

## 基于过时信道信息的多用户中继网络性能分析

郭卫栋<sup>\*①②</sup> 刘 璐<sup>①②</sup> 陈 赫<sup>①</sup> 刘玉玺<sup>①</sup> 张国伟<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(山东大学信息科学与工程学院 济南 250100)

<sup>②</sup>(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室 西安 710071)

**摘 要:** 该文对基于非实时信道状态信息(Channel State Information, CSI)的多用户放大转发(Amplify-and-Forward, AF)协作通信系统的性能进行分析。系统采用一点对多点的通信系统模型,中继节点根据过时的CSI选择用户。通过推导得出中断概率、信道容量和符号错误概率(Symbol Error Rate, SER)的近似表达式。理论分析适用于链路同分布或者非同分布。仿真结果验证理论的正确性,并说明了各种参数对系统性能的影响。同时指出,增加用户数并不能提高系统性能,性能的提高可以通过改变中继的位置来实现。

**关键词:** 无线通信;多用户中继网络;过时信道信息;放大转发

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)11-2564-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00389

## Performances Analysis of Multiuser Relay Networks Based on Outdated Channel State Information

Guo Wei-dong<sup>①②</sup> Liu Ju<sup>①②</sup> Chen He<sup>①</sup> Liu Yu-xi<sup>①</sup> Zhang Guo-wei<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

<sup>②</sup>(The State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The performances analysis of a multiuser Amplify-and-Forward (AF) cooperative communication networks is presented based on the outdated Channel State Information (CSI). The system architecture is point-to-multipoint and the user selection is based on outdated CSI. Asymptotical expressions of outage probability, channel capacity and Symbol Error Rate (SER) are derived. Analysis is applicable to Independent Identically Distributed (IID) or Independent None-identically Distributed (IND) fading channels. Finally, simulations are carried out to verify the correctness of theoretical analysis and illustrate the effort of parameters on the performance. Results show that performances dose not improve with the increase of user number and relocation of the relay node can be regarded as one way of performance enhancement.

**Key words:** Wireless communication; Multiuser relay networks; Outdated Channel State Information (CSI); Amplify-and-Forward (AF)

### 1 引言

协作通信技术近年来得到快速发展,其基本思想是无线网络中的各单天线用户彼此为对方转发信息以此获得空域分集。这种传输方式不仅仅是传统意义下的基站和移动用户间的直接通信,它融合了分集方案与中继传输的技术优势,在传统通信网络中实现了多天线与多跳传输的性能增益<sup>[1,2]</sup>。传统的点对点协作通信系统模型已经被广泛研究。但只有

很少的工作是对一点对多点通信系统模型的研究。比如在蜂窝网络中,基站可以选择一个信道状态最好的移动用户进行数据传输,这种机会用户选择可以最大化系统的性能。参考文献[3]就将协作多跳传输应用到多用户下行链路中。一种典型的多用户模型包括一个信源(基站)通过一个或者多个中继与多个距离较远的信宿(用户)进行通信。文献[4]虽然也考察了这种模型,但只分析了所有用户链路是独立同分布的情况,这是不切合实际的,并且在该文献中假设中继知道所有实时的下行链路的信道状态信息(Channel State Information, CSI),而在实际通信环境中,由于信道的变化或者反馈的延时,进行用户选择时使用的是非实时的CSI,即选择用户时刻所使用的CSI与选择完成后进行数据传输时的CSI

2011-04-20 收到, 2011-08-24 改回

国家自然科学基金(60872024), 高等学校科技创新工程重大项目培育资金(708059), 山东大学自主创新基金(2010JC007), ISN 国家重点实验室开放基金(ISN12-10)和移动通信国家重点实验室开放基金(2010D10)资助课题

\*通信作者: 郭卫栋 gwd2001@163.com

是不同的。在文献[5]中，作者根据非实时的部分信道状态信息选择了中继节点，并推导出系统中断概率和BER的表达式，但此文献中各链路仍然是独立同分布的，并且根据作者的推导方法，无法对信道容量进行分析。

本文针对以上各参考文献的不足，对基于非实时CSI的多用户放大转发(Amplify-and-Forward, AF)协作通信系统的性能进行分析，得出中断概率、信道容量和符号错误概率(Symbol Error Rate, SER)的近似表达式。理论分析适用于链路同分布或者非同分布。第2节给出了系统模型，第3节给出了推导出系统性能的表达式，第4节进行计算机仿真，第5节是本文结论。

