

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201701017



多小区多用户 MISO 系统中 自适应有限反馈方案

郭荣新

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 依据有限的用户信道状态信息(CSI)下的小区间干扰消除,提出一种简单的协作单小区传输方案.研究使用不同的有限反馈方案所造成的和速率损失,对提出的反馈比特的分配算法给出具体的闭合表达式,该算法能够使量化误差最小.仿真结果表明:与等比特分配算法相比,提出的自适应比特分配算法能获得更优的系能增益.

关键词: 有限反馈; 和速率; 基站协作; 小区; 干扰消除; 随机矢量

中图分类号: TN 911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)01-0091-05

Adaptive Limited Feedback Scheme in Multicell Multiuser MISO Systems

GUO Rongxin

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: By using the inter-cell interference cancellation based on limited user channel state information (CSI), a simple cooperative single cell transmission scheme is proposed in this paper. The sum-rate loss caused by different limited feedback schemes is investigated. The closed-form expressions of proposed feedback bit allocation scheme is presented, which can minimize the quantization error. Simulation results show that the proposed feedback bits allocation strategy provides significant gain compared with equal bits allocation scheme.

Keywords: limited feedback; sum rate; base station cooperation; inter-cell; interference cancellation; random vector

发射端基站间协作利用已知的用户信道状态信息(CSI)管理协作信道干扰^[1-2],用户通过带宽有限回程链路反馈期望信道信息和干扰信道信息.在下一代蜂窝通信系统中,通过利用容量有限的回程链路,或者带宽有限的反馈信道延迟 CSI,基站间协作策略的成功实施可用来评估系统获得的性能增益.协作多小区传输能够显著提升性能增益,但是这需要基站间交换大量信息,包括用户数据和 CSI,计算复杂度高,在实际系统中很难部署^[1].另一方面,协作单小区传输(协作波束形成或部分基站间协作)由于没有基站间数据交换,每个用户仅需向相邻小区反馈瞬时信道状态信息或统计信道状态信息.因此,系统开销较小、计算复杂度更低.由于多普勒效应,CSI在整个回程链路带宽中仅占有很少的一部分^[3].越来越多的研究集中在有限反馈下多小区干扰广播信道^[4-10].在单干扰系统中,小区间干扰消除在和速率性能上可获得显著的增益,并且保证回程链路的负载是可控的^[6].小区间干扰消除被用来量化多小区系

收稿日期: 2015-01-07

通信作者: 郭荣新(1980-),男,实验师,主要从事移动通信的信息处理方面的研究. E-mail: grxee@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61201264, 61401165);福建省自然科学基金资助项目(2015J01262);福建省泉州市重点科技专项(2012Z99);华侨大学实验教学改革与建设课题(66661204Y)

统中延迟有限反馈的影响^[8],但是,对于所有的信噪比(R_{SN})区域内没有给出明确的统一表达式.本文提出了一种简单的协作单小区传输方案.

1 系统模型

图 1 为两小区多用户 MISO (multiple input single output) 系统模型. 图 1 中:两小区为多用户 MISO 系统,有 K 个基站,每个基站配备 M 根天线,对选出的 $L(L < M)$ 个单天线用户发送 L 个数据流. 一个激活的用户除了接收到本地基站发送的数据信号以外,还会接收到相邻小区基站发送的干扰信号. 记第 i 小区中的第 l 个用户为用户 (l, i) ,假设等功率分配,用户 (l, i) 接收到的信号为

