

# 中继网络中减少反馈的多用户调度算法

李 征 唐 伦 陈前斌

(重庆邮电大学移动通信重点实验室, 重庆 400065)

**摘 要:** 针对多用户中继网络中上行反馈负荷过大的问题, 本文提出了一种减少信道状态信息反馈的半分布式调度算法(RRFD)。基于反馈中断概率及总用户数, 基站与中继分别设置信道状态反馈门限。每一调度周期内, 通过与门限的比较, 用户决定是否反馈相应链路信息, 基站根据用户反馈情况决定系统采用何种传输模式。文中还对 AF 协议下采用该算法时的反馈用户数及平均可达速率等性能指标进行了理论推导。仿真结果表明, 系统性能与数学推导相一致, 与此同时, 本文提出的算法可极大程度(90%以上)的减少系统反馈量, 并显著降低了系统反馈中断概率, 减小了容量损失。

**关键词:** 中继网络; 资源调度; 减少反馈; 信道状态信息

**中图分类号:** TN929.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1003-0530(2011)03-0412-06

## Multuser Scheduling Based on Reduced Feedback Information in Relay Networks

LI Zheng TANG Lun CHEN Qian-bin

(Key Lab of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** This paper proposes a semi-distributed scheduling algorithm to decrease the feedback of Channel State Information. According to the probability of feedback interruption and total number of users, the threshold of channel state information feedback is set up respectively at base station and relay. In every slot, through the comparison with the threshold, users decide whether to feedback the corresponding link information about the signal to noise ratio. The base station, according to the feedback from users, decide which transmission modes will be selected. In addition, this paper gives detailed theoretical derivation on performance index of the proposed algorithm, such as the number of feedback users and the average achievable rates etc. Moreover, under the AF protocol, the final result shows the performance of system by using this scheme is corresponding to mathematical derivation. Furthermore, the proposed algorithm could greatly reduce (over 90%) the quantity of feedback information in the system.

**Key words:** relay network; resource scheduling; reduce feedback; channel state information

### 1 引言

中继技术是未来无线通信网络的研究热点。通过引入中继,可以增加通信覆盖区域<sup>[1]</sup>。无线中继系统中,获取时变的信道状态信息是资源调度的前提。全反馈调度算法需要知道每个用户的信道信息,大量的反馈信息加大了系统开销。因此,上行反馈量也逐渐成为了评估系统性能的重要参数之一。如何在保证用

户性能的同时,减少系统的反馈成为研究的难点<sup>[2]</sup>。为了减小反馈负荷,文献[3]给出了基于门限设置的减少反馈方案,文章着重讨论了几种设置门限的方法以及门限值对系统性能的影响。文献[4]研究了 OFDM 系统中的资源管理和有限反馈理论,门限的设置与每个用户的权值有关,用户的队列和时延决定了权值的大小。文献[5]中,信道增益比阈值大的用户以一定的接入概率进行反馈,此接入概率是根据不同用户的

业务速率调整得到的。文献[6]采用了 Ad-Hoc 网络, AP 以轮询方式依次探测各用户信息, 若被探测用户达到反馈门限则调度该用户, 若达不到则该用户充当中继的地位, 协助 AP 继续探测剩余用户。文献[7]提出了一种多用户选择调度算法(SMUD), 信道条件优于某一门限值的用户反馈其信道状态信息给基站, 基站再从中选取最优用户进行调度。然而该算法中, 当门限值很大时, 出现反馈中断的概率增大, 系统容量降低。

结合上述分析, 本文在文献[7]的基础上加入中继, 提出了一种基于门限限制的减少反馈调度算法(RRFD)。并通过 matlab 仿真验证了该算法的性能。仿真结果表明, 中继可协助调度距离较远或信道状态较差的用户, 减小系统反馈中断概率, 提高系统容量。与此同时, 可显著减少系统上行反馈负荷。