## 2 系统模型

如图1所示，本文考虑一点对多点协作通信系统。模型含有一个信源(基站) $S$ 、多个信宿(用户) $D_i (i=1,2,\dots,M)$ 及一个中继 $R$ 。中继节点使用AF协议。 $S$ 与 $D_i$ 之间没有直达链路。 $S-R$ 以及 $R-D_i$ 之间的信道衰落系数分别表示为 $h_{SR}$ 和 $h_{RD_i}$ 。所有的链路都假设是独立的平坦慢衰落信道并且服从瑞利分布，加性高斯白噪声存在于各个信道之中且均值为0方差为 $N_0$ 。根据参考文献[1]，每个信宿端的接收信噪比可以表示为

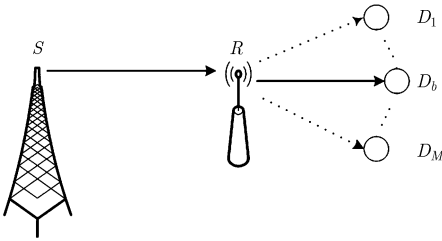


图1 一点对多点通信系统模型

$$\gamma_{SD_i} = \frac{\gamma_{SR}\gamma_{RD_i}}{\gamma_{SR} + \gamma_{RD_i} + 1} \quad (1)$$

其中 $\gamma_{SR} = |h_{SR}|^2 P_S / N_0$ 为 $S-R$ 链路的信噪比， $P_S$ 是信源的发射能量。 $\gamma_{RD_i} = |h_{RD_i}|^2 P_R / N_0$ 为 $R-D_i$ 链路的信噪比， $P_R$ 是中继的发射能量。由瑞利分布特性可知， $\gamma_{SR}$ 和 $\gamma_{RD_i}$ 服从参数指数分布。为了方便计算，可将式(1)进行适当近似<sup>[6]</sup>：

$$\gamma_{SD_i} = \frac{\gamma_{SR}\gamma_{RD_i}}{\gamma_{SR} + \gamma_{RD_i} + 1} \leq \gamma_i = \min(\gamma_{SR}, \gamma_{RD_i}) \quad (2)$$

这个上界在后面的仿真部分被证明是十分逼近的。在参考文献[6]中还提到一个十分逼近的下界： $\gamma_{SD_i} \geq \frac{\min(\gamma_{SR}, \gamma_{RD_i})}{2}$ ，这个下界和上界的区别只有一个

系数，所以关于下界的分析和上界类似，在本文中不做考虑。

在本方案中， $S$ 首先估计所有 $R-D_i$ 信道的CSI，并根据非实时的CSI从中找出性能最佳的中继 $D_b$ 。用户选择结束后进行数据传输。假设系统采用时分复用，则通信过程分为两个时隙。在第1个时隙中， $S$ 发射信号序列到中继节点。在第2个时隙，中继节点将放大后的信号转发到 $D_b$ 。定义所有用户组成的集合为 $\Omega$ ，即 $\Omega = \{D_1, D_2, \dots, D_M\}$ ，则 $D_b = \max_{i: D_i \in \Omega} \{\tilde{\gamma}_{RD_i}\}$ ， $\tilde{\gamma}_{RD_i}$ 为进行用户选择时刻的瞬时信噪比。 $\tilde{\gamma}_{RD_i}$ 与数据传输时刻的信噪比 $\gamma_{RD_i}$ 是不同的，可以用相关系数 $\rho_i (0 \leq \rho_i < 1)$ 来描述他们之间的联系，根据参考文献[7]，他们的联合概率密度函数(Probability Density Function, PDF)为

$$f_{\gamma_{RD_i}, \tilde{\gamma}_{RD_i}}(x, y) = \frac{1}{(1 - \rho_i) \bar{\gamma}_{RD_i}^2} \exp\left(-\frac{x+y}{(1 - \rho_i) \bar{\gamma}_{RD_i}}\right) \cdot I_0\left(\frac{2\sqrt{\rho_i xy}}{(1 - \rho_i) \bar{\gamma}_{RD_i}}\right) \quad (3)$$