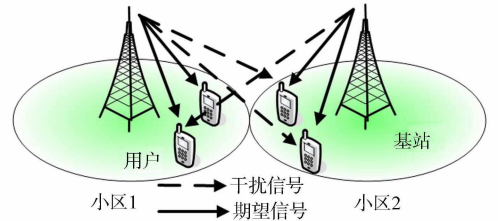


图 1 两小区多用户 MISO 系统模型

Fig. 1 Two cell multiuser MISO system model

$$y_{l,i} = \sqrt{P_{l,i,i}^r} \mathbf{g}_{l,i,i}^H \mathbf{w}_{l,i} s_{l,i} + \underbrace{\sqrt{P_{l,i,i}^r} \sum_{\substack{m=1, m \neq l \\ \text{in}}} \mathbf{g}_{l,i,i}^H \mathbf{w}_{m,i} s_{m,i}}_{\text{干扰信号}} + \underbrace{\sum_{\substack{j=1, j \neq i \\ \text{in}}} \sqrt{P_{l,i,j}^r} \mathbf{g}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{l,j} s_{l,j}}_{\text{期望信号}} + n_{l,i}. \quad (1)$$

式(1)中: $P_{l,i,j}^r$ 为用户 (l, i) 从基站 j 接收到的功率,路径损耗模型为 $P_{l,i,j}^r = P_t / L (D_0 / d_{l,i,j})^r$, P_t 为基站发送功率, D_0 为小区半径, r 为路径损耗因子, $d_{l,i,j}$ 为基站 j 和用户 (l, i) 的距离; $n_{l,i}$ 为服从零均值单位方差的加性复高斯白噪声,即 $n_{l,i} \sim \text{CN}(0, 1)$; $\mathbf{g}_{l,i,j}$ 为基站 j 到用户 (l, i) 的信道矢量, $\mathbf{g}_{l,i,j} \in C^{M \times 1}$,假设所有用户经历大尺度衰落和阴影效应,即 $\mathbf{g}_{l,i,j}$ 中的每个元素均服从独立同分布零均值单位方差的复高斯随机分布,即 $\text{CN}(0, 1)$; $\mathbf{w}_{l,i}$ 为发给用户 (l, i) 的预编码向量, $\mathbf{w}_{l,i} \in C^{M \times 1}$,且满足 $\|\mathbf{x}_{l,i}\| = 1$; $s_{l,i}$ 为给用户 (l, i) 发送的能量归一化为 $1(E\{|s_{l,i}|^2\} = 1)$ 的信号.

假设用户 (l, i) 通过小区间正交参考信号,已知完全信道状态的信息. 已知在用户端和基站端的量化码本,信道方向信息通过使用量化码本反馈给基站. 量化信道矢量从码本 $C_{l,i,j} = \{c_{l,i,j}^1, c_{l,i,j}^2, \dots, c_{l,i,j}^N\}$ 中选出,其中: $N_j = 2^{B_{l,i,j}}$, $B_{l,i,j}$ 是反馈的比特数,每个用户使用最小弦距离准则量化自己的信道方向信息,选出和信道方向信息最近的码字作为发送端信道状态信息. 因此,信道方向信息的量化可表示为

$$\hat{\mathbf{g}}_{l,i,j} = \arg \max_{c_{l,i,j} \in C_{l,i,j}} |\hat{\mathbf{g}}_{l,i,j}^H c_{l,i,j}|^2. \quad (2)$$

式(2)中: $\hat{\mathbf{g}}_{l,i,j} = \mathbf{g}_{l,i,j} / \|\mathbf{g}_{l,i,j}\|$ 为信道方向信息,用户 (l, i) 反馈 $B_{l,i,j}$ 个比特表示码本中码字所对应的索引值. 假设用户已经完整地估计了信道状态信息,而且反馈信道无误差、无延时.

随机矢量量化码本(RVQ)通常易于问题的分析,其中的码字是通过从各项同性分布的欧几里德空间中选择出来的. 每个用户通过估计多个基站的信道方向信息,分别独立量化,并反馈给服务基站,服务基站将联合信道方向信息通过有限回程链路反馈给相邻小区基站. 对于不同的基站,用户有相同的码本,而对于同一个基站,用户与用户之间的码本不同的,以避免多个用户有相同的量化信道状态信息. 最后,假设每个用户满足总的反馈比特数为固定常数,即 $B_r = \sum_{j=1}^K B_{l,i,j}$.