## 2 系统模型

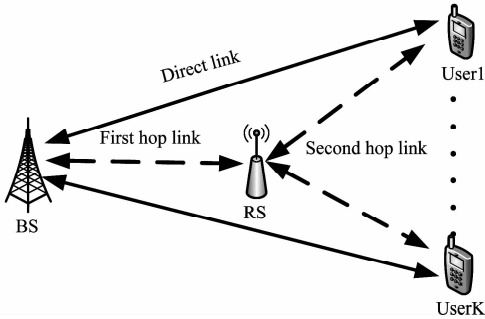


图1 系统结构

如图1所示, 多用户系统由一个基站、一个中继以及  $K$  个用户组成。每个时隙为一个调度周期, 每个周期调度一个用户。中继系统采取 TDD 的双工方式, 一个调度周期分成 2 个等长子时隙, 第一子时隙的资源用于 BS 的发送(BS-RS, BS-MS), 第二子时隙的资源用于 RS 的发送(RS-MS)。BS-RS、BS-MS 及 RS-MS 之间信道都满足锐利衰落模型,  $h_{br}$ 、 $h_{bm_k}$  以及  $h_{rm_k}$  分别表示各信道的衰落系数,  $k=1 \cdots K$ , 均为零均值的复合高斯随机变量, 且独立同分布, 服从  $CN(0, 1)$ , 其包络服从锐利分布。假设各信道相应的复合加性高斯白噪声也独立同分布, 服从:  $CN(0, \sigma^2)$ 。令  $\gamma_{br} = \frac{P_b |h_{br}|^2 \beta_{br}}{\Gamma \sigma^2}$ 、 $\gamma_{bm_k} =$

$\frac{P_b |h_{bm_k}|^2 \beta_{bm_k}}{\Gamma \sigma^2}$ 、 $\gamma_{rm_k} = \frac{P_r |h_{rm_k}|^2 \beta_{rm_k}}{\Gamma \sigma^2}$  表示 BS-RS、BS-MS 及

RS-MS 相应各链路信道的瞬时信噪比。其中  $\beta_{br} = d_{br}^{-\alpha}$ 、 $\beta_{bm_k} = d_{bm_k}^{-\alpha}$ 、 $\beta_{rm_k} = d_{rm_k}^{-\alpha}$  分别指系统各链路的路径损耗,  $d_{br}$ 、 $d_{bm_k}$ 、 $d_{rm_k}$  为各节点间距离,  $\alpha$  为损耗系数。  $\Gamma$  是一个与 BER 相关的信噪比误差常量。设基站和中继的发射功率相同均为  $P$ , 且所有用户到基站以及到中继的距离相等, 则系统各信道平均信噪比分别表示为:  $\bar{\gamma}_{br} = \frac{P \beta_{br} E[|h_{br}|^2]}{\Gamma \sigma^2}$ 、 $\bar{\gamma}_{bm} = \frac{P \beta_{bm} E[|h_{bm}|^2]}{\Gamma \sigma^2}$ 、 $\bar{\gamma}_{rm} = \frac{P \beta_{rm} E[|h_{rm}|^2]}{\Gamma \sigma^2}$ 。锐利衰落信道上的瞬时信噪比服从参数为平均信噪比的指数分布。继而得到链路  $l$  (包括系统中的所有链路) 上的瞬时信噪比  $\gamma_l$  的概率密度函数为:

$$p(\gamma_l) = \frac{1}{\bar{\gamma}_l} e^{-\frac{\gamma_l}{\bar{\gamma}_l}} \quad (1)$$

本文采用 AF 协议, 且用户要么直接与基站通信要么通过中继以两跳方式收发数据。

直传用户  $k$  接收到的信号为:

$$y_{dm_k} = h_{bm_k} \sqrt{\beta_{bm}} x + n_{bm_k} \quad (2)$$

中继用户  $k$  接收到的信号为:

$$y_{rm_k} = h_{rm_k} \sqrt{\beta_{rm}} \rho (h_{br} \sqrt{P} x + n_{br}) + n_{rm_k} \quad (3)$$

其中,  $k=1 \cdots K$ ,  $x$  为基站的发送信号,  $\rho = \sqrt{\frac{P_r}{|h_{br}|^2 P_b + N_0}}$  为放大系数。

## 3 算法及门限设置

### 3.1 算法描述

设每个时隙为一个调度周期, 每个周期只调度一个用户。RRFD 算法在基站与中继处分别设立信道信息反馈门限。系统首先采用直传模式, 在直传链路上只有当信道状态优于基站门限时, 相应用户才可反馈信道信息给基站, 基站从反馈用户中选择信道状态最优的一个传送其数据。若所有用户均未达到基站门限, 系统转入中继模式。中继将以同样方法重新选择最优用户进行调度。以一个调度周期为例, 具体表述如下:

#### 步骤1 基站选择用户

1) 基站设置反馈门限  $\gamma_{thB}$ , 并广播一个测试信号给所有用户。

2) 各个用户根据其所接收到的测试信号, 估计它对应直传链路的瞬时信噪比  $\gamma_{bm_k}$ 。若  $\gamma_{bm_k} \geq \gamma_{thB}$ , 用户  $k$  反馈它的状态信息  $\gamma_{bm_k}$  给基站。

3) 设反馈信息给基站的用户数是  $\bar{K}_B$ , 当  $\bar{K}_B \geq 1$

时,BS从 $\bar{K}_B$ 个用户所反馈的信息中选取 $\gamma_{bm_k\max}$ ,并调度其所对应的用户。当 $\bar{K}_B=0$ 时,转而采用加中继模式。

### 步骤2 中继选择用户

1) 中继设置反馈门限 $\gamma_{thR}$ ,并广播测试信号给所有用户。

2) 用户根据中继发送的测试信号估计它们各自的瞬时信噪比 $\gamma_{rm_k}$ 。若 $\gamma_{rm_k} \geq \gamma_{thR}$ ,用户 $k$ 反馈其状态信息 $\gamma_{rm_k}$ 给中继。

3) 设反馈信息给中继的用户数是 $\bar{K}_R$ ,当 $\bar{K}_R \geq 1$ 时,RS从 $\bar{K}_R$ 个用户中选取 $\gamma_{rm_k\max}$ 所对应的用户,在两个子时隙里以两跳的方式传送该用户数据。当 $\bar{K}_R=0$ 时,表示该调度周期内出现中断事件,即没有用户被调度。

### 3.2 门限设置

由于只反馈大于某个阈值的用户所对应的信道信息,就有可能出现某一调度周期内没有用户反馈的情况,在此,定义反馈中断概率来表示这一情况发生的概率。下面将讨论如何基于反馈中断概率设置门限<sup>[3]</sup>。

首先推导反馈中断概率的公式。以直传模式为例,由于瞬时信噪比服从指数分布,对某一用户,由(1)式求得其信噪比小于 $x$ 的概率为:

$$P(\gamma_{bm_k} < x) = \int_0^x p(\gamma_{bm_k}) d\gamma_{bm_k} = 1 - e^{-\frac{x}{\gamma_{bm}}} \quad (4)$$

系统各信道衰落独立,则全部 $K$ 个用户对直传链路上的信噪比均小于 $x$ 的概率为:

$$\begin{aligned} P_K(x) &= P_K(\gamma_{bm_1}, \dots, \gamma_{bm_k} < x) = \prod_{k=1}^K P(\gamma_{bm_k} < x) \\ &= [P(\gamma_{bm_k} < x)]^K = \left(1 - e^{-\frac{x}{\gamma_{bm}}}\right)^K \end{aligned} \quad (5)$$

若将 $x$ 取值设为基站处门限 $\gamma_{thB}$ , (5)式便可用来表示基站反馈中断概率:

$$P_{outB} = P_K(\gamma_{thB}) = \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{thB}}{\gamma_{bm}}}\right)^K \quad (6)$$

反解(6)式可求得基站的反馈门限为:

$$\gamma_{thB} = -\bar{\gamma}_{bm} \ln \left(1 - P_{outB}^{\frac{1}{K}}\right) \quad (7)$$

仿真时,可根据系统需要设定基站反馈中断概率 $P_{outB}$ ,并令中继与基站的反馈门限值相同,即 $\gamma_{thR} = \gamma_{thB} = \gamma_{th}$ 。从而得到中继处的反馈中断概率为 $P_{outR} =$

$$\left(1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{rm}}}\right)^K$$

由于中继比基站距离用户更近,路径损耗较小,故RS-MS链路较之BS-MS链路信噪比更大,因而,根据 $P_{outB}$ 求出的门限 $\gamma_{th}$ 相对 $\gamma_{rm_k}$ 来说是一个很小的值, $P_{outR}$ 非常小,使得整个系统出现反馈中断的可能性很小。

