

# 存在同信道干扰和多用户分集的多蜂窝系统性能分析

邹应全<sup>1,2</sup>, 赵 睿<sup>3</sup>, 杨绿溪<sup>1</sup>

(1. 东南大学信息科学与工程学院, 江苏南京 210096; 2. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏南京 210044;  
3. 华侨大学信息科学与工程学院, 福建泉州 362021)

**摘 要:** 考虑存在来自其他蜂窝的不同功率同信道干扰的多用户上行链路, 分析了基站采用多用户调度和最大比合并接收时的系统性能. 在期望信号和干扰信号分别为 Nakagami- $m$  和 Rayleigh 时, 运用基于概率密度函数的性能分析法推导了系统中断概率和平均误符号率 (ASER) 的闭合表达式. 仿真结论显示, 系统中断概率和 ASER 的解析曲线与数值仿真结果一致, 系统性能随着天线数和用户数的增大而提升, 多天线和多用户分集增益明显, 干扰功率有较大差异时系统中断概率性能有所下降.

**关键词:** 同信道干扰; 最大比合并; 多用户分集; 中断概率; 平均误符号率

**中图分类号:** TN911.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 10-2235-05

## Performance Analysis of Multi-Cell Systems with Cochannel Interferences and Multiuser Diversity

ZOU Ying-quan<sup>1,2</sup>, ZHAO Rui<sup>3</sup>, YANG Lu-xi<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Jiangsu, Nanjing 210096, China;  
2. School of Electric and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Jiangsu, Nanjing 210044, China;  
3. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

**Abstract:** The performance of the system with maximal ratio combining and multiuser scheduling is studied in the multiuser uplink in the presence of unequal power cochannel interferences from other cells. The channels of useful and interference signals are assumed to be Nakagami- $m$  and Rayleigh fading. The closed form expressions for outage probability and average symbol error ratio (ASER) of system are derived by using performance analysis method based on probability density function. Simulation results show that, the analytical curves of the derived expressions match well with the numerical simulations, and the increase of the number of receive antennas and users are both of benefit to the improvement of system performance due to multi-antenna and multiuser diversity, and the presence of a predominant interferer deteriorates the outage performance.

**Key words:** cochannel interference (CCI); maximum ratio combining (MRC); multiuser diversity; outage probability; average symbol error ratio (ASER)

## 1 引言

无线通信系统中的信号传输通常都会受到加性白高斯噪声、多径衰落和同信道干扰 (cochannel interference, CCI) 的影响, 通过利用自适应阵列处理等分集技术可有效地削弱这些负面因素的影响. 最优合并同时考虑了期望信号的多径衰落和 CCI 的影响来设计合并加权向量, 可以在每个时隙获得最大信干噪比, 但却需要获知所有 CCI 的信道信息<sup>[1]</sup>. 一种较为实际有效的接收

方法是采用最大比合并 (MRC) 技术, 在每个接收阵列单元上乘以一个与期望信号信道匹配的加权因子, 同样可以获得较高的接收信噪比.

目前已有文献分析了加性噪声和 CCI 同时存在时 MRC 系统的性能<sup>[2~4]</sup>. 文献[1]对比分析了最优合并和最大比合并对系统性能的影响. 文献[3]分析了 Nakagami- $m$  信道下存在任意功率 CCI 时 MRC 系统的性能. 文献[4]进一步分析了期望信号信道估计误差对中断概率和平均误符号率性能的影响. 以上三篇文献都是基于

SIMO-MRC 系统. 针对 MIMO-MRC 多蜂窝系统, 文献[6]基于更加实际的蜂窝内和蜂窝间的不同干扰功率详细分析了多蜂窝上行链路传输的中断概率性能, 结论指出接收端多天线可提升系统性能, 发射分集不能克服相同蜂窝用户的干扰. 文献[7]则在以上研究的基础上进一步分析了其误符号率性能.

在多点对点的通信链路中, 多个用户中的一个与基站进行通信, 各个用户与基站间的链路相互独立, 对于某个用户处于深衰落的信道可能对其他用户是强增益信道, 通过将有限的无线资源分配给信道条件好的用户可最大化系统和吞吐量, 即基站可采用多用户调度获得多用户分集增益, 从而提高系统性能[8].