2 有限速率反馈下小区间干扰消除

每个基站分别发送波束形成的矢量给服务用户和干扰用户,发送给用户 (l, i) 的波束形成矢量 $\mathbf{w}_{l,i}$ 能够消除小区间干扰和用户间干扰,即 $\mathbf{g}_{l,i,i}^H \mathbf{w}_{l,i} = 0$,当 $j = i$ 为用户间干扰,当 $j \neq i$ 为小区间干扰. 每个基站装备有 M 根天线,最多可消除 $M - 1$ 干扰. 最大化期望信号的功率为 $|\mathbf{g}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{l,i}|^2$,相当于选择预编码矢量 $\mathbf{w}_{l,i}$ 在 $\mathbf{g}_{l,i,j}$ 零空间的投影,即 $\bar{\mathbf{G}} = [\bar{\mathbf{G}}_{l,i}, \mathbf{G}_{\bar{S},i}]$,其中: $\bar{\mathbf{G}}_{l,i} = [\hat{\mathbf{g}}_{1,i,i}, \dots, \hat{\mathbf{g}}_{l-1,i,i}, \hat{\mathbf{g}}_{l+1,i,i}, \dots, \hat{\mathbf{g}}_{L,i,i}]$ 为用户 (l, i) 间网络信道的补信道; $\mathbf{G}_{\bar{S},i}$ 为小区间网络信道, \bar{S}_i 是受基站 BS_i 影响的其他小区用户集, $\bar{S}_i = \{(m, n) | B_{m,n,i} \neq 0\}$,其中, $m \in \{1, 2, \dots, L\}$, $n = \{1, 2, \dots, K\} / \{i\}$. 因此,预编码矢量为

$$\mathbf{w}_{l,i} = (\mathbf{I} - P\hat{\mathbf{G}}) \hat{\mathbf{g}}_{l,i,j}. \quad (3)$$

式(3)中: $P\hat{\mathbf{G}}$ 是 $\hat{\mathbf{G}}$ 的投影, $P\hat{\mathbf{G}} = \hat{\mathbf{G}}(\hat{\mathbf{G}}^H \hat{\mathbf{G}})^{-1} \hat{\mathbf{G}}^H$. 因此,和速率的表达式为

$$R_{l,i}^{\text{PFB}} = \log_2 (1 + P_{l,i,j} |\mathbf{g}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{l,i}^{\text{PFB}}|^2). \quad (4)$$

式(4)中: $\mathbf{w}_{l,i}^{\text{PFB}}$ 为波束形成矢量,可以完全消除小区间干扰和用户间干扰.

与已知完全信道状态信息不同, 小区间干扰和用户间干扰在有限反馈系统中不能完全精准地估计, 因此, 用户 (l, i) 获得的和速率为

$$R_{l,i}^{\text{PFB}} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{l,i,j} \|\mathbf{g}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{l,i}\|^2}{I_{\text{IUI}} + I_{\text{ICI}} + 1} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{P_{l,i,j} \|\mathbf{g}_{l,i,j}\|^2 \|\tilde{\mathbf{g}}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{l,i}\|^2}{I_{\text{IUI}} + I_{\text{ICI}} + 1} \right). \quad (5)$$

$$\text{式(5)中: } I_{\text{IUI}} = P_{l,i,j} \|\mathbf{g}_{l,i,j}\|^2 \sum_{m=1, m \neq l}^L \|\mathbf{g}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{m,i}\|^2; I_{\text{ICI}} = \sum_{j=1, j \neq i}^K P_{l,i,j} \|\mathbf{g}_{l,i,j}\|^2 \sum_{l=1}^L \|\mathbf{g}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{l,i}\|^2.$$