其中 $\bar{\gamma}_{RD_i} = E(|h_{RD_i}|^2) P_R / N_0$ 为 $\gamma_{RD_i}$  ( $\tilde{\gamma}_{RD_i}$ )的均值， $I_0(\cdot)$ 为第1类零阶修正贝塞尔函数<sup>[8]</sup>。定义事件 $U_i$ 表示 $D_i$ 为第2时隙所选用用户。对于每一个 $D_i \in \Omega$ ，我们定义集合 $A_i = \{\tilde{\gamma}_{RD_j} : D_j \in \Omega - \{D_i\}\}$ ，利用这个集合，事件 $U_i$ 可以等价为

$$U_i \Leftrightarrow \left\{ \tilde{\gamma}_{RD_i} \geq \max_{j: \tilde{\gamma}_{RD_j} \in A_i} \tilde{\gamma}_{RD_j} \right\} \quad (4)$$

若令 $\tilde{\gamma}_{\max} = \max_{j: \tilde{\gamma}_{RD_j} \in A_i} \tilde{\gamma}_{RD_j}$ ，则 $\tilde{\gamma}_{\max}$ 的PDF可以表示为

$$f_{\tilde{\gamma}_{\max}}(\tilde{\gamma}) = \frac{d}{d\tilde{\gamma}} \prod_{j: \tilde{\gamma}_{RD_j} \in A_i} \left( 1 - \exp\left(-\frac{\tilde{\gamma}}{\bar{\gamma}_{RD_j}}\right) \right) \quad (5)$$

根据参考文献[9]，令 $A_{p,n}$ 表示包含 $n$ 个元素的 $A_i$ 的子集中的第 $p$ 个

$$n = 1, 2, \dots, N-1, p = 1, 2, \dots, \binom{N-1}{n}$$

$A_{p,n}$ 中的元素可以表示为 $\eta_{n,p,q}$  ( $q = 1, \dots, n$ )。根据 $\eta_{n,p,q}$ 和 $\bar{\gamma}_{RD_j}$ 的关系，我们可以得

$$f_{\tilde{\gamma}_{\max}}(\tilde{\gamma}) = \sum_{n=1}^{N-1} (-1)^{n-1} \sum_{p=1}^{\binom{N-1}{n}} (\lambda_{n,p} \exp(-\lambda_{n,p} \tilde{\gamma})) = \sum_n \sum_p (\lambda_{n,p} \exp(-\lambda_{n,p} \tilde{\gamma})) \quad (6)$$

其中 $\lambda_{n,p} = \sum_{q=1}^n \frac{1}{\eta_{n,p,q}}$ 。利用式(4)和式(6)，事件 $U_i$ 的概率为

$$\begin{aligned} \Pr(U_i) &= \int_0^\infty f_{\tilde{\gamma}_{\max}}(x) \int_x^\infty f_{\tilde{\gamma}_{RD_i}}(y) dy dx \\ &= \sum_n \sum_p \left( \lambda_{n,p} \bar{\gamma}_{RD_i} / (1 + \lambda_{n,p} \bar{\gamma}_{RD_i}) \right) = A_i \quad (7) \end{aligned}$$

在式(7)的基础上, 根据参考文献[8], 我们可以计算条件概率  $f_{\gamma_{RD_i}}(\gamma|U_i)$ :

$$\begin{aligned} f_{\gamma_{RD_i}}(\gamma|U_i) &= \frac{\partial \Pr(\gamma_{RD_i} \leq \gamma, \tilde{\gamma}_{RD_i} \geq \tilde{\gamma}_{\max})}{\Pr(U_i) \partial \gamma} \\ &= \frac{\partial \left( \int_0^\gamma \int_0^\infty f_{\gamma_{RD_i}, \tilde{\gamma}_{RD_i}}(x, y) \int_0^y f_{\tilde{\gamma}_{\max}}(z) dz dy dx \right)}{\Pr(U_i) \partial \gamma} \\ &= \frac{1}{A_i} \left( \frac{\exp(-\gamma / \bar{\gamma}_{RD_i})}{\bar{\gamma}_{RD_i}} - \sum_n \sum_p \frac{\exp(-\gamma / \mu_i)}{\mu_i (1 + \lambda_{n,p} \bar{\gamma}_{RD_i})} \right) \quad (8) \end{aligned}$$

其中  $\mu_i = \frac{(1 - \rho_i) \bar{\gamma}_{RD_i}^2 \lambda_{n,p} + \bar{\gamma}_{RD_i}}{1 + \lambda_{n,p} \bar{\gamma}_{RD_i}}$ 。有了以上的基础,

