

# 基于机会调度的上行认知中继蜂窝网络中断性能研究\*

杨平<sup>1,2</sup>, 张旗<sup>2</sup>, 秦家银<sup>2</sup>

(1. 东莞理工学院电子工程学院, 广东东莞, 523808;  
2. 中山大学信息科学与技术学院, 广东广州, 510275)

**摘要:** 对基于机会调度的上行两跳认知放大中继蜂窝网络的中断性能进行研究, 导出了该系统的中断概率封闭表达式和高信噪比下的中断概率近似表达式。该系统中有多个源节点, 研究表明, 通过选择最优的次用户进行信息传输, 系统中断性能可得到改善。仿真验证了理论推导的正确性。

**关键词:** 认知蜂窝网络; 中继; 频谱共享; 机会调度; 中断概率

中图分类号: TN92 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579 (2014) 01-0073-05

## Outage Performance of Uplink Cognitive Relay Cellular Networks with Opportunistic Scheduling

YANG Ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Qi<sup>2</sup>, QIN Jiayin<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China;  
2. School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The exact and asymptotic closed-form expressions for the outage probabilities (OPs) of uplink dual-hop cognitive amplify-and-forward (AF) relay cellular networks with opportunistic secondary user (SU) scheduling are investigated. Multiple SUs are involved in this networks. By opportunistically scheduling the best SU to transmit, the performance of uplink cognitive AF relay cellular networks is improved. Simulation results are presented to validate the theoretical analysis.

**Key words:** cognitive cellular networks; relay; spectrum sharing; opportunistic scheduling; outage probability

随着无线通信产业的发展, 移动用户数和无线宽带业务激增, 频谱资源日趋紧张。另一方面美国联邦通信委员会 (FCC) 的研究表明, 现已分配出的频谱资源利用率低下, 平均利用率低于 15%, 大量频谱资源被闲置<sup>[1]</sup>。认知无线电技术以提高频谱利用率为目的, 在保证主用户 (PU: Primary User) 传输质量不受影响的前提下, 允许次用户 (SU: Secondary User) 与主用户共享同一段频谱。在多次用户网络中, 各次用户信道衰落相互独立。

机会调度每次只选择一个最优的次用户进行发射, 可获得多用户分集, 提高系统频谱利用率<sup>[2]</sup>。近年来, 基于机会调度的认知无线网络性能研究得到学术界的广泛关注<sup>[3-9]</sup>。

文献 [3] 对多次用户认知无线网络在高发射功率下的渐进容量进行研究, 得到系统多用户分集增益表达式。随后, 文献 [4] 在文献 [3] 基础上, 进一步考虑能量损耗对系统容量的影响, 导出了基于机会调度的多次用户认知无线网络的归

\* 收稿日期: 2013-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61173148, 61102070, 61202498); 广东省产学研重大资助项目 (2011B090400581); 广州市科技计划资助项目 (12C42051578, 11A11060133); 东莞理工学院博士科研启动基金资助项目 (ZJ20131205)

作者简介: 杨平 (1982 年生), 男; 研究方向: 认知无线电性能分析; 通讯作者: 秦家银; E-mail: issqjy@mail.sysu.edu.cn

一化容量表达式。文献 [5] 考虑了不同系统模型下的多次用户认知无线网络, 得到了各系统下的多用户分集增益和吞吐量表达式。以上文献所研究的系统都是基于最大干扰功率约束, 主用户中断概率约束是另一种在认知无线电中被广泛考虑的约束条件。文献 [6] 对主用户中断概率约束下的多次用户上行认知无线蜂窝系统进行研究, 该系统总是选择对主用户干扰最小的次用户传输信息, 导出了系统遍历容量和平均误码率封闭表达式。文献 [7-8] 在文献 [6] 研究的基础上, 提出了三种低复杂度低能耗的次用户机会调度模型。然而, 以上研究仅限于单跳认知无线网络。在实际蜂窝网络中, 由于收发间存在障碍物或信道多径衰落的影响, 收发机间往往不存在直接链路。中继技术可以有效克服多径衰落, 提高系统传输可靠性。虽然, 近年来有大量文献对认知中继网络的性能分析进行研究<sup>[9-11]</sup>, 但都假设系统只有一个次用户发射节点, 而忽视次用户调度的影响。实际上, 当考虑多次用户的调度时, 系统需要选择最优次用户进行发射, 其性能分析将更加复杂。