信道的方向信息可分解为

$$\mathbf{g}_{l,i,j} = \cos(\theta_{l,i,j}) \hat{\mathbf{g}}_{l,i,j} + \sin(\theta_{l,i,j}) \mathbf{q}_{l,i,j}. \quad (6)$$

式(6)中: $\mathbf{q}_{l,i,j}$ 为由量化导致的矢量误差; $\theta_{l,i,j}$ 为真实信道 $\tilde{\mathbf{g}}_{l,i,j}$ 与量化信道方向信息 $\hat{\mathbf{g}}_{l,i,j}$ 之间的夹角. 用户 (l, i) 获得的和速率可改写为

$$R_{l,i}^{\text{PFB}} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{l,i,j} \|\mathbf{g}_{l,i,j}\|^2 \|\tilde{\mathbf{g}}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{l,i}\|^2}{\tilde{I}_{\text{IUI}} + \tilde{I}_{\text{ICI}} + 1} \right). \quad (7)$$

$$\text{式(7)中: } \tilde{I}_{\text{IUI}} = P_{l,i,j} \|\mathbf{g}_{l,i,j}\|^2 \sin^2(\theta_{l,i,j}) \sum_{m=1, m \neq l}^L \|\mathbf{q}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{m,i}\|^2; \tilde{I}_{\text{ICI}} = \sum_{j=1, j \neq i}^K P_{l,i,j} \|\mathbf{g}_{l,i,j}\|^2 \sin^2(\theta_{l,i,j}) \sum_{l=1}^L \|\tilde{\mathbf{g}}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{l,i}\|^2.$$

定义用户 (l, i) 的和速率损失为

$$\begin{aligned} \Delta R_{l,i}(P_{l,i,j}^r, L, M) &= E[R_{l,i,j}^{\text{PFB}} - R_{l,i,j}^{\text{LFB}}] = E[\log_2(1 + P_{l,i,j}^r \|\mathbf{g}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{l,i}^{\text{PFB}}\|^2) - \\ &E[\log_2(1 + \frac{P_{l,i,j}^r \|\mathbf{g}_{l,i,j}\|^2 \|\tilde{\mathbf{g}}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{l,i}\|^2}{\tilde{I}_{\text{IUI}} + \tilde{I}_{\text{ICI}} + 1})] = \\ &E[\log_2(1 + P_{l,i,j}^r \|\mathbf{g}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{l,i}^{\text{PFB}}\|^2)] + E[\log_2(1 + \tilde{I}_{\text{IUI}} + \tilde{I}_{\text{ICI}})] - \\ &E[\log_2(1 + P_{l,i,j}^r \|\mathbf{g}_{l,i,j}^r\|^2 \|\tilde{\mathbf{g}}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{l,i}\|^2 + \tilde{I}_{\text{IUI}} + \tilde{I}_{\text{ICI}})] \stackrel{(a)}{\leqslant} \\ &E[\log_2(1 + P_{l,i,j}^r \|\mathbf{g}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{l,i}^{\text{PFB}}\|^2)] - E[\log_2(1 + P_{l,i,j}^r \|\mathbf{g}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{l,i}\|^2)] + \\ &E[\log_2(1 + \tilde{I}_{\text{IUI}} + \tilde{I}_{\text{ICI}})] \stackrel{(b)}{\leqslant} [\log_2(1 + E[\tilde{I}_{\text{IUI}}] + E[\tilde{I}_{\text{ICI}}])]. \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中: 因为 $\mathbf{w}_{l,i}^{\text{PFB}}$ 和 $\mathbf{w}_{l,i}$ 是各项同性分布的单位向量, 与 $\mathbf{g}_{l,i}^H$ 相互独立, 因此, 式中的(a)成立. 根据詹森不等式, 式中的(b)成立.