目前还未有文献针对多用户调度分析存在 CCI 时 MRC 系统的性能, 本文针对这一研究不足, 考虑多蜂窝通信网络中存在多个 CCI 时的多用户上行链路的多点对点(MPP)系统, 用户均配置单天线, 基站配置多天线, 基站通过多用户调度从本小区用户中选择一个用户为其传输信号, 基站采用 MRC 方式接收. 由于不同蜂窝中用户的发送功率不同, 导致对某一基站的干扰功率不一样, 本文针对蜂窝内和蜂窝间干扰功率不同情况下的干扰概率分布特性进行性能研究, 此外, 目前的文献多数针对期望信号信道为 Rayleigh 分布的情况, 本文则将信道扩展为 Nakagami- $m$  分布. 由于干扰信道较少考虑直达路径影响, 另外为了简化分析的复杂度, 本文干扰信道取 Nakagami- $m$  当  $m=1$  时, 为较常见的 Rayleigh 信道, 从而所推导的解析表达式可适用于更多的通信场景. MPP 多用户通信系统不同于单用户通信系统, 多用户分集的性能分析更加复杂且对于多天线系统的设计有着重要意义, 现有研究也表明多用户分集增益能够显著改善系统中断概率性能[8]. 本文结合多基站环境中存在不同功率 CCI 的情况, 研究了多用户分集对系统中断概率和平均误符号率(ASER)性能的影响, 并采用基于概率密度函数(PDF)的性能分析法[9,10]推导了其闭合表达式. 仿真结论显示, 所推导的中断概率和误符号率性能的闭合表达式与 Mont-Carlo 数值仿真结果一致, 基站接收天线数与用户数的增长都会提升系统中断概率和 ASER 性能, 分别显示了天线和多用户分集增益. 此外, 干扰功率差异较大也会影响系统性能的提升.

## 2 系统模型

考虑  $K$  个单天线用户和一个基站的上行链路通信场景, 基站配置  $N_r$  根接收天线, 基站从  $K$  个用户中选择一个用户作为期望用户, 同时存在  $L$  个来自于本小区和其他小区的同信道干扰. 假设第  $k$  个用户被选中为基站传输信号, 则基站的  $N_r \times 1$  维接收信号向量  $\mathbf{r}_k$

可表示为:

$$\mathbf{r}_k = \sqrt{P_0} \mathbf{h}_k s_0 + \sum_{i=1}^L \sqrt{P_i} \mathbf{h}_i s_i \quad (1)$$

其中,  $s_0$  为发送至基站的有用信号,  $s_i$  为干扰信号, 且均为独立零均值单位能量, 即:  $E\{|s_0|^2\} = 1$ ,  $E\{|s_i|^2\} = 1$ .  $P_0$  和  $P_i$  分别为有用信号和干扰信号的功率,  $\mathbf{h}_k$  为选中的用户至基站间的  $N_r \times 1$  维信道向量,  $\mathbf{h}_k = [h_1, \dots, h_{N_r}]^T$ ,  $\mathbf{h}_i$  为第  $i$  个干扰源至用户间的  $N_r \times 1$  维信道向量,  $\mathbf{h}_i$  为准静态平衰落瑞利信道. 由于系统是干扰受限的, 且通常干扰信号强度远大于噪声强度, 所以可忽略加性白高斯噪声对性能的影响. 基站为最大化接收信噪比采用 MRC 方式设计接收向量, 经接收向量处理后的信号为:

$$z_k = \sqrt{P_0} \|\mathbf{h}_k\|^2 s_0 + \sum_{i=1}^L \sqrt{P_i} \mathbf{h}_k^H \mathbf{h}_i s_i \quad (2)$$

则基站接收信干比(SIR)为:

$$\gamma_k = \frac{P_0 \|\mathbf{h}_k\|^4}{\sum_{i=1}^L P_i \|\mathbf{h}_k^H \mathbf{h}_i\|^2} = \frac{\|\mathbf{h}_k\|^2}{\sum_{i=1}^L \alpha_i \|w_i\|^2} \quad (3)$$