我们就可以在下面各部分对系统性能进行分析。

在上述系统中,  $S$  首先收集信道信息, 然后  $S$  再进行用户选择, 最后数据分两个时隙进行传输。整个过程是集中式的。如果第 1 阶段传输结束之后各用户和中继之间进行信息交互, 并由中继估计信道并选出用户, 这样无疑增加了中继节点的设备复杂度, 而  $S$  一般是基站, 可以很好的进行信道估计和用户选择, 这样中继节点只是简单的放大转发, 设备相对简单, 所以在本文中, 由  $S$  进行信道估计并选出最佳用户。但由于中继-用户链路距离  $S$  一般较远, 并且获取信道信息的时刻与实际传输时刻相距较远, 传输可能存在错误或者延时, 所以在第 2 跳链路采用非实时信道信息模型。

### 3 系统性能分析

#### 3.1 中断概率

中断概率是系统信道容量小于系统传输速率的概率, 是系统性能的重要考核指标。通过简单推导, 可以转化为所选用用户端 SNR 小于某一阈值  $T$  的概率。对于本文的模型来说, 中断概率可以表示为

$$P_{\text{out}} = \sum_{i=1}^M \Pr(U_i) \Pr[\gamma_{SD_i} < T|U_i] \quad (9)$$

应用式(2)的下界, 则式(9)可以变为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &\geq \sum_{i=1}^M \Pr(U_i) \Pr[\gamma_i < T|U_i] \\ &= \sum_{i=1}^M \Pr(U_i) \left\{ 1 - [1 - F_{\gamma_{SR}}(T)] [1 - F_{\gamma_{RD_i}}(T|U_i)] \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

由于  $\gamma_{SR}$  服从参数指数分布, 则  $F_{\gamma_{SR}}(T) = 1 - \exp(-T/\bar{\gamma}_{SR})$ 。其中  $\bar{\gamma}_{SR} = E(|h_{SR}|^2) P_S / N_0$  为  $\gamma_{SR}$  的均值。对式(8)进行积分, 可以得出  $F_{\gamma_{RD_i}}(T|U_i)$ , 将  $F_{\gamma_{SR}}(T)$  和  $F_{\gamma_{RD_i}}(T|U_i)$  代入式(10), 则  $T_1$  表示为

$$\begin{aligned} T_1 &= 1 - \exp\left(\frac{-T}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) \left\{ 1 - \frac{1}{A_i} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-T}{\bar{\gamma}_{RD_i}}\right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sum_n \sum_p \left( \frac{1 - \exp(-T/\mu_i)}{(1 + \lambda_{n,p} \bar{\gamma}_{RD_i})} \right) \right] \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

将式(11)和式(7)代入式(10), 就可以得到  $P_{\text{out}}$  近似表达式。当信噪比足够大时,  $1/\bar{\gamma}_{SR}$  或者  $1/\bar{\gamma}_{RD_i} \rightarrow 0$ , 利用公式  $e(x) \approx 1 + x$  ( $x \rightarrow 0$ ), 式(11)在大信噪比时可以近似表达为

$$T_1 \approx \frac{T}{\bar{\gamma}_{SR}} - \frac{T}{A_i} \frac{1}{\bar{\gamma}_{RD_i}} + \sum_n \sum_p \frac{T}{A_i (1 + \lambda_{n,p} \bar{\gamma}_{RD_i})} \frac{1}{\mu_i} \quad (12)$$

根据式(12)以及  $A_i$  和  $\mu_i$  的定义, 可以很容易看出, 系统分集阶数为 1, 并且无论  $\rho_i$  取何值, 分集阶数始终为 1。为了求得系统的编码增益, 我们假设信源和所有中继都采用相同的发射能量, 所有的信道衰落系数都相等, 则  $\bar{\gamma}_{SR} = \bar{\gamma}_{RD_i} = \bar{\gamma}$ ,  $A_i = A$ 。当信噪比足够大时, 将式(12)代入式(10), 可以得出在大信噪比下中断概率的近似表达式如下:

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &\geq \sum_{i=1}^M \Pr(U_i) \Pr[\gamma_i < T|U_i] \\ &\approx \sum_{i=1}^M AT \left[ 1 - \frac{1}{A} + \frac{1}{A} \sum_n \frac{\binom{N-1}{n}}{(1 - \rho_i) n + 1} \right] \frac{1}{\bar{\gamma}} \quad (13) \end{aligned}$$