$\mathbf{g}_{l,i}^H \mathbf{w}_{l,i}$ 服从 $B(1, M-2)$ 分布. $E[B(a, b)] = a/(a+b)$, $\|\mathbf{g}_{l,i,j}^r\|^2 = M$, $E[\sin^2(\theta_{l,i,j})] = 2^{B_{l,i,j}} \times B(2^{B_{l,i,j}}, M/(M-1))$, 其中: $B(a, b)$ 是参数为 (a, b) 的贝塔分布; 随机变量 $\|\mathbf{g}_{l,i,j}\|^2$, $\sin^2(\theta_{l,i,j})$ 和 $\|\mathbf{q}_{l,i,j}^H \mathbf{w}_{l,i}\|^2$ 相互之间是线性独立的. 因此, 有

$$\left. \begin{aligned} E[\tilde{I}_{\text{IUI}}] &= (L-1) P_{l,i,j}^r \frac{M}{M-1} 2^{B_{l,i,j}} B(2^{B_{l,i,j}}, \frac{M}{M-1}), \\ E[\tilde{I}_{\text{ICI}}] &= L \sum_{j=1, j \neq i}^K P_{l,i,j}^r \frac{M}{M-1} 2^{B_{l,i,j}} B(2^{B_{l,i,j}}, \frac{M}{M-1}). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

速率损失的上界为

$$\begin{aligned} \Delta R_{l,i} &\leqslant \log_2 \left[1 + (L-1) P_{l,i,j}^r \frac{M}{M-1} 2^{B_{l,i,j}} B(2^{B_{l,i,j}}, \frac{M}{M-1}) + \right. \\ &\left. L \sum_{j=1, j \neq i}^K P_{l,i,j}^r \frac{M}{M-1} 2^{B_{l,i,j}} B(2^{B_{l,i,j}}, \frac{M}{M-1}) \right]. \end{aligned}$$

3 自适应有限反馈比特分配

斯特灵公式为 $B(a, b) = \int_0^1 t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt = \Gamma(b) a^{-b} (1 + O(1/a))$ [11]. 随着 a 逐渐增大, $O(1/a)$ 可以忽略不计, 当 $M=4, B=1, B(2^1, 4/3)=0.321\ 4$ 时, $\Gamma(2) 2^{-2}=0.354\ 4$; 当 $M=2, B=1, B(2^1, 2/2-1)=0.166\ 7$ 时, $\Gamma(2) 2^{-2}=0.250\ 0$. 因此, 当反馈比特数 $B_{l,i,j}$ 足够大时, $B(a, b) = \Gamma(b) a^{-b} O(1/a)$ 可以忽略不计, 速率损失的上界可改写为

$$\Delta R_{l,i} \leq \log_2 [1 + \bar{P}_i 2^{-B_i/(M-1)} + \sum_{j=1, j \neq i}^K \bar{P}_j 2^{-B_j/(M-1)}]. \quad (10)$$

式(10)中: 从服务基站接收的总干扰功率分别为 $\bar{P}_i = (L-1)P_{l,i,j}^r \Gamma(\frac{2M-1}{M-1})$, $\bar{P}_j = LP_{l,i,j}^r \Gamma(\frac{2M-1}{M-1})$.

用户(l, i)和速率损失的最小化问题表达式为

$$\left. \begin{array}{l} \min_{B_1, B_2, \dots, B_K \in (0, z^+)} \sum_{i=1}^K \bar{P}_i 2^{-B_i/(M-1)}, \\ \text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^K B_i \leq B_t. \end{array} \right\} \quad (11)$$

目标函数是对数凸优化问题, 利用拉格朗日算法可求得最优解, 式(11)的拉格朗日函数可表示为

$$L(B_i, \lambda) = \sum_{i=1}^K \bar{P}_i 2^{-B_i/(M-1)} + \lambda (\sum_{i=1}^K B_i - B_t). \quad (12)$$

式(12)的库恩库克条件为

$$\frac{\partial L(B_i, \lambda)}{\partial B_i} = -\frac{\ln(2)\bar{P}_i}{M-1} 2^{-B_i/(M-1)} + \lambda = 0, \quad \frac{\partial L(B_i, \lambda)}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^K B_i - B_t = 0, \quad i = 1, \dots, K. \quad (13)$$

因此, 可求得一个次优的解, 即

$$B_i^* = \lceil \frac{B_t}{K} + (M-1)\log_2(\bar{P}_i / (\prod_{j=1}^K \bar{P}_j)^{1/K}) \rceil^+. \quad (14)$$

式(14)中: $\lceil x \rceil^+ = \max\{0, x\}$.