其中,  $\alpha_i = P_i/P_0$ ,  $w_i = \mathbf{h}_k^H \mathbf{h}_i / \|\mathbf{h}_k\|$ . 由于干扰信道呈瑞利衰落,  $w_i$  服从零均值单位方差独立同分布复高斯分布[1], 且独立于  $\mathbf{h}_k$ .  $2\|w_i\|^2$  服从自由度为 2 的卡方分布[1], 即:

$$2\|w_i\|^2 \sim \chi^2(2) \quad (4)$$

于是用户的 SIR 可表示为两个独立变量  $x$  和  $y$  的比值:

$$\gamma_k = \frac{x}{y} \quad (5)$$

其中,  $x = 2\|\mathbf{h}_k\|^2 = 2 \sum_{i=1}^{N_r} \|h_i\|^2$ , 为期望信号的功率, 等效于无干扰情况下具有单位方差噪声的 SIMO-MRC 系统的输出信噪比(SNR);  $y = 2 \sum_{i=1}^L \alpha_i \|w_i\|^2$ , 为干扰信号的功率.

当期望信号的信道  $\mathbf{h}_k$  服从 Nakagami- $m$  衰落信道时,  $x$  为 Gamma 分布变量[5], 即  $x \sim G(mN_r, 2/m)$ , 其 PDF 为:

$$p_x(x) = \left(\frac{m}{2}\right)^{mN_r} \frac{x^{mN_r-1} e^{-\frac{mx}{2}}}{\Gamma(mN_r)} \quad (6)$$

其中,  $\Gamma(\cdot)$  为 Gamma 函数,  $m$  为 Nakagami 衰落因子.

下面讨论  $y$  的分布. 在上行链路蜂窝通信环境中, 通常既存在来自本小区其他用户的干扰(蜂窝内干扰), 也存在来自其他小区用户的干扰(蜂窝间干扰). 蜂窝内干扰的功率通过相同的基站进行控制, 因此具有相等的功率; 而蜂窝间干扰的功率由其他基站进行控制, 因此功率不相等[6,7]. 为了分析存在多个干扰源

的 SIMO-MRC 系统的性能,就需根据干扰功率的不同对多个干扰源进行分组,将相同功率的干扰分为一组.通常假定  $L$  个干扰源可分为  $p$  组,每组有相同的功率  $P_i$ ,每组包含  $t_i$  个干扰源,  $i = 1, 2, \dots, p$ ,  $\sum_{i=1}^p t_i = L$ . 由式和独立 Gamma 变量和的乘积属性可得:  $y \sim \sum_{i=1}^p \alpha_i \chi^2(2t_i)$ , 其特征函数为:

$$\phi_y(z) = E\{e^{zy}\} = \prod_{i=1}^p (1 - 2\alpha_i z)^{-t_i} \quad (7)$$

式(7)可进一步表示为:

$$\phi_y(z) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{t_i} \frac{\beta_{ij}}{\left(z - \frac{1}{2\alpha_i}\right)^j} \quad (8)$$

其系数  $\beta_{ij}$  可由下式确定:

$$\beta_{ij} = \frac{1}{(t_i - j)!} \lim_{z \rightarrow \frac{1}{2\alpha_i}} \frac{d^{t_i-j}}{dz^{t_i-j}} \left[ \left(z - \frac{1}{2\alpha_i}\right)^{t_i} \phi_y(z) \right] \quad (9)$$

对式(8)进行反傅立叶变换可得  $y$  的 PDF 为:

$$p_y(y) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{t_i} \frac{(-1)^j \beta_{ij}}{(j-1)!} y^{j-1} e^{-\frac{y}{2\alpha_i}} \quad (10)$$