本文对基于次用户机会调度的上行两跳认知中继蜂窝网络的中断性能进行分析, 中继采用放大转发 AF (AF: Amplify and Forward) 策略。通过高斯超几何函数的级数表达式, 导出系统中断概率精确表达式, 并进一步推导出系统在高信噪比下的中断概率近似表达式。研究发现, 通过选择最优次用户进行信息传输, 系统中断性能得到改善。最后, 通过仿真验证了理论推导的正确性和有效性。

## 1 系统模型

本文考虑的系统模型如图 1 所示, 由次用户链路和主用户链路组成。其中, 次用户链路中,  $M$  个次用户源节点  $S = (s_1, s_2, \dots, s_M)$  通过中继节点 ( $\gamma$ ) 和次用户基站 BS (BS: Base Station) ( $d$ ) 进行通信。由于信道处于深度衰落或收发机间存在障碍物的原因, 次用户源节点与基站之间不存在直接链路。所有节点配置单天线和采用半双工方式进行信息传输。那么, 整个次用户传输过程由两个时隙组成。在第一个时隙, 从  $M$  个源节点中选出最优的源节点, 并发射信息至中继节点。在第二个时隙, 中继节点以增益  $G$  放大接收到的信息, 再转发给基站。假设发射节点  $i (\gamma \cup S)$  到接收节点  $j (p, r, d)$  之间信道服从方差为  $1/\lambda_{ij}$  的慢变平坦 Rayleigh 衰落分布。亦即信道增益  $g_{ij} = |h_{ij}|^2$  服从均值为  $1/\lambda_{ij}$  的指数分布。为分析的方便, 假设所

有源节点距离接近, 形成一个簇, 即对所有  $sk \in S$  有  $\lambda_{skr} = \lambda_{sk}$  和  $\lambda_{skp} = \lambda_{sp}$ 。

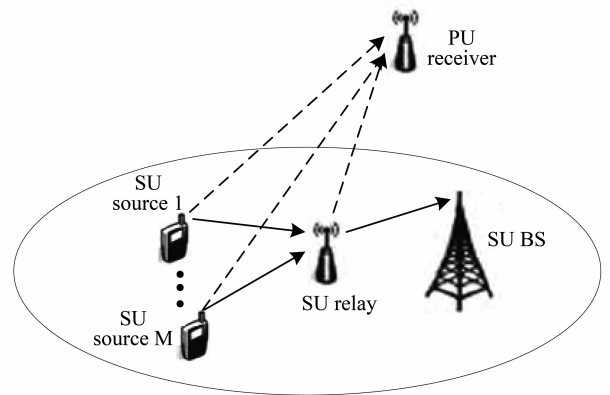


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

与文献 [9-11] 一样, 本文仅考虑最大干扰功率约束, 不考虑最大发射功率约束, 因此本文结果仅适用于主次用户间链路质量较好的情形。在最大干扰功率约束  $I_p$  下, 第  $k$  个源节点和中继节点的最大瞬时发射功率分别为  $P_{sk} = I_p/g_{skp}$  和  $P_r = I_p/g_{rp}$ 。那么, 次用户接收节点 SNR 可表示为

$$\gamma_{ij} = \frac{P_i g_{ij}}{N_0} = \frac{\gamma g_{ij}}{g_{ij}} \quad (1)$$