从式(13)可以看出, 此时系统的编码增益为

$$\sum_{i=1}^M AT \left[ 1 - \frac{1}{A} + \frac{1}{A} \sum_n \frac{\binom{N-1}{n}}{(1 - \rho_i) n + 1} \right]$$

#### 3.2 平均信道容量

本系统的平均信道容量可以表示为

$$\bar{C} = \sum_{i=1}^M \left\{ \Pr(U_i) E_{\gamma_{SD_i}} \left[ \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_{SD_i}) \middle| U_i \right] \right\} \quad (14)$$

其中公式中的系数 1/2 是因为信号传输需要两个时隙。将式(2)代入

$$\begin{aligned} \bar{C} &\leq \sum_{i=1}^M \left\{ \Pr(U_i) E_{\gamma_{SD_i}} \left[ \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_i) \middle| U_i \right] \right\} \\ &= \sum_{i=1}^M \left\{ \Pr(U_i) \int_0^\infty \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma) f_{\gamma_i}(\gamma|U_i) d\gamma \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

其中  $f_{\gamma_i}(\gamma|U_i)$  可以通过对  $T_1$  求导得到

$$f_{\gamma_i}(\gamma|U_i) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}} \left( 1 + \frac{1}{A_i} \right) \exp\left(\frac{-\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) \frac{(\bar{\gamma}_{SR} + \bar{\gamma}_{RD_i}) \exp\left(-\frac{\bar{\gamma}_{SR} + \bar{\gamma}_{RD_i}}{\bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD_i}} \gamma\right)}{A_i \bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD_i}} - \sum_n \sum_p \left[ \frac{\exp\left(\frac{-\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}}\right)}{\bar{\gamma}_{SR} A_i (1 + \lambda_{n,p} \bar{\gamma}_{RD_i})} \frac{(\bar{\gamma}_{SR} + \mu) \exp\left(-\frac{\bar{\gamma}_{SR} + \mu_i}{\bar{\gamma}_{SR} \mu_i} \gamma\right)}{A_i \bar{\gamma}_{SR} \mu_i (1 + \lambda_{n,p} \bar{\gamma}_{RD_i})} \right] \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)，并利用参考文献[8]中式(4.337.1)，可以得到  $T_2$  如下：

$$T_2 = \frac{1}{2 \ln 2} E_1 \left( \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}} \right) \left( 1 + \frac{1}{A_i} \right) \exp\left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) \frac{E_1 \left( \frac{\bar{\gamma}_{SR} + \bar{\gamma}_{RD_i}}{\bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD_i}} \right) \exp\left(\frac{\bar{\gamma}_{SR} + \bar{\gamma}_{RD_i}}{\bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD_i}}\right)}{2 \ln 2 A_i} - \sum_n \sum_p \left[ E_1 \left( \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}} \right) \exp\left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) - E_1 \left( \frac{\bar{\gamma}_{SR} + \mu_i}{\bar{\gamma}_{SR} \mu_i} \right) \cdot \exp\left(\frac{\bar{\gamma}_{SR} + \mu_i}{\bar{\gamma}_{SR} \mu_i}\right) \right] \left/ 2 \ln 2 A_i (1 + \lambda_{n,p} \bar{\gamma}_{RD_i}) \right. \quad (17)$$

其中  $E_1(x) = \int_x^\infty t^{-1} \exp(-t) dt$  为指数积分函数<sup>[10]</sup>。

将  $T_2$  代入式(15)，并利用式(7)，就可以得到信道容量的表达式。

### 3.3 平均 SER

类似上一节的分析，可以得到平均 SER  $P_e$  的表达式为

$$P_e \geq \sum_{i=1}^M \Pr(U_i) P_e(\gamma_i | U_i) \quad (18)$$

$P_e(\gamma_i | U_i)$  表示当  $U_i$  发生时的平均 SER。在平坦衰落信道下，平均 SER 可以写成

$$P_e(\gamma_i | U_i) = \int_0^\infty a \times \operatorname{erfc}(\sqrt{b\gamma}) f_{\gamma_i}(\gamma | U_i) d\gamma \quad (19)$$

