

蜂窝网联合协作MIMO上行容量研究

寇明延, 王笑一, 甄燕翔, 徐惠民

(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 海淀区 100876)

【摘要】研究了蜂窝无线通信系统中联合协作传输的性能以及用户协作与基站协作之间的关系。在时分的线性部署蜂窝无线系统中,通过研究MIMO信道条件下基站、用户联合协作方式的单个小区可达上行各态历经速率,给出了MIMO信道中多基站联合解码与终端OAF协作联合模式下的可达速率的计算方法,并通过仿真对MIMO信道下联合协作方式性能进行验证。通过仿真MIMO平坦衰落信道条件下系统参数变化的系统性能,分析得出MIMO信道下多基站联合解码(宏分集)与终端协作性能的线性叠加关系,而临近小区强干扰将会严重削弱终端与基站联合协作时终端协作的作用。

关键词 蜂窝无线通信系统; 协作通信; 宏分集; 多入多出; 多基站联合解码; 联合协作

中图分类号 TN47

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.06.010

Uplink Capacity of Cellular Networks with United Cooperative in MIMO Channel

KOU Ming-yan, WANG Xiao-yi, ZHEN Yan-xiang, and XU Hui-min

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications Haidian Beijing 100876)

Abstract The performance and relations between base stations (BS) and mobile terminal (MT) of hybrid cooperation in cellular communication networks is investigated. Through studying the per-cell achievable uplink ergodic capacity of time-division linear cellular networks with MT-BS hybrid cooperation, a computational expression for the achievable rate of OAF combining with multi-cell processing in MIMO channel is derived and the performance of hybrid collaborations in MIMO channels is verified by simulations. Moreover, the simulation results in MIMO flat fading channels with different system parameters show that the macro-diversity gains through multi-cell decode is independent with MTs collaboration but can be linear superposition. However, high interference from adjacent cells weakens the effect of MTs cooperation in hybrid collaboration systems.

Key words cellular radio systems; cooperative communication; macro-diversity; MIMO; multi-cell processing; united cooperation

多元的应用需求正将无线通信系统的模式从传统的蜂窝结构向融合协作结构转变。一种典型模式是多跳蜂窝网^[1-2],即在源节点向目标节点传输的过程中,增加中继节点辅助,将单跳链路拆分为串行的两跳可靠链路;另一种典型模式是基站联合解码处理的蜂窝网^[3],允许基站间的协作,可在下行链路传输中完成联合编码/预编码,并可在上行链路传输中完成联合解码/均衡^[4]。蜂窝网系统中应用MIMO技术的研究也正在向协作MIMO发展^[5]。

对于MIMO中继传输有较完善的链路级研究^[6-9],包含链路容量、中继节点选择和信道预编码。基于信道信息完全已知和源到目的节点通信中断的假设,文献[6]研究了基于链路容量优化的MIMO中继

选择、调度及路由算法,在链路中增加了选择增益;文献[7]将MIMO中继信道分解为广播和MAC信道,研究了其信道容量;文献[8]假设接收端CSI信息已知,推导了瑞利衰落条件下多个半双工中继在不同协作模式下的各态历经和中断容量,并进行了分析和性能比较;文献[9]研究了两跳MIMO传输的容量,并通过奇异值分布密度函数给出了容量的上下界。依据最大化信噪比原则,通过发射端与中继端迭代预编码,可以有效地抑制中继MIMO系统多用户传输时的用户间干扰,提高系统容量^[10]。

无线通信系统中采用基站联合解码处理,视各基站为分布的天线阵列,通过正交处理可以消除相邻基站干扰而获得宏分集增益,是一种理想的干扰

收稿日期: 2010-03-15; 修回日期: 2010-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(60572122, 60702051)

作者简介: 寇明延(1980-),男,博士生,主要从事协作通信和MIMO等方面的研究。

消除方式^[11-13]。文献[11]基于分簇的基站联合解码系统分析了上行链路的和速率, 并对小范围内的小区间干扰进行建模, 推导了基于一维和二维部署模型在衰落传输条件下的上下界。文献[12]在基站间有限背板链路容量条件下, 研究了小区联合解码上行链路可达速率与频率复用、码书、解码延迟的关系。

以上研究表明, 蜂窝网中采用中继和基站协作模式都可以提高系统容量。文献[14]研究了MIMO信道中中继采用DF的混合作上行性能。本文研究了MIMO信道中基于拓展的Wyner线性蜂窝模型^[4,12]的OAF终端协作、基站协作, 以及二者联合协作在上行链路传输中的性能以及相互作用。