其中,  $N_0$  是噪声功率;  $\gamma = I_p/N_0$  是发射端平均 SNR。与文献 [12] 类似, 本文采用定时器来实现分布式调度。定时器的初始时间量与源节点端到端 SNR 成反比, 具有最大端到端 SNR 的那个源节点的定时器时间将最先耗尽, 并被选出执行信息传输, 此时端到端 SNR 为<sup>[6]</sup>

$$\gamma_{\text{end}} = \max_{sk \in S} \left( \frac{\gamma_{skr} \gamma_{rd}}{\gamma_{skr} + \gamma_{rd} + 1} \right) \quad (2)$$

## 2 中断概率分析

中断概率被定义为系统端到端瞬时 SNR 低于预定中断门限值  $\gamma_{th}$  的概率<sup>[9-11]</sup>。由全概率公式, 次用户系统中断概率为

$$P_{\text{out}} = \int_0^{\infty} Pr \left[ \max_{sk \in S} \left( \frac{\gamma_{skr} x}{\gamma_{skr} + x + 1} \right) < \gamma_{th} \right] \cdot f_{\gamma_{rd}}(x) dx \quad (3)$$

根据文 [6],  $\gamma_{rd}$  的概率密度函数和  $\gamma_{skr}$  的分布函数分别为

$$f_{\gamma_{rd}}(y) = \gamma w_1 / (y + \gamma w_1)^2 \quad (4)$$

$$F_{\gamma_{skr}}(y) = \gamma / (y + \gamma w_2) \quad (5)$$

其中,  $w_1 = \lambda_{rp}/\lambda_{rd}$  和  $w_2 = \lambda_{sp}/\lambda_{sr}$ 。

由 (3) 式，中断概率可进一步表示为

$$P_{\text{out}} = \int_0^{\infty} \{Pr[\gamma_{\text{skr}}(x - \gamma_{\text{th}}) < \gamma_{\text{th}}(x + 1)]\}^M \cdot f_{\text{grd}}(x) dx \quad (6)$$

对 (6) 式分成  $x < \gamma_{\text{th}}$  和  $x \geq \gamma_{\text{th}}$  两部分进行积分，并注意到，当  $x < \gamma_{\text{th}}$  时，我们有  $Pr[\gamma_{\text{skr}}(x - \gamma_{\text{th}}) < \gamma_{\text{th}}(x + 1)] = 1$ ，(6) 式可表示为

$$P_{\text{out}} = P_1 + P_2 \quad (7)$$

其中，

$$P_1 = F_{\gamma_{\text{rd}}}(\gamma_{\text{th}}) = \frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_{\text{th}} + \gamma w_1} \quad (8)$$

$$P_2 = \int_{\gamma_{\text{th}}}^{\infty} \{P_r[\gamma_{\text{skr}} < \frac{\gamma_{\text{th}}(x + 1)}{x - \gamma_{\text{th}}}] \}^M \cdot f_{\gamma_{\text{rd}}}(x) dx \quad (9)$$

对 (9) 做积分变换得

$$P_2 = \int_{\gamma_{\text{th}}}^{\infty} \{P_r[\gamma_{\text{skr}} < \frac{\gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}} + t + 1)}{t}] \}^M \cdot f_{\gamma_{\text{rd}}}(t + \gamma_{\text{th}}) dt \quad (10)$$

把 (4) 和 (5) 式代入 (10) 式， $P_2$  可表示为

$$P_2 = \int_0^{\infty} [1 - \frac{\gamma w_2 t}{\gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}} + t + 1) + \gamma w_2 t}]^M \cdot \frac{\gamma w_1}{(\gamma_{\text{th}} + t + \gamma w_1)^2} dt \quad (11)$$

由二项式展开定理得

$$P_2 = \sum_{i=1}^M \binom{M}{i} (-1)^i \frac{\gamma^{i+1} w_1 (w_2)^i}{(\gamma_{\text{th}} + \gamma w_2)^i} \int_0^{\infty} \frac{t^i}{(t + a)^i (t + b)^2} dt + \frac{\gamma w_1}{\gamma_{\text{th}} + \gamma w_1} \quad (12)$$