结合式(6)和式(10),式(5)中  $SIR\gamma_k$  的 PDF 可推导如下:

$$\begin{aligned} p_{\gamma_k}(\gamma_k) &= \int_0^\infty y p_{xy}(y\gamma_k, y) dy \\ &= \left(\frac{m}{2}\right)^{mN_r} \frac{\gamma_k^{mN_r-1}}{\Gamma(mN_r)} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{t_i} \frac{(-1)^j \beta_{ij}}{(j-1)!} \\ &\quad \cdot \int_0^\infty y^{mN_r+j-1} e^{-\frac{m\gamma_k y}{2\alpha_i} + y} dy \\ &= \left(\frac{m}{2}\right)^{mN_r} \frac{\gamma_k^{mN_r-1}}{\Gamma(mN_r)} \\ &\quad \cdot \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{t_i} \frac{(-1)^j \beta_{ij} (2\alpha_i)^{mN_r+j} \Gamma(mN_r+j)}{(m\gamma_k \alpha_i + 1)^{mN_r+j} (j-1)!} \end{aligned} \quad (11) \sim (12)$$

其中,由随机变量  $x$  和  $y$  的独立性可推得式;由[12]中式(3.381.4)可推得式(12).

$\gamma_k$  的累积分布函数(CDF)可推导如下:

$$P_{\gamma_s}(\gamma) = [P_{\gamma_k}(\gamma)]^K = \left[ \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{t_i} \sum_{q=0}^{j-1} \beta_{ij} (-2\alpha_i)^j \frac{m^{mN_r} \Gamma(mN_r+q) (\alpha_i \gamma)^{mN_r}}{\Gamma(q+1) \Gamma(mN_r) (1+m\alpha_i \gamma)^{mN_r+q}} \right]^K \quad (16)$$

$$\begin{aligned} p_{\gamma_s}(\gamma) &= \frac{d(P_{\gamma_s}(\gamma))}{d\gamma} = K p_{\gamma_k}(\gamma) [P_{\gamma_k}(\gamma)]^{K-1} = K \left(\frac{m}{2}\right)^{mN_r} \frac{\gamma^{mN_r-1}}{\Gamma(mN_r)} \\ &\quad \cdot \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{t_i} \frac{(-1)^j \beta_{ij} (2\alpha_i)^{mN_r+j} \Gamma(mN_r+j)}{(m\gamma \alpha_i + 1)^{mN_r+j} (j-1)!} \left[ \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{t_i} \sum_{q=0}^{j-1} \beta_{ij} (-2\alpha_i)^j \frac{m^{mN_r} \Gamma(mN_r+q) (\alpha_i \gamma)^{mN_r}}{\Gamma(q+1) \Gamma(mN_r) (1+m\alpha_i \gamma)^{mN_r+q}} \right]^{K-1} \end{aligned} \quad (17)$$

由式可知 Nakagami-Rayleigh 信道下 MPP 的多用户选择 MRC 系统的中断概率闭合表达式为:

$$P_{out}(\gamma_{th}) = P_{\gamma_s}(\gamma_{th}) = \left[ \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{t_i} \sum_{q=0}^{j-1} \beta_{ij} (-2\alpha_i)^j \frac{m^{mN_r} \Gamma(mN_r+q) (\alpha_i \gamma_{th})^{mN_r}}{\Gamma(q+1) \Gamma(mN_r) (1+m\alpha_i \gamma_{th})^{mN_r+q}} \right]^K \quad (18)$$

$$\begin{aligned} P_{\gamma_k}(\gamma_k) &= \Pr\left(\frac{x}{y} \leq \gamma_k\right) \\ &= \int_0^\infty p_x(x) dx \int_{x/\gamma_k}^\infty p_y(y) dy \\ &= \int_0^\infty \left(\frac{m}{2}\right)^{mN_r} \frac{x^{mN_r-1} e^{-\frac{mx}{2}}}{\Gamma(mN_r)} dx \\ &\quad \cdot \int_{x/\gamma_k}^\infty \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{t_i} \frac{(-1)^j \beta_{ij}}{(j-1)!} y^{j-1} e^{-\frac{y}{2\alpha_i}} dy \\ &= \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{t_i} \sum_{q=0}^{j-1} \beta_{ij} (-2\alpha_i)^j \\ &\quad \cdot \frac{m^{mN_r} \Gamma(mN_r+q) (\alpha_i \gamma_k)^{mN_r}}{\Gamma(q+1) \Gamma(mN_r) (1+m\alpha_i \gamma_k)^{mN_r+q}} \end{aligned} \quad (13)$$