1 系统模型

系统部署采用文献[14]中的结构, 但是采用的协作方式不同, 如图1所示。图1a所示为MIMO线性Wyner模型, 图1b所示为MIMO协作线性Wyner扩展模型。系统中小区为线性部署, 基站、终端和中继沿中心线分布, 且假设只有相邻小区间存在相互干扰。系统传输按照时分单工模式。图1a中移动终端在每个上行时隙直接向基站发送信息, 基站接收解码。图1b中系统上行传输分两个时隙完成: 1) 第1个上行时隙发送端将信息广播传输给中继和基站; 2) 第2个时隙发送端静默, 中继直接发送信息给基站。为区分系统中小区间、小区内不同传输信道, 本文引入3类附加参数以说明系统中不同链路传输信道平均功率。具体如下:

- 1) 归一化目标基站接收到的用户终端平均功率增益为1;
- 2) 小区间用户到基站和中继到基站的接收增益分别为 $\alpha \in [0,1]$ 和 $\alpha_r \in [0,1]$, 限定了基站联合处理的效率^[3];
- 3) 小区内用户到基站和中继到基站的接收增益分别为 $\beta^2 > 1$ 和 $\delta^2 > 1$, 限定了源-目的OAF协作传输的物理层性能。

蜂窝网中引入协作通信, 最关注的是处于小区边缘的移动用户, 中继位于用户和基站之间是典型的研究场景。本文的协作传输采用正交AF(OAF)^[13], 信号传输时隙如图2所示。小区 k 中, 移动用户 MU_k 在第1个时隙将信息向目标基站 B_k 和指定中继 R_k 广播传输; 在第2个时隙使用OAF方式, 中继直接将其在第1个时隙接收到的信号放大并传输到目标基站, 该时隙中移动用户保持静默。系统中用户调度采用区内时分多址方式, 即在某一时刻系统中只有一个

激活的用户。

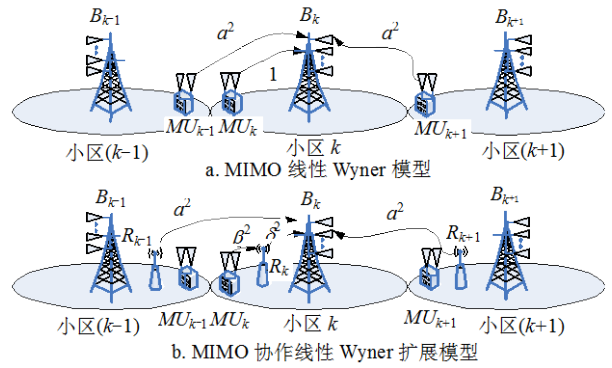


图1 MIMO线性蜂窝网模型

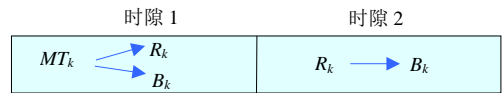


图2 移动终端 OAF 协作时隙传输模式

2 MIMO信道终端基站联合协作

2.1 基站联合解码

图1a中, 定义传输端天线数为 M_T , 接收端天线数为 N_R , 因此, 传输用户到基站的传输信道 $H_{MT_i B_j} \in C^{N_R \times M_T}$, $j \in [i-1, i, i+1]$ 。假设系统发送天线功率为平均分配, 高斯噪声功率为 N_0 , 且只有相邻小区相互干扰, 则在基站联合解码处理中, 其他小区用户信号不再是干扰, 而是有用信号^[3]。使用 M 个基站对激活的 M 个用户发送的信号联合处理, 是通过基站接收信号矢量 $\mathbf{Y} = [Y_1^T, Y_2^T, \dots, Y_M^T]^T$, 根据已知的信道矢量解出传输信号矢量 $\mathbf{X} = [X_1^T, X_2^T, \dots, X_M^T]^T$, 其中 $X_i^T \in C^{1 \times M_T}$ 和 $Y_i^T \in C^{1 \times N_R}$ 分别表示小区 i 内的终端发送信号和基站接收信号。因此, 系统中信号传输模型表述为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{N} \quad (1)$$

线性Wyner蜂窝模型中, 只有相邻小区间存在传输干扰, 传输信道矩阵 \mathbf{H} 是 M 阶块对角矩阵式(3)。因此, 当采用基站联合解码方式时, 系统可视为大规模的MIMO, 单个小区基站联合处理传输的可达各态历经速率为:

$$R_{ML-MC-DT} = \frac{1}{M} E_h \left[\log_2 \left| I_{MN_R} + \frac{P}{M_T N_0} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right| \right] \quad (2)$$