式中  $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2) dt$ ，参数  $(a, b)$  是由调制方式决定的。将  $f_{\gamma_i}(\gamma | U_i)$  代入式(19)就可以得出  $P_e(\gamma_i | U_i)$  如下：

$$P_e(\gamma_i | U_i) = a \left( 1 + \frac{1}{A_i} \right) \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{SR} b}{1 + \bar{\gamma}_{SR} b}} \right) - \frac{a}{A_i} \left( 1 - \sqrt{\frac{b}{b + \left( \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}} + \frac{1}{\bar{\gamma}_{RD_i}} \right)}} \right) - a \sum_n \sum_p \frac{\sqrt{\frac{b}{b + \left( \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}} + \frac{1}{\mu_i} \right)}} - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{SR} b}{1 + \bar{\gamma}_{SR} b}}}{A_i (1 + \lambda_{n,p} \bar{\gamma}_{RD_i})} \quad (20)$$

将式(20)和式(7)代入式(18)，就可以得到  $P_e$  的表达式。

## 4 仿真结果和分析

在这一节，我们对提出的模型进行 MATLAB 仿真，以验证理论分析的正确性，并说明参数对系统性能的影响。信源和所有中继都采用相同的发射能量  $(P)$ 。为了研究信道衰落对系统性能的影响，假设  $E(|h_{SR}|^2) = d_{SR}^{-\alpha}$ ， $E(|h_{RD_i}|^2) = d_{RD_i}^{-\alpha}$ ， $d_{ij}$  表示  $i$  和  $j$  之间的距离， $\alpha \in [2, 5]$  表示信道衰落指数。相关的高斯变量利用 Cholesky 分解法<sup>[11]</sup>产生并假设所有的相关系数相等 ( $\rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_M = \rho$ )。

图 2 比较了在不同的用户数量下系统中断概率的性能差异。参数设置如下： $d_{SR} = 0.7$ ， $d_{RD_i}$  服从  $[0, 1]$  的均匀分布， $T = 2$ 。从图中可以看出，我们采用的信噪比近似方法非常接近实际值，信噪比越高，理论值和仿真值越逼近，并且多用户系统性能 ( $M \geq 2$ ) 比单用户时 ( $M = 1$ ) 要有所提高。由于所选节点并不是在信号接收时刻性能最优的节点，并且用户端接收瞬时信噪比是由两跳瞬时信噪比共同决定的，因此单独靠增加用户数量来提升系统性能是不可取的，两个用户已经足够，再增加用户数量只是增加系统的复杂度，并不能进一步提升系统性能。

图 3 给出了系统参数变化时信道容量性能曲线，距离参数设置与图 2 相同。因图 2 中理论值与实际仿真值吻合良好，在本图中省略仿真值。当  $\rho = 1$  时，表明两个时刻的 CSI 是完全相同的，此时所选用户就是在接收信号时刻信道状态最好的用户。当  $\rho = 0$  时，表示两个时刻的 CSI 是完全不相关的，我们完全不知道所选用户在接收信号时刻的信道状态。从图中可以看出，信道容量随着  $\rho$  或  $\alpha$  的增加而增大。这是因为当  $\alpha$  增大时， $\bar{\gamma}_{SR}$  和  $\bar{\gamma}_{RD_i}$  变大，而系统性能正比于  $\bar{\gamma}_{SR}$  或  $\bar{\gamma}_{RD_i}$ 。当  $\rho$  增大时， $S$  可以更准确地利用 CSI 选择用户，所以系统性能也会变好。

通过将距离参数做了归一化处理，图 4 给出了 SER 性能随着距离参数变化的曲线。仿真采用

BPSK 调制方式( $a = 0.5, b = 1$ )。假设所有用户到中继的距离相等, 并且基站、中继和用户在一条直线上。如果  $S$  与  $R$  之间的距离为  $d$ , 则  $R$  与  $D_i (i = 1, 2, \dots, M)$  之间的距离为  $1-d$ 。从图中可以看出, 当中继节点在  $S$  与  $D_i$  之间移动时, 会有一个位置出现性能的极值点, 如果将中继节点放在这个位置, 就可以更好地抵抗信道衰落。还可以看出, 此极值点的位置随着  $\alpha$  的增大往右移动, 随着  $\rho$  的增大往左移动。这是因为, 由式(2)可知, 用户端的信噪比近似表示为两跳链路信噪比的最小值, 当  $\rho$  增大时, 选择用户更加准确, 致使第 2 跳的信噪比增大, 中继应该往左移动, 使得第 1 条链路的距离缩短, 信