## 4 性能分析

### 4.1 平均反馈用户数

本文的目的在于减少反馈量,因此,系统的一项重要性能指标即为平均反馈用户数<sup>[3]</sup>。首先,在不区分直传或中继模式的情况下,对于某一用户来说,其相应链路信噪比大于门限的概率是:

$$P = P(\gamma > \gamma_{th}) = \int_{\gamma_{th}}^{\infty} p(\gamma) d\gamma = e^{-\frac{\gamma_{th}}{\gamma}} \quad (8)$$

那么有 $m$ 个用户反馈信息的概率为:

$$P_m = \binom{K}{m} P^m (1-P)^{K-m} \quad (9)$$

不难得出,每个调度周期内的平均反馈用户数为:

$$\begin{aligned} \bar{K} &= \sum_{m=0}^K P_m \cdot m \\ &= \sum_{m=0}^K \binom{K}{m} \left(e^{-\frac{\gamma_{th}}{\gamma}}\right)^m \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\gamma}}\right)^{K-m} \cdot m \end{aligned} \quad (10)$$

相应的,采用直传和采用中继传输时的平均反馈用户数可分别表示如下:

$$\bar{K}_B = \sum_{m=0}^K \binom{K}{m} \left(e^{-\frac{\gamma_{thB}}{\gamma_{bm}}}\right)^m \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{thB}}{\gamma_{bm}}}\right)^{K-m} \cdot m \quad (11)$$

$$\bar{K}_R = \sum_{m=0}^K \binom{K}{m} \left(e^{-\frac{\gamma_{thR}}{\gamma_{rm}}}\right)^m \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{thR}}{\gamma_{rm}}}\right)^{K-m} \cdot m \quad (12)$$

根据以上分析,在一个调度周期内,系统的平均反馈用户数为:

$$\begin{aligned} \bar{K} &= \binom{K}{0} \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{thB}}{\gamma_{bm}}}\right)^K \binom{K}{0} \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{thR}}{\gamma_{rm}}}\right)^K \cdot 0 + \\ &\sum_{m=1}^K \left[ \binom{K}{m} \left(e^{-\frac{\gamma_{thB}}{\gamma_{bm}}}\right)^m \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{thB}}{\gamma_{bm}}}\right)^{K-m} + \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{thB}}{\gamma_{bm}}}\right)^K \right. \\ &\left. \binom{K}{m} \left(e^{-\frac{\gamma_{thR}}{\gamma_{rm}}}\right)^m \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{thR}}{\gamma_{rm}}}\right)^{K-m} \right] \cdot m \end{aligned} \quad (13)$$

## 4.2 平均可达速率

接下来,以平均可达速率<sup>[8]</sup>作为指标评估系统容量。首先,直传模式下的平均可达速率可表示如下:

$$C_1 = E[\log_2(1 + \gamma_{bm_k\text{-max}})] \quad (14)$$

接下来推导上式的闭合形式表达式。令  $\gamma_{bm_k} = x$ ,

可得  $\gamma_{bm_k\text{-max}} = \max \gamma_{bm_k} (=x)$ <sup>[9]</sup> 的概率密度函数为:

$$\begin{aligned} p_{\gamma_{bm_k\text{-max}}}(x) &= \sum_{k=1}^K \left( p_k(x) \prod_{j=1; j \neq k}^K F_j(x) \right) \\ &= \frac{K}{\bar{\gamma}_{bm}} e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_{bm}}} \left( 1 - e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_{bm}}} \right)^{K-1} \\ &= \frac{K}{\bar{\gamma}_{bm}} \sum_{m=0}^{K-1} (-1)^m \binom{K-1}{m} e^{-\frac{x(m+1)}{\bar{\gamma}_{bm}}} \quad (15) \end{aligned}$$

其中,  $p_k(x)$  为  $\gamma_{bm_k}$  的概率密度函数,由(1)式给出,  $F_j(x)$  为  $\gamma_{bm_k}$  的累积分布函数。根据(1)式的推导已知各用户的  $\gamma_{bm_k}$  概率密度函数相同,故上式中第二个等号成立。又根据 binomial 定理,第三个等号成立。将(15)式代入(14)式得到:

$$\begin{aligned} C_1 &= \int_{\gamma_{th}}^{\infty} \log_2(1+x) p_{\gamma_{bm_k\text{-max}}}(x) dx \\ &= \frac{K}{\ln 2} \sum_{m=0}^{K-1} (-1)^m \binom{K-1}{m} \left[ \frac{e^{-\frac{\gamma_{th}(m+1)}{\bar{\gamma}_{bm}}} \ln(1+\gamma_{th})}{m+1} + \right. \\ &\quad \left. \frac{e^{-\frac{(m+1)}{\bar{\gamma}_{bm}}} E_1\left(\frac{\gamma_{th} \cdot m + \gamma_{th} + m + 1}{\bar{\gamma}_{bm}}\right)}{m+1} \right] \quad (16) \end{aligned}$$