由式(14)可知: 每个链路分配的比特依赖于基站天线数 M 、小区数、用户间干扰接收功率、总的接收功率; 为了获得更精准的信道状态信息, 需要最小化量化误差导致的性能损失.

为了使速率损失维持在一个常数范围内, 有

$$\log_2(1 + \sum_{i=1}^K \bar{P}_i 2^{-B_i/(M-1)}) \leq \log_2(\alpha). \quad (15)$$

变换后得

$$\alpha - 1 \geq \sum_{i=1}^K \bar{P}_i 2^{-B_i/(M-1)}. \quad (16)$$

把式(14)带入到式(16), 有

$$\begin{aligned} \alpha - 1 &\geq \sum_{i=1}^K \bar{P}_i 2^{-B_i/(M-1)} = \sum_{i=1}^K \bar{P}_i \{ 2^{-B_i/(K(M-1))} 2^{-\log_2(\bar{P}_i / (\prod_{j=1}^K \bar{P}_j)^{1/K})} \} = \\ &2^{-B_t/K(M-1)} (\sum_{i=1}^K \bar{P}_i (\bar{P}_i / (\prod_{j=1}^K \bar{P}_j)^{1/K})^{-1}). \end{aligned} \quad (17)$$

依据修正式(17), 可以得到

$$B_t \geq (M-1)K[\log_2(\frac{K}{\alpha-1}) + \log_2\{(\prod_{j=1}^K \bar{P}_j)^{1/K}\}]. \quad (18)$$

如果 $\alpha-1=K$, 式(18)变为 $B_t \geq (M-1)K[\log_2\{(\prod_{j=1}^K \bar{P}_j)^{1/K}\}]$, 这表明为了使速率损失维持在一

个常数范围 $\log_2(\alpha)$ 内, 总的反馈比特数必须满足 $B_t \geq (M-1)K[\log_2\{(\prod_{j=1}^K \bar{P}_j)^{1/K}\}]$.

4 仿真结果与分析

仿真环境为 $M=4, L=2, \gamma=3.8, D_0=1$ m, $R=500$ m. 服务基站和干扰基站反馈的比特数与用户和服务基站距离的关系曲线, 如图 2 所示. 假设 $P_t=10$ dB, 即 $P_{l,i,j}^r(d_s=500)=10$ dB, 总的反馈比特数为 $B_t=10$. 由图 2 可知: 在 $0 \leq d_s \leq 338$ 的范围内, 比特分配没有变化, 在 $338 \leq d_s \leq 500$ 范围内开始有变化, 因此, $0 \leq d_s \leq 338$ 这段范围是非协作区域; $338 \leq d_s \leq 500$ 这段范围是协作区域, 在协作区域范围内, 用户需要更精准的信道状态信息, 才能消除小区间干扰. 如果用户在非协作区域内被调度, 那么, 服务基

站能够很好地服务该用户而不需要干扰基站的协作. 小区边缘的和速率性能,如图 3 所示.