其中, 系统的传输信道矩阵为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_{MT_1 B_1} & \alpha H_{MT_1 B_2} & 0 & \dots \\ \alpha H_{MT_2 B_1} & H_{MT_2 B_2} & \vdots & \dots \\ 0 & \vdots & \vdots & \alpha H_{MT_M B_{M-1}} \\ \vdots & 0 & \alpha H_{MT_{M-1} B_M} & H_{MT_M B_M} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 联合协作传输

在基站联合解码处理中使用OAF协作方式时,需要两次联合解码。假设移动中继具有 L_R 个天线,且与发送端的传输功率相同,移动用户则在第1个时隙发送数据给目标基站 B_k 和指定中继 R_k 。目标基站接收信号如式(1)所示,而指定中继的接收信号为:

$$Y_{R_k} = \beta H_{MT_k R_k} X_k + W_{R_k} + N_{R_k} \quad (4)$$

式中, $W_{R_k} = \sum_{i=-1, i \neq 0}^1 \alpha_R H_{MT_{k+i} R_k} X_{k+i}$ 表示相邻小区终端

到达第 k 小区中继的干扰信号,且满足 $W_{R_k} \in C^{L_R \times 1}$;

$H_{MT_k R_k} \in C^{L_R \times M_T}$ 为移动终端到中继信道矢量矩阵;

$X \in C^{M_T \times 1}$ 为传输端信号矢量矩阵,接收端噪声相互独立且服从高斯分布; $N \hat{=} C^{L_R \times 1}$ 为矢量矩阵,且满足 $E[|n_i|^2] = N_0, i = 1, 2, \dots, L_R$ 。

在第2个传输时隙,中继放大接收到的信号 Y_{R_k} ,以保证其传输功率依然为 P ,且发送功率平均分配在每个天线上,然后再传向基站,则移动中继 k 的前向放大系数为 $U = [\mu_{k1} \ \mu_{k2} \ \dots \ \mu_{kL_R}]$,其中 m_{ik} 为中继第 i 个天线的放大系数,有:

$$(\mu_{jk})^2 = \frac{P}{L_R} \left\{ N_0 + \frac{P}{M_T} \sum_{i=1}^{M_T} \beta^2 |h_{ij}^{MT_k R_k}|^2 + \frac{P}{M_T} \sum_{i=1}^{M_T} \alpha^2 \left(|h_{ij}^{MT_{k-1} R_k}|^2 + |h_{ij}^{MT_{k+1} R_k}|^2 \right) \right\}^{-1} \quad (5)$$

因此,第2个时隙基站 B_k 接收到的信号为:

$$Y'_k = \delta H_{R_k B_k} U_k Y_{R_k} + \alpha (H_{R_{k-1} B_k} U_{k-1} Y_{R_{k-1}} + H_{R_{k+1} B_k} U_{k+1} Y_{R_{k+1}}) + N'_k \quad (6)$$

展开式(6)并定义终端到基站的等效传输信道:

$$H'_{MT_k B_k} = \delta H_{R_k B_k} U_k \beta H_{MT_k R_k} + \alpha H_{R_{k-1} B_k} U_{k-1} \alpha_R H_{MT_{k-1} R_k} + \alpha H_{R_{k+1} B_k} U_{k+1} \alpha_R H_{MT_{k+1} R_k} \quad (7)$$

同理,计算干扰信道可得等效小区间干扰为:

$$W'_k = H'_{MT_{k-1} B_k} X_{k-1} + H'_{MT_{k+1} B_k} X_{k+1} + H'_{MT_{k-2} B_k} X_{k-2} + H'_{MT_{k+2} B_k} X_{k+2} \quad (8)$$

定义等效传输噪声为:

$$Z_k = \delta H_{R_k B_k} U_k N_{R(k)} + \alpha H_{R_{k-1} B_k} U_{k-1} N_{R(k-1)} + \alpha H_{R_{k+1} B_k} U_{k+1} N_{R(k+1)} \quad (9)$$

则在第2个时隙,基站 k 接收到的信号为:

$$Y'_k = H'_{MT_k B_k} X_k + W'_k + N'_k + Z_k \quad (10)$$

因此, M 个小区中继站接收到的信号则为 $M \times 1$ 的矩阵矢量 $Y' = [Y_1^T, Y_2^T, \dots, Y_M^T]^T$:

$$Y' = H'X + N' + Z \quad (11)$$

式中, H' 为 $(N_R \times M_T) \times M$ 的形如 H 的矩阵块对角传输信道矩阵,元素为 $H'_{MT_{k+i} B_{k+j}}$ 。