其中， $a = \frac{\gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}} + 1)}{\gamma_{\text{th}} + \gamma w_2}$ ； $b = \gamma_{\text{th}} + \gamma w_1$ 。

由积分公式 [Eq 3.259.3, 13]， $P_2$  可表示为

$$P_2 = \sum_{i=1}^M \binom{M}{i} (-1)^i \frac{\gamma^{i+1} w_1 (w_2)^i}{(\gamma_{\text{th}} + \gamma w_2)^i b}$$

$$+ B(i + 1, 1) {}_2F_1(1, i; i + 2; 1 - \frac{a}{b}) + \frac{\gamma w_1}{\gamma_{\text{th}} + \gamma w_1} \quad (13)$$

其中， $B(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha + \beta)}$  是贝塔函数 (Beta function)； $\Gamma(\cdot)$  是伽玛函数 (Gamma function)； ${}_2F_1(\cdot; \cdot; \cdot; \cdot)$  是高斯超几何函数 (Gauss hypergeometric function)<sup>[13]</sup>。

联立 (8) 式和 (13) 式，可得到中断概率封闭表达式。然而，(13) 式含有高斯超几何函数，使其计算复杂度高和进一步分析比较困难。采用高斯超几何函数的有限项级数表达式

[Eq 7.3.1.128, 14]

$${}_2F_1(1, n; m; z) = \frac{(m - 1)!}{(m - n - 1)!} \cdot$$

$$\left\{ \sum_{k=1}^{m-n-1} \cdot \frac{(m - n - k - 1)!}{(m - k - 1)!} \left(\frac{z - 1}{z}\right)^{k-1} -$$

$$\frac{z}{(n - 1)!} \cdot \left(\frac{z - 1}{z}\right)^{m-n-1} \left[ \sum_{j=1}^{n-1} \frac{z - j}{n - j} + \frac{\ln(1 - z)}{z^n} \right] \right\}$$

把高斯超几何函数有限项级数表达式代入 (13) 式， $P_2$  可进一步表示为

$$P_2 = \sum_{i=1}^M \binom{M}{i} (-1)^i \frac{\gamma^{i+1} w_1 (w_2)^i}{(\gamma_{\text{th}} + \gamma w_2)^i (b - 0)} \cdot$$

$$\left\{ 1 + \frac{ia}{b} \left[ \sum_{k=1}^{i-1} \frac{1}{i - k} \left(1 - \frac{a}{b}\right)^{-k} + \ln\left(\frac{a}{b}\right) \cdot$$

$$\left(1 - \frac{a}{b}\right)^{-i} \right\} + \frac{\gamma w_1}{\gamma_{\text{th}} + \gamma w_1} \quad (14)$$

把 (8) 式和 (14) 式代入 (7) 式，可得到系统中中断概率精确封闭表达式。

为了进一步揭示系统中各个参数是怎样影响次用户系统中中断概率的。接下来，我们将推导系统在高 SNR 下的中断概率近似表达式。

由泰勒公式  $\frac{x}{x + \alpha} = \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{x^k}{\alpha^k}$ ，并忽视

高阶项， $P_1$  可近似为

$$P_1 \stackrel{\gamma \rightarrow \infty}{\approx} \frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma w_1} \quad (15)$$

采用高斯超几何函数无穷级数表达式 [Eq. 9.100, 13]， $P_2$  可重新表示为

$$P_2 = \sum_{i=1}^M \binom{M}{i} (-1)^i \frac{\gamma^{i+1} w_1 (w_2)^i}{(\gamma_{\text{th}} + \gamma w_2)^i b}$$

$$+ B(i + 1, 1) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(1)_k (i)_k}{(i + 2)_k k!} \left(1 - \frac{a}{b}\right)^k + \frac{\gamma w_1}{\gamma_{\text{th}} + \gamma w_1}$$

(16)