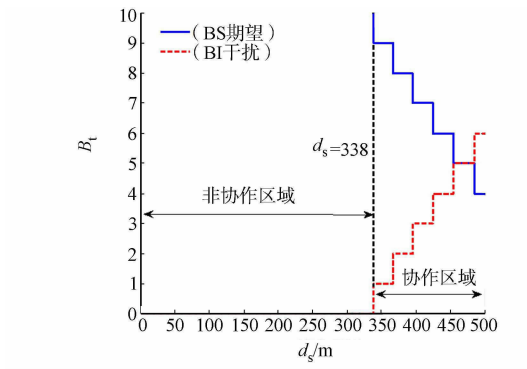


图 2 比特分配
Fig. 2 Bit allocation

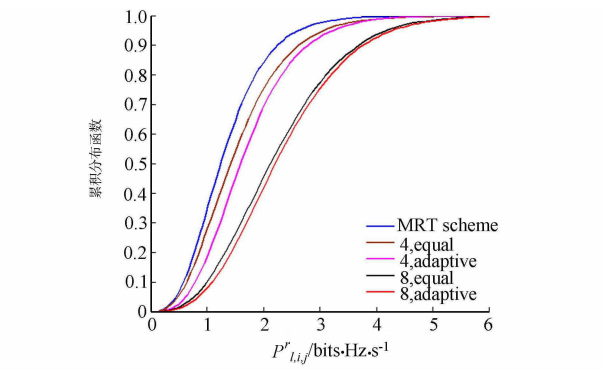


图 3 小区边缘和速率性能
Fig. 3 Rate performance of cell edge

算法由于可消除 ICI 和 IUI,系统和速率明显优于“MRT scheme”. 由图 3 可知:随着 P_t 的逐渐增加,边缘用户的接收功率 $P_{t,i,j}^r(d_s=500)$ 在 $-10\sim 20$ dB 之间变化;随着 B_t 的增加,与等比特分配算法相比,自适应比特分配算法获得的系统性能有进一步的提高.

5 结束语

利用多小区多用户干扰广播信道的信道状态信息,提出一种小区间干扰消除算法. 根据提出的算法,分析和速率损失的性能,并根据最小期望量化误差推导了比特分配的闭合表达式. 为了维持和速率损失在一个常数范围内,还给出了每个用户需要反馈的总比特数的关系. 仿真结果显示:所提算法可以改善小区边缘覆盖,提高系统容量.

参考文献：

[1] ZHANG Hongyuan, DAI Huaiyu. Cochannel interference mitigation and cooperative processing in downlink multi-cell multiuser MIMO networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking,2004,2004(2): 222-235.

[2] GESBERT D, HANLY S, HUANG H, *et al.* Multi-cell MIMO cooperative networks: A new look at interference [J]. IEEE Journal on Selected Areas In Communications,2010,28(9):1380-1408.

[3] SAMARDZIJA D, HUANG H. Determining backhaul bandwidth requirements of network MIMO[C]// Proc Eur Signal Process Conf. Lisbon Portugal;IEEE Press,2009:1494-1498.

[4] ZHOU Sheng, NIU Zhisheng. Distributed adaptation of quantized feedback for downlink network MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2011,10(1):61-67.

[5] LEE N, SHIN W. Adaptive feedback scheme on K-Cell MISO interfering broadcast channel with limited feedback [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2011,10(2):401-406.

[6] BHAGAVATULA R, HEATH R W. Adaptive limited feedback for sum-rate maximizing beamforming in cooperative multicell systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2011,59(2):800-811.

[7] ZHANG Jun, ANDREWS J G. Adaptive spatial intercell interference cancellation in multicell wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2010,28(9):1455-1467.

[8] BHAGAVATULA R, HEATH R W. Adaptive bit partitioning for multicell intercell interference nulling with delayed limited feedback[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2011,59(8):3824-3836.

[9] ZHANG Jun, KOUNTOURIS M, ANDREWS J G, *et al.* Multi-mode transmission for the MIMO broadcast channel with imperfect channel state information[J]. IEEE Transactions on Communications,2011,59(3):803-814.

[10] JINDAL N. MIMO broadcast channels with finite-rate feedback[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006,52:5045-5060.

[11] HAVIL J. Gamma: Exploring Euler's constant[M]. New Jersey:Princeton University Press,2003:234-235.