其中,式的推导利用了[12]中式(3.381.3)和式(6.455.1),  ${}_2F_1(\cdot)$  为高斯超几何函数[12]. 当  $m = 1$  时, Nakagami- $m$  信道退化为 Rayleigh 信道,当所有 Rayleigh 同信道干扰都有相同的功率,即  $\alpha_i = \alpha$  且  $p = 1$ , 则  $\gamma_k$  的 CDF 可简化成为:

$$P_{\gamma_k}(\gamma_k) = \sum_{q=0}^{L-1} \binom{N_r+q-1}{q} \frac{(\alpha \gamma_k)^{N_r}}{(1+\alpha \gamma_k)^{N_r+q}} \quad (14)$$

### 3 中断概率性能分析

中断概率是衰落信道下无线通信系统中的一项重要性能指标.对于较好的码本和较长的码块,中断概率还可近似于误帧率.本文将中断概率定义为信干比小于某一给定的信干比门限的概率,即  $P_{out}(\gamma_{th}) \triangleq \Pr(\gamma \leq \gamma_{th}) = \int_0^{\gamma_{th}} p_y(\gamma) d\gamma$ . 本文所述的存在其他蜂窝干扰的多用户上行链路通信场景的多用户调度的方法是,基站通过比较来自多个用户的接收 SIR, 从中选择最大 SIR 的那个用户作为通信对象,从而实现多用户选择分集.因此这种 MPP 的多用户选择 MRC 系统的有效 SIR 为  $\{\gamma_k\}_{k=1,2,\dots,K}$  中最大的一个,即:

$$\gamma_s = \max_{k=1,2,\dots,K} \gamma_k \quad (15)$$

由概率论知,具有  $K$  个随机变量  $\{\gamma_k\}_{k=1,2,\dots,K}$  的系统有效 SIR  $\gamma_s$  的 CDF 和 PDF 可分别表示为:

### 4 平均误符号率分析

本节通过对瞬时 SIR 的瞬时误符号率 (SER) 取平均来推导系统 ASER 闭合表达式, 即:  $P_e = E\{P_e(\gamma)\}$   
 $= \int_0^\infty P_e(\gamma) p_\gamma(\gamma) d\gamma$  [13]. 在无线通信环境中通常存在大量干扰信号, 本文假设干扰信号为高斯分布, 可通过瞬时 SIR 来表示瞬时 SER, 也可利用 SIR 的 PDF 来表示 ASER. 使用高斯 Q 函数来表示瞬时 SER 对于高斯干扰是有效的. 中心极限定理的传统形式在这里并不适用, 原因是式中的干扰包含独立但不同分布项, 但 Cramer 中心极限定理可适用. 定理指出, 多个独立随机变量之和  $X_1 + \dots + X_N$  近似服从正态分布, 如果以下各项均满足, 即: (1) 每个变量  $X_i$  有零均值; (2) 每个变量具有有限方差  $\sigma_i^2 = E\{|X_i|^2\}$ ; (3)  $\sigma_i / (\sigma_1^2 + \dots + \sigma_N^2) \rightarrow 0$  和当  $N \rightarrow \infty$  时  $\sigma_1^2 + \dots + \sigma_N^2 \rightarrow \infty$  [14]. 很显然由上文对干扰信号的假设可知式 (2) 中干扰项满足以上条件, 因此干扰信号为高斯分布. 已有文献也通过运用中心极限定理基于高斯分布的干扰计算了 ASER [1].

对于常用的调制模式, 某一系统有效 SIR  $\gamma$  下的 ASER 可表示为:

$$P_e = E_\gamma\{\beta_1 Q(\sqrt{2\beta_2\gamma})\} \quad (19)$$

其中,  $Q(\cdot)$  为高斯 Q 函数, 定义为  $Q(\alpha) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_\alpha^\infty \exp(-x^2/2) dx$ .  $\beta_1$  和  $\beta_2$  为调制常数, 调制模式包括 BPSK ( $\beta_1 = 1, \beta_2 = 1$ )、正交信号 BFSK ( $\beta_1 = 1, \beta_2 = 0.5$ )、最小相关 BFSK ( $\beta_1 = 1, \beta_2 = 0.715$ ) 和 M 元 PAM ( $\beta_1 = 2(M-1)/M, \beta_2 = 3/(M^2-1)$ ) [13]. 对于其他一些调制模式该表达式为近似 ASER 表达式, 比如 M-PSK ( $\beta_1 = 2, \beta_2 = \sin^2(\frac{\pi}{M})$ ).

