG Z. Non-orthogonal multiple access with cooperative full-duplex relaying[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20 (12): 2478-2481.
- [12] DING Z G, ZHAO Z Y, PENG M G, et al. On the spectral efficiency and security enhancements of NOMA assisted multicast-unicast streaming[J]. IEEE Transactions on Communications. 2017, 65(7): 3161-3163.
- [13] LIU Y, DING Z, 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.
- [14] LV L, NI Q, DING Z, et al. Application of non-orthogonal multiple access in cooperative spectrum-sharing networks over nakagami-m fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017, 66 (6): 5506-5511.
- [15] LV L, CHEN J, NI Q. Cooperative non-orthogonal multiple access in cognitive radio[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(10): 2069-2062.
- [16] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series and products[J]. Mathematics of Computation, 2007, 20(96):1157-1160.

[作者简介]



李美玲(1982-),女,山西宁武人,博士,太原科技大学副教授,主要研究方向为无线通信关键技术、认知无线网络、协作通信、物理层安全技术、NOMA。



李莹(1994-),女,山西河津人,太原科技大学硕士生,主要研究方向为无线认知网络的物理层安全。

SAMI Muhaidat (1971-),男,加拿大人,英国萨里大学教授,主要研究方向为无线通信关键技术、物理层安全、物联网技术等。

董增寿 (1970-),男,山西寿阳人,博士,太原科技大学教授,主要研究方向为故障诊断、图像处理与模式识别、专网通信技术等。

王安红 (1972-),女,山西闻喜人,博士,太原科技大学教授,主要研究方向为多媒体通信等。

梁杰 (1970-),男,河南洛阳人,加拿大大西蒙雷泽夫大学教授,主要研究方向为视频通信、深度学习等。

丁丽萍 (1965-),女,山东青州人,中国科学院软件研究所研究员、博士生导师,主要研究方向为数字取证、系统安全、可信计算等。