其中,  $E_1(x) = \int_1^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt$  为指数积分函数。式中积分下限为系统门限  $\gamma_{th}$ ,当  $C_1 \neq 0$  时,表示了有用户反馈信息给基站,无需转入中继模式即可完成调度时的系统平均可达速率。当  $C_1 = 0$  时,表示  $\gamma_{bm_k\text{-max}}$  低于  $\gamma_{th}$ ,中继开始工作。

在中继模式下,将(3)式展开可得 BS-RS-MS 信道上的整合信噪比为:

$$SNR_{B-R-M} = \frac{\gamma_{br} \gamma_{rm_k}}{\gamma_{br} + \gamma_{rm_k} + 1} \quad (17)$$

此时的平均可达速率由两跳链路上的最大整合信噪比决定,表示如下:

$$\begin{aligned} C_2 &= E \left[ \frac{1}{2} \log_2(1 + SNR_{B-R-M\text{-max}}) \right] \\ &= E \left[ \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_{br} \gamma_{rm_k\text{-max}}}{\gamma_{br} + \gamma_{rm_k\text{-max}} + 1} \right) \right] \quad (18) \end{aligned}$$

令  $\gamma_{rm_k} = y$ ,利用(1)式套用公式(15)容易得到  $\gamma_{rm_k\text{-max}} = \max \gamma_{rm_k} (=y)$  的概率密度函数为:

$$p_{\gamma_{rm_k\text{-max}}}(y) = \frac{K}{\bar{\gamma}_{rm}} \sum_{m=0}^{K-1} (-1)^m \binom{K-1}{m} e^{-\frac{y(m+1)}{\bar{\gamma}_{rm}}} \quad (19)$$

令  $\gamma_{br} = z$ ,将(19)代入(18),求双重积分可得:

$$\begin{aligned} C_2 &= \int_0^{\infty} \int_{\gamma_{th}}^{\infty} \log_2 \left( 1 + \frac{zy}{z+y+1} \right) p_{\gamma_{br}}(z) \\ &\quad p_{\gamma_{rm_k\text{-max}}}(y) dy dz \\ &= \frac{K}{2 \ln 2 \bar{\gamma}_{br} \bar{\gamma}_{rm}} \sum_{m=0}^{K-1} (-1)^m \binom{K-1}{m} \times \\ &\quad \left\{ \begin{aligned} &\left( \bar{\gamma}_{br} - \frac{\bar{\gamma}_{rm}}{m+1} \right) e^{\frac{1}{\bar{\gamma}_{br}}} E_1 \left( \frac{1}{\bar{\gamma}_{br}} \right) - \bar{\gamma}_{br} e^{\frac{\gamma_{th}+1}{\bar{\gamma}_{br}}} E_1 \left( \frac{\gamma_{th}+1}{\bar{\gamma}_{br}} \right) \\ &\frac{e^{-\frac{(m+1)\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{rm}}} \left( \frac{m+1}{\bar{\gamma}_{rm}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_{br}} \right)}{\bar{\gamma}_{br} e^{-\frac{(m+1)(\gamma_{th}+1)}{\bar{\gamma}_{rm}}} E_1 \left( \frac{(m+1)(\gamma_{th}+1)}{\bar{\gamma}_{rm}} \right)}, \text{ if } \frac{1}{\bar{\gamma}_{br}} \neq \frac{m+1}{\bar{\gamma}_{rm}} \\ &\frac{e^{-\frac{(m+1)\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{rm}}} \left( \frac{m+1}{\bar{\gamma}_{rm}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_{br}} \right)}{\bar{\gamma}_{br} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{br}}} (\gamma_{th}+1) e^{\frac{\gamma_{th}+1}{\bar{\gamma}_{br}}} E_1 \left( \frac{\gamma_{th}+1}{\bar{\gamma}_{br}} \right) +} \\ &\bar{\gamma}_{br}^2 e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{br}}} \left( -1 + e^{\frac{1}{\bar{\gamma}_{br}}} E_1 \left( \frac{1}{\bar{\gamma}_{br}} \right) \right), \text{ if } \frac{1}{\bar{\gamma}_{br}} = \frac{m+1}{\bar{\gamma}_{rm}} \end{aligned} \right. \quad (20) \end{aligned}$$