其中， $(\alpha)_k$  表示 Pochhammer 符号，其定义为  $(\alpha)_k = \alpha(\alpha + 1) \cdots (\alpha + k - 1)$ 。

运用泰勒公式  $\frac{\alpha}{x + \alpha} = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{x^k}{\alpha^k}$  和恒等式 [Eq. 0.154.5, 13]，忽视高阶项， $P_2$  可以近似为

$$P_2 \stackrel{\gamma \rightarrow \infty}{\approx} \Gamma(M) \left(\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma w_2}\right)^M \left(1 + \frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma w_1}\right) \quad (17)$$

联立 (15) 式和 (17) 式，得到系统在高 SNR 下的中断概率近似表达式为

$$P_{\text{out}} \stackrel{\gamma \rightarrow \infty}{\approx} \begin{cases} \left(\frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2}\right) \frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma}; & M = 1 \\ \frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma w_1}; & M \geq 2 \end{cases} \quad (18)$$

从 (18) 式, 可以得到以下结论。

1) 注意到当  $M = 1$  时, 系统中断概率退化为传统单用户系统中断概率。记传统单用户系统中断概率为  $P_{\text{out}}^{\text{uni}}$ 。那么, 由 (18) 式得

$$P_{\text{out}} \leq P_{\text{out}}^{\text{uni}} \quad (19)$$

即, 在高 SNR 下, 相对于传统单用户系统, 多用户系统中断性能得到改善。定义单用户和多用户系统之间的中断概率间隙为  $\Delta P_{\text{out}} = P_{\text{out}}^{\text{uni}} - P_{\text{out}}$ , 那么有

$$\Delta P_{\text{out}} \underset{\gamma \rightarrow \infty}{\approx} \begin{cases} 0; & M = 1 \\ \frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma w_2}; & M \geq 2 \end{cases} \quad (20)$$

即单用户和多用户系统间的中断概率间隙会随着的增加而增加, 随着的减小而增加。

2) 由 (18) 式可知, 当  $M \geq 2$  时, 系统中断概率近似值与次用户系统第一跳信道统计特性 ( $\lambda_{sp}, \lambda_{sr}$ ) 无关, 而仅取决于第二跳的信道统计特性 ( $\lambda_{rp}, \lambda_{rd}$ )。这是因为尽管可以通过增加源节点数目来改善第一跳性能, 但是由于整个信息传输过程是由两个时隙完成的, 系统性能仍将受限于第二跳的性能。

3) 根据分集和编码增益定义, 可得到系统编码和分集增益分别为

$$G_c = \begin{cases} \frac{w_1 w_2}{(w_1 + w_2) \gamma_{\text{th}}}; & M = 1 \\ \frac{w_2}{\gamma_{\text{th}}}; & M \geq 2 \end{cases} \quad (21)$$

$$G_d = - \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \frac{\log(P_{\text{out}}(\lambda))}{\log(\lambda)} = 1 \quad (22)$$

从 (21) 和 (22) 式可知尽管单用户和多用户系统分集增益相同, 但多用户系统的编码增益不小于单用户系统的编码增益。因此, 多用户系统中断性能优于单用户系统。

4) 分集复用折中用于描述系统传输性能指标中错误概率和传输速率之间的折中率。文献 [11] 给出了中断门限值  $\gamma_{\text{th}}$  与复用增益  $r$  的关系为

$$\gamma_{\text{th}} = (1 + \gamma)^{2r} - 1 \quad (23)$$

把 (23) 式代入 (18) 式和 (22) 式得

$$G_d = - \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \left\{ \frac{\log[\beta(1 + \gamma)^{2r} - \beta]}{\log(\gamma)} - 1 \right\} \quad (24)$$