噪比增大, 这样才可以使信噪比的最小值增大。当  $\alpha$  增大时, 两跳链路的平均信噪比都在增大, 但由于所选用用户不一定是瞬时信噪比最好的, 所以第 2 跳平均信噪比增大的幅度较小, 这时中继节点应该往右移动, 使得所有中继-用户链路平均信噪比都增大, 这样才可以使两跳链路信噪比的最小值增大。

## 5 结论

本文研究了基于过时信道信息的多用户 AF 协作通信系统的性能, 经过理论推导得出性能的近似表达式。仿真结果验证了理论的正确性并阐述参数对性能的影响。

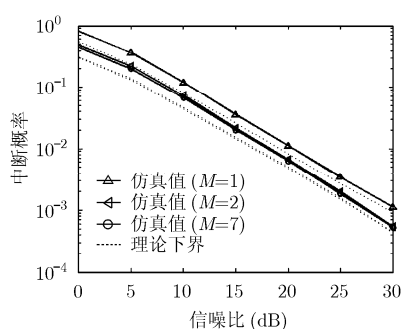


图 2 中断概率随用户数量的变化曲线 ( $\rho = 0.9, \alpha = 4$ )

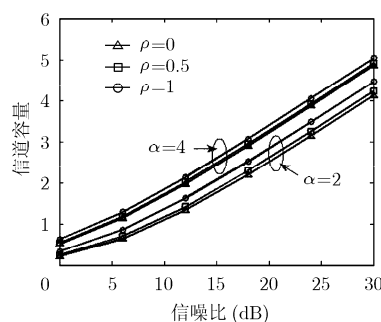


图 3 不同参数设置下的信道容量

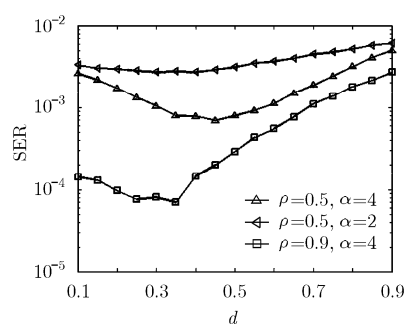


图 4 SER 随不同距离变化曲线 (发射信噪比=15 dB,  $M = 3$ )

## 参考文献

- [1] Ikki S S and Ahmed M H. On the performance of cooperative diversity networks with the  $N$ th best-relay selection scheme[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(11): 3062-3069.
- [2] Shah V, Mehta N B, and Yim R. The relay selection and transmission trade-off in cooperative communication systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(8): 2505-2515.
- [3] Erwu L, Dongyao W, Jimin L, et al. Performance evaluation of bandwidth allocation in 802.16j mobile multi-hop relay networks[C]. *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'07)*, Dublin, Ireland, Apr. 2007: 939-943.
- [4] Yang N, Elkashlan M, and Yuan J. Impact of opportunistic scheduling on cooperative dual-hop relay networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(3): 689-694.
- [5] Suraweera H A, Soysa M, Tellambura C, et al. Performance analysis of partial relay selection with feedback delay[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(6): 531-534.
- [6] Anghel P A and Kaveh M. Exact symbol error probability of a cooperative network in a Rayleigh-fading environment[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(5): 1416-1421.

- [7] Vicario J L, Bel A, Lopez-Salcedo J A, et al. Opportunistic relay selection with outdated CSI: outage probability and diversity analysis[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(6): 2872-2876.
- [8] Gradshteyn I S and Ryzhik I M. Table of integrals, series and products[M]. San Diego, CA: Academic Press, 1994, 6.
- [9] Michalopoulos D and Karagiannidis G. Performance analysis of single relay adaptive in Rayleigh fading[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(10): 3718-3724.
- [10] Abramowitz M and Stegun I A. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables[M]. New York: Dover, 1970.
- [11] Haugh M. The Monte Carlo framework, examples from finance and generating correlated random variables[R]. IEOR E4703: Monte Carlo Simulation Course Notes, 2004.

郭卫栋: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为协作通信及虚拟 MIMO 系统.

刘 璐: 男, 1965 年生, 教授, 研究方向为无线通信系统及多媒体信号处理.

陈 赫: 男, 1986 年生, 硕士生, 研究方向为协作通信及虚拟 MIMO 系统.