$P_{outB}C_2$  表示:基站出现反馈中断的前提下,采用中继模式时所能达到的平均速率。

经过以上分析,在一个调度周期内,结合公式(16)、(20),系统的平均可达速率为:

$$C = C_1 + P_{outB}C_2 \quad (21)$$

## 5 仿真结果

该部分通过数值仿真,验证了 RRFD 算法的系统性能,并传统 SMUD 调度算法进行比较。仿真时,设基站到用户距离为 100m;噪声功率  $\sigma^2 = 10^{-8} W$ ;基站或中继发送功率  $P = 5W$ ;  $\Gamma = 1$ ;损耗因子  $\alpha = 4$ 。

图2体现了对应基站反馈中断概率的不同取值,系统平均反馈用户数伴随总用户数的变化趋势。设基站处于中继和用户之间,  $\bar{\gamma}_{br} = \bar{\gamma}_m = 22\text{dB}$ ,  $\bar{\gamma}_{bm} = 10\text{dB}$ ,  $P_{outB}$  取值分别为 0.05 和 0.1。本文算法以及 SMUD 算法<sup>[7]</sup>较之全反馈方案,都能极大程度的减少系统反馈负荷。当基站的反馈中断概率增大时,系统门限增高。对于 SMUD 算法,门限越高则反馈用户越少。在 RRFD 算法中,中继模式下反馈用户数较多,基站反馈中断概率越大,系统选择中继模式的几率越大,随着总用户数的增加,系统反馈用户数增长越快。

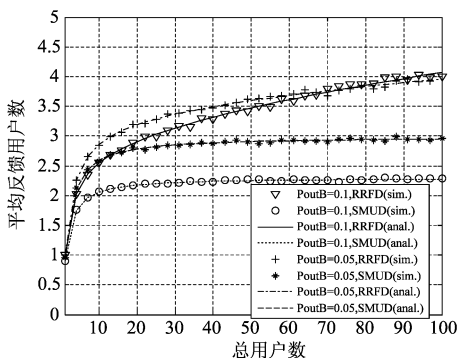


图2 系统平均反馈用户数与总用户数关系

图3描绘了当  $K$  分别取 5、15、30、50 时,一个调度周期内,系统平均反馈用户数随中继位置移动的变化趋势。这里设  $P_{outB} = 0.1$ 。图中数据显示,在用户数已定、门限值不变的前提下,随着中继与用户间距离的减短,中继第二跳链路上的路径损耗减小,信噪比增大,反馈信息给中继的用户数增多,系统平均反馈用户数也随之增多。

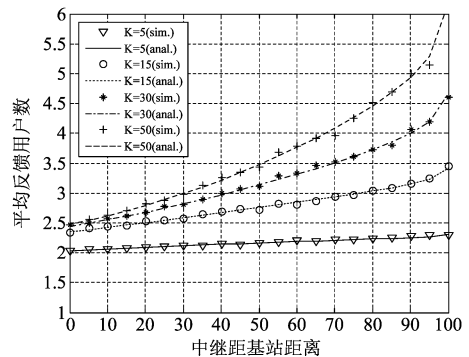


图3 中继所处位置对系统平均反馈用户数的影响

图4体现了当中继处于基站和用户之间时,改变基站的反馈中断概率,系统平均可达速率伴随总用户数的变化趋势。 $P_{outB}$  取值分别为 0.1 和 0.2。由图中数据可知,中断概率越大,系统平均可达速率越小。此外,对应于同一  $P_{outB}$ ,由于中继的作用,较之 SMUD 算法,本文算法可获得更大的系统可达速率。然而,与全反馈的最大载干比 (MAX C/I) 算法相比,RRFD 算法仍存在一定的容量损失。因此,本文算法在减少反馈负荷与提高系统容量之间取得了一个折中。