其中, 当时  $M = 1, \beta = w_1^{-1} + w_2^{-1}$ ; 当  $M \geq 2$  时,  $\beta = w_1^{-1}$ 。对 (24) 式运用洛必达求导法则, 可得到系统分集复用折中为

$$G_d = 1 - 2r \quad (25)$$

(25) 式说明, 当  $r \rightarrow 0$  时, 系统获得满分集增益

1; 当  $G_d \rightarrow 0$  时, 系统获得最大复用增益为  $1/2$ , 这是因为系统传输分两个时隙完成。

### 3 仿真结果与分析

本节将通过蒙特卡洛仿真验证理论推导的正确性和有效性。采用通用系统模型, 本节仿真参数设置如下:  $\gamma_{\text{th}} = 3, \lambda_{rp} = 1$  和  $\lambda_{sr} = 10$ 。

图 2 给出了当  $\lambda_{sp} = 0.1$  时, 次用户系统中断概率在不同  $\{\lambda_{rd}, M\}$  组合下的曲线。从图中可以看出理论值与仿真值完美匹配, 验证了理论表达式的精确性。在高 SNR 下, 中断概率近似值与仿真值一致, 说明所得到的中断概率近似表达式的紧致性。此外, 当  $\lambda_{rd}$  固定为 1 时, 对比曲线  $M = \{1, 2, 10\}$ , 相对于单用户系统 ( $M = 1$ ), 多用户系统 ( $M \geq 2$ ) 的中断性能得到极大改善。此改善是由多用户分集所带来的。从图中还可以发现, 所有曲线都获得相同的分集增益, 但编码增益并不相同, 这证实了结论 4 的有效性。当源节点数目  $M$  固定为 10 时, 从图中可知, 系统中断性能会随着  $\lambda_{rd}$  的递减而改善。其原因可解释如下, 从 (18) 式可知, 当  $M \geq 2$  时, 系统中断概率是  $\lambda_{rd}$  的单调增函数, 亦即中断概率随着  $\lambda_{rd}$  的减小而减小。其物理意义是系统中断性能会随着第二跳信道状态改善而得到改善。

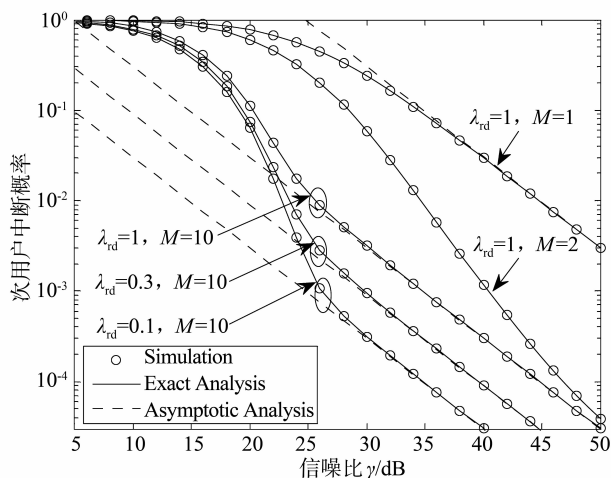


图 2 中断概率在不同  $\{\lambda_{rd}, M\}$  组合下曲线

Fig. 2 Outage probability versus SNR for different values of  $\lambda_{rd}$  and  $M$

图 3 给出了当  $\lambda_{rd} = 1$  时, 次用户系统中断概率在不同  $\{\lambda_{sp}, M\}$  组合下的曲线。当源节点数目  $M$  固定为 2 时, 仔细观察曲线  $\lambda_{sp} = \{0.1, 0.3, 1\}$ , 正如结论 2 所述, 在高 SNR 区域, 中断概率近似

值与  $\lambda_{sp}$  无关, 三条曲线在高 SNR 区域重合。但是, 在中低 SNR 区域, 系统中断性能随着  $\lambda_{sp}$  增加而得到改善, 这是因为更大的  $\lambda_{sp}$  意味着源节点可以采用更大的发射功率。当  $\lambda_{sp}$  固定时, 对比单用户系统 ( $M=1$ ) 和多用户系统 ( $M=2$ ) 中断概率曲线, 可发现两系统之间存在一个中断概率间隙。在高信噪比时, 此中断概率间隙随着的减小而显著增加, 这证实了结论中的分析结果。