可进一步将式 (18) 表达成系统有效 SIR 的 CDF 的积分形式 [15]:

$$P_e = \frac{\beta_1 \sqrt{\beta_2}}{2\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{e^{-\beta_2 x}}{\sqrt{x}} P_\gamma(x) dx \quad (20)$$

当  $m = 1, L = 1, \alpha_i = \alpha$  和  $p = 1$  时, Rayleigh/Rayleigh 信道下只有一个干扰源时 MPP 多用户选择 MRC 系统的 ASER 可表示为:

$$P_e = \frac{\beta_1 \sqrt{\beta_2} \alpha^{KN}}{2\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{e^{-\beta_2 x} x^{KN-\frac{1}{2}}}{(1+\alpha x)^{KN}} dx$$

$$= \frac{\beta_1}{\sqrt{\pi}} 2^{KN-1} \Gamma\left(KN_r + \frac{1}{2}\right) e^{\frac{\beta_2}{2\alpha}} D_{-2KN} \left(\sqrt{\frac{2\beta_2}{\alpha}}\right) \quad (21)$$

其中, 由 [12] 中的式 (3.383.6) 可推得式 (20),  $D_p(z)$  为抛物柱面函数, 其定义为:  $D_p(z) = 2^{1+\frac{p}{2}} W_{\frac{1}{4}+\frac{p}{2}, -\frac{1}{4}}\left(\frac{z^2}{2}\right) z^{-\frac{1}{2}}$  (见 [12] 中式 (9.240)),  $W_{\lambda, \mu}(z)$  为 Whittaker

函数.

### 5 仿真结果与分析

本节通过数值仿真验证所推导的闭合表达式的正确性, 并考察用户数  $K$ 、天线数  $N_r$ 、干扰功率  $P_i$  和 Nakagami 参数  $m$  对系统中断概率和 ASER 性能的影响.

首先分别对基站接收天线数  $N_r$  不同和 Nakagami 参数  $m$  不同时系统中断概率性能仿真. 图 1 中假设同信道干扰数为 6, 设干扰总功率为  $P_I = \sum_{i=1}^L P_i$ , 假设  $P_i$  ( $i = 1, \dots, L$ ) 均相同, 即:  $\alpha_1 = \dots = \alpha_6 = \alpha$ . 设 Nakagami 参数  $m = 1$ , 用户数  $K = 2$ , 基站接收信干比门限  $\gamma_{th} = 12$  dB. 横坐标信干比定义为:  $SIR = P_0/P_I$ . 图 2 仿真了参数  $m = 1, 2, 3$  不同时的中断概率性能.