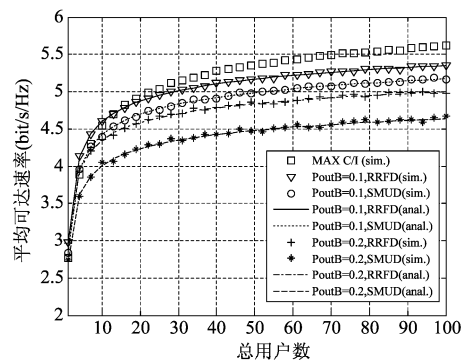


图4 系统平均可达速率与总用户数关系

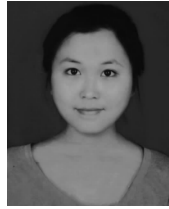
## 6 结论

本文提出了一种基于中继网络的减少反馈的半分布式调度算法。该算法在基站与中继处分别设立信道信息反馈门限,可极大程度的减小系统反馈负荷。此外,该算法大大降低了系统反馈中断概率,使得系统平均可达速率较之传统 SMUD 算法获得显著提高。然而文章还存在着一些问题,首先,门限的设置方法还有很多,需更为深入的探讨。其次,RRFD 算法是基于最优信道状态进行用户调度的,公平性尚有一定欠缺。这些问题将作为下一阶段的研究重点。

## 参考文献

- [1] Fan B. , Wang W. B. , Lin Y. C. , Huang L. , Zheng K. Subcarrier allocation for OFDMA relay networks with proportional fair constraint [ C ] // Communication, 2009. ICC'09. Dresden; IEEE, 2009. 1-5.
- [2] Shirani-Mehr H. , Liu D. N. , Caire G. . Channel State Prediction, Feedback and Scheduling for a Multiuser MIMO-OFDM Downlink [ C ] // Proceedings of 42th Asilomar Conference on Signals, System, and Computers. Pacific Grove; IEEE, 2008. 136-140.
- [3] 唐志华. OFDM 系统资源分配和调度策略研究 [ D ]. 安徽:中国科学技术大学,2009.  
Tang Z. H. . The research of resource allocation and scheduling scheme for OFDM systems [ D ]. Anhui: University of Science and Technology of China, 2009.
- [4] Yang R. Z. , Yuan C. W. , Teng Y. L. , Zhang Y. H. . Feedback Threshold with Guaranteed QoS in Multiuser OFDM Systems [ J ]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2009, 16(2) :24-28.
- [5] Park S. Y. . Performance of Differentiated Rate Scheduling Using Contention-Based CSI Feedback [ J ]. Vehicular Technology, 2010, 59(6) : 3143-3148.
- [6] Al-Harhi Y. S. , Al-Ghadhban S. . Relay-aided opportunistic scheduling in wireless networks [ J ]. Communications, IET, 2010, 4(3) : 303-311.
- [7] Gesbert D. , Alouini M. -S. . Selective multiuser diversity [ C ] // Signal Processing and Information Technology. France; IEEE, 2003. 162-165.
- [8] Jang Y. -U. , Shin W. -Y. , Lee Y. H. . Multiuser Scheduling Based on Reduced Feedback Information in Cooperative Communications [ C ] // Vehicular Technology Conference. Barcelona; IEEE, 2009. 1-5.
- [9] Shi Y. , Zhang W. , Letaief K. B. . Cooperative Multiplexing and Scheduling in Wireless Relay Networks [ C ] // Communications, ICC'08. Beijing; IEEE, 2008. 3034-3038.

## 作者简介



李征(1987-),女,河南许昌人,硕士研究生。2009年于解放军信息工程大学获学士学位。现为重庆邮电大学通信学院硕士研究生。主要研究方向为无线资源调度。E-mail:381724496@qq.com



唐伦(1973-),男,重庆合川人。2004年于重庆邮电大学获硕士学位。2010年获重庆大学通信与信息系统专业博士学位。主要研究方向为协同通信和认知中继。E-mail:tangl@cqupt.edu.cn



陈前斌(1967-),男,四川营山人,教授,博士生导师。主要研究领域为下一代网络、个人通信、多媒体信息处理与传输。E-mail:chenqb@cqupt.edu.cn