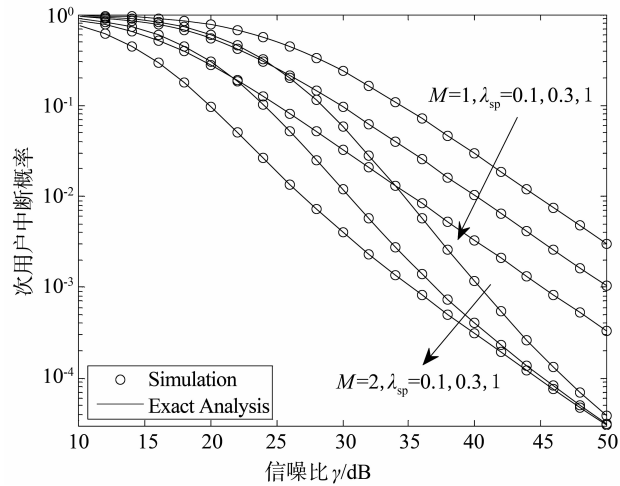


图 3 中断概率在不同  $\{\lambda_{rd}, M\}$  组合下曲线

Fig. 3 Outage probability versus SNR for different values  $\lambda_{rd}$  of and  $M$

## 4 结 论

本文对具有多个源节点的上行认知放大中继蜂窝网络的中断性能进行研究。首先, 推导了次用户系统中断概率精确表达式。其次, 在得到高 SNR 下中断概率近似表达式基础上, 进一步分析了系统分集和编码增益和分集复用折中。研究发现, 相比于传统单源节点系统, 对多个源节点进行最优机会调度可显著提高次用户系统中断性能。且单源节点与多源节点系统间的中断概率间隙随着源节点到主用户接收节点信道状况改善而增加。最后, 通过仿真验证了理论推导的正确性。

## 参考文献:

[1] 罗丽平, 李学易, 秦家银. 认知 MIMO 系统频谱与吞吐量折中 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2012, 51(2): 6-11.

[2] VISWANATH P, TSE D N C, LAROLA R. Opportunistic beamforming using dumb antennas [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 48(6): 277-1294.

[3] BAN T W, CHOI W, JUNG B C, et al. Multi-user diversity in a spectrum sharing System [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(1): 102-106.

[4] BAN T W, CHOI W, SUNG D K. Capacity and energy efficiency of multi-user spectrum sharing systems with opportunistic scheduling [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(6): 2836-2841.

[5] ZHANG R, LIANG Y C. Investigation on multiuser diversity in spectrum sharing based cognitive radio networks [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(2): 133-135.

[6] LI D. Performance analysis of uplink cognitive cellular networks with opportunistic scheduling [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(9): 827-829.

[7] DING H, GE J, DA COSTA B D, et al. Energy-efficient and low-complexity schemes for uplink cognitive cellular networks [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(12): 1101-1103.

[8] XU T, GE J, DING H. Opportunistic scheduling for uplink cognitive cellular networks with outage protection of the primary user [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(1): 71-74.

[9] LUO L, ZHANG P, ZHANG G, et al. Outage performance for cognitive relay networks with underlay spectrum sharing [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(7): 710-712.

[10] YANG P, LUO L, QIN J. Outage performance of cognitive relay networks with interference from primary user [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(10): 1695-1698.

[11] BAO V N Q, DUONG T Q, DA COSTA D B, et al. Cognitive amplify and forward relaying with best relay selection in non-identical rayleigh fading [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(3): 475-478.

[12] BLETSAS A, KHISTI A, REED D P, et al. A simple cooperative diversity method based on network path selection [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 659-672.

[13] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series, and products [M]. Academic, San Diego, 2007.

[14] PRUDNIKOV A P, BRYCHKOV Y A, MARICHEV O I. Integrals and series, vol. 3 [M]. Gordon Breach Science Publishers, Amsterdam, 1986.