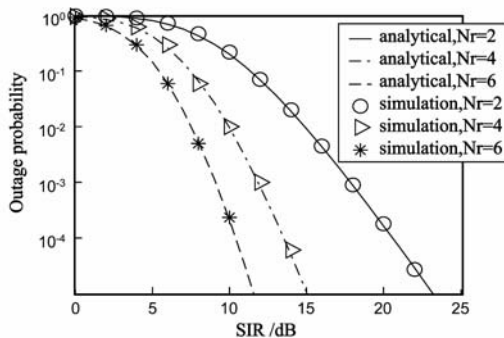


图1 接收天线数  $N_r$  不同时系统中断概率 ASER 性能的比较

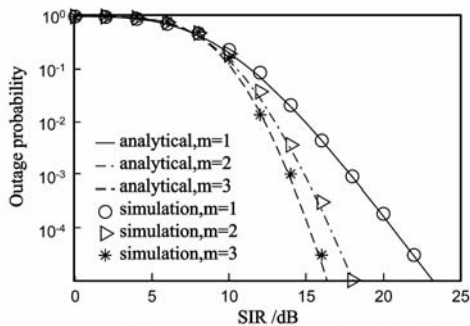


图2 Nakagami 参数  $m = 1, 2, 3$  时系统中断概率性能的比较

由图 1 可见, 在三种天线数的配置下, 解析曲线与 Mont-Carlo 数值仿真曲线基本吻合, 从而验证了本文所推导的 MPP 的多用户选择 MRC 系统的中断概率闭合表达式 (式 (18)) 的正确性. 随着天线数的增加, 系统的中断概率性能明显提升, 这是由天线分集增益增加所致. 由图 2 可见, (式 (18)) 在各种  $m$  值下都与数值仿真结果完全吻合. 系统中断概率随着  $m$  值的增加而降低, 这是由于 Nakagami- $m$  信道的参数  $m$  为衰落指数,  $m$  增大意味着衰落减小, 故而平均接收信噪比提高.

图 3 仿真了不同接收天线数对系统 ASER 性能的影响, 仿真参数: 相同功率 CCI, CCI 数为 6,  $m = 2, K = 2$ , 采用 4PAM 调制方式 ( $\beta_1 = 3/2, \beta_2 = 1/5$ ). 由图 3 可

见,接收天线数  $N_r$  越大,系统 ASER 性能越好,且曲线斜率越大,说明多天线带来的分集增益越明显.图 4 仿真了不同用户数对系统 ASER 性能的影响,  $m = 2$ ,  $N_r = 2$ ,采用 BPSK 调制方式( $\beta_1 = 1$ ,  $\beta_2 = 1$ ).由图 4 可见,系统 ASER 性能随着用户数的增加而提升.由图 3 和图 4 都可见,对于三种天线数的情况,解析曲线与数值仿真曲线吻合良好,从而验证了闭合表达式(21)的正确性.

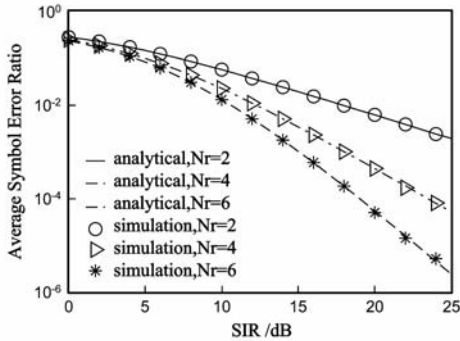


图3 接收天线数 $N_r$ 不同时系统ASER性能的比较

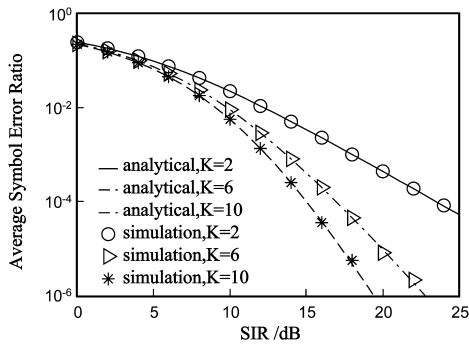


图4 用户数 $K$ 不同时系统ASER性能的比较

## 6 结论

本文针对存在不同干扰功率的 CCI 的多基站多用户的上行链路通信场景,期望信号和干扰信号信道分别服从 Nakagami-m 和 Rayleigh 分布,详细分析了采用多用户调度的 MRC 系统的性能,并运用基于 PDF 的性能分析法推导了系统中断概率和 ASER 闭合表达式.仿真结果验证了所推导的闭合表达式的正确性,接收天线和用户数的增加会提升系统中断概率和 ASER 性能,多天线和多用户分集增益明显,仿真结果还显示相同干扰功率下的系统性能优于具有不同干扰功率的系统.

## 参考文献

- [1] 李汀,杨绿溪.一种前向放大中继通信系统中的有限反馈中继预编码方案[J].电子学报,2010,38(7):1531-1534. T Li, L X Yang. Limited feedback precoding for amplify and forward relaying [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7): 1531-1534. (in Chinese)
- [2] A Shah, A M Haimovich. Performance analysis of maximal ratio combining and comparison with optimum combining for mo-

bile radio communications with cochannel interference [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2000, 49(4): 1454-1463.

- [3] J M Romero-Jerez, J P Martin, A J Goldsmith. Outage probability of MRC with arbitrary power cochannel interferences in Nakagami fading [J]. IEEE Transactions on Communication, 2007, 55(7): 1283-1286.
- [4] K S Ahn, R W Heath. Performance analysis of maximum ratio combining with imperfect channel estimation in the presence of cochannel interferences [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2009, 8(3): 1080-1085.
- [5] H Shin, J B Song. MRC analysis of cooperative diversity with fixed-gain relays in Nakagami-m fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2008, 7(6): 2069-2074.
- [6] Y Tokgoz, B D Rao. Performance analysis of maximum ratio transmission based multi-cellular MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2006, 5(1): 83-89.
- [7] K S Ahn. Performance analysis of MIMO-MRC system in the presence of multiple interferers and noise over rayleigh fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2009, 8(7): 3727-3735.

(下转第 2250 页)

## 作者简介



邹应全 男,1976 年出生于江苏兴化,东南大学信息科学与工程学院博士生,主要研究方向:无线通信信号处理、多用户 MIMO 通信和多小区的协作通信.

E-mail: zouyingquan@nuist.edu.cn



赵睿 男,1980 年出生于江苏扬州,博士,华侨大学信息科学与工程学院,讲师,主要研究方向为无线通信信号处理、多用户 MIMO 通信和基于中继的协作通信.

E-mail: rzhao\_seu@gmail.com.



杨绿溪 男,1964 年出生于安徽桐城,博士,东南大学信息科学与工程学院,教授,博士生导师,主要研究方向:下一代移动通信中的信号处理.

E-mail: lxyang@seu.edu.cn

on Computational Intelligence and Design[C]. IEEE, 2008. 318 – 321.

[13] Nikorn Pokudom. Determine of appropriate neural networks

structure using ant colony system[A]. ICROS-SICE International Joint Conference 2009 August 18 – 21[C]. Fukuoka International Congress Center, Japan, 2009. 4523 – 4525.

### 作者简介



**李丹丹** 女, 1982 年出生, 现为北京交通大学信息管理专业博士研究生, 研究方向为认知网络的 QoS 技术.

E-mail: lidandanhdj@163.com



**王传臣** 男, 1965 年出生, 现为北京交通大学信息管理专业博士研究生, 研究方向为互联网中的流量预测、流媒体业务的 QoS 技术.



**张润彤** 男, 1963 年出生, 博士, 教授、博士生导师, 目前研究方向包括下一代互联网的流量工程、移动通讯技术与应用.

E-mail: rtzhang@bjtu.edu.cn



**肖东坡** 男, 1969 年出生, 现为北京交通大学信息管理专业博士研究生, 研究方向为下一代互联网的智能技术应用.

(上接第 2239 页)

[8] X Zhang, Z Lv, W Wang. Performance analysis of multiuser diversity in MIMO systems with antenna selection[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2009, 7(1): 15 – 21.

[9] M O Hasna, M S Alouini. Harmonic mean and end-to-end performance of transmission systems with relays[J]. IEEE Transactions on Communication, 2004, 52(1): 130 – 135.

[10] 赵睿, 李春国, 王海荣, 杨绿溪. “Nakagami- $m$  衰落信道下固定增益中继系统性能分析[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 162 – 167.

R Zhao, C G Li, H R Wang, L X Yang. Performance Analysis of Fixed Gain Relaying Systems in Nakagami- $m$  Fading Channels[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 162 – 167. (in Chinese)

[11] K S Ahn. Performance analysis of MIMO-MRC systems with

channel estimation error in the presence of cochannel interferences[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2008, 15: 445 – 448.

[12] I S Gradshteyn, I M Ryzhik. Table of Integrals, Series, and Products, 6th ed[M]. San Diego, CA: Academic, 2000.

[13] M K Simon, M S Alouini. Digital Communication Over Fading Channels[M]. New York: Wiley, 2000.

[14] A Papoulis. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, 3rd ed[M]. New York: McGraw-Hill, 1991.

[15] M R McKay, A Grant, I B Collings. Performance analysis of MIMO-MRC in double-correlated Rayleigh environments[J]. IEEE Transactions on Communication, 2007, 55(5): 497 – 507.