噪声矩阵矢量为 $N' = [N_1^T, N_2^T, \dots, N_M^T]^T$,中继噪声矢量为 $Z = [Z_1^T, Z_2^T, \dots, Z_M^T]^T$ 。因此,将整个系统中的噪声看作高斯噪声处理,可得其相关为五元块对角Toeplitz矩阵:

$$E[(N' + Z)(N' + Z)^H] = N_0 (I_{M_T N_R} + R_Z) \quad (12)$$

$$[R_Z]_{k,k+i} = \frac{1}{N_0} E[Z_k Z_{k+i}^H] \quad (13)$$

$$E[Z_k Z_{k+i}^H] = \begin{cases} Z_k & i = 0 \\ \alpha \delta (U_k H_{R_k B_k})(U_k H_{R_k B_{k+1}})^H + \\ \alpha^2 (U_{k \pm 1} H_{R_{k \pm 1} B_k})(U_{k \pm 1} H_{R_{k \pm 1} B_{k \pm 1}})^H & i = \pm 1 \\ \alpha^2 (U_{k \pm 1} H_{R_{k \pm 1} B_k})(U_{k \pm 1} H_{R_{k \pm 1} B_{k \pm 2}})^H & i = \pm 2 \end{cases} \quad (14)$$

式中, $Z_k = \frac{1}{N_0} E[|Z_k|^2]$ 。综合协作传输中两个时隙

的传输,定义 $2M \times 1$ 的接收矩阵 $\bar{Y} = [Y^T \ Y'^T]^T$, $2M \times M$ 的信道传输矩阵为 $\bar{H} = [H^T \ H'^T]^T$, $2M \times 1$ 的高斯噪声矩阵为 $\bar{N} = [N^T \ (N' + Z)^T]^T$ 。因此,协作传输模型可表示为 $\bar{Y} = \bar{H}\bar{X} + \bar{N}$,两个时隙的噪声相关矩阵为:

$$\bar{R}_{\bar{N}} = \frac{1}{N_0} E[\bar{N}\bar{N}^H] = \begin{bmatrix} I_{M_T N_R} & 0 \\ 0 & I_{M_T N_0} + R_Z \end{bmatrix} \quad (15)$$

因此,单个小区的可达各态历经传输速率为:

$$R_{ML-MC-OAF} = \frac{1}{2M} E_h \left[\log_2 \left| I_{2MN_R} + \frac{P}{M_T N_0} \bar{H}^H \bar{R}_{\bar{N}}^{-1} \bar{H} \right| \right] \quad (16)$$

3 数据仿真

SC和MC表示单小区和多基站联合解码;DT和OAF表示无协作传输和正交前向放大中继传输。假设所有移动用户、中继站和基站部署在一条直线上,定义移动用户与基站间距离为 d ,则不同信道增益为:

$$\begin{cases} \beta^2 = \frac{1}{d^\lambda} \\ \delta^2 = \frac{1}{(1-d)^\lambda} \end{cases} \quad (17)$$

本文的仿真基于瑞利平坦衰落信道,考虑移动用户、中继和基站安装相同数目天线(选择为2和4),系统中小区总数为20,归一化信道传输的SNR=3 dB,信道衰落指数 $\lambda=3$,小区间干扰系数为 $\alpha^2=-5$ dB,分析MIMO信道中归一化距离 d 对OAF协作、基站联合解码和移动用户与基站联合协作的系统性

能的影响。由图3可知, 天线数从2增长到4时, 系统各态历经速率增长近3 dB, 最佳MIMO信道中继位置为 $d=0.5$ 处, 即速率最大点, 且在单基站和基站联合处理时都是有效的。根据仿真分析可得, 中继协作传输增益与基站联合处理增益(宏分集增益)是独立的, 并存时增益可以累加。

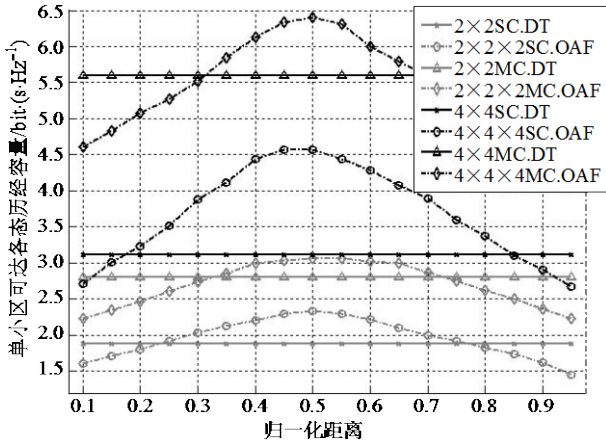


图3 MIMO信道小区可达各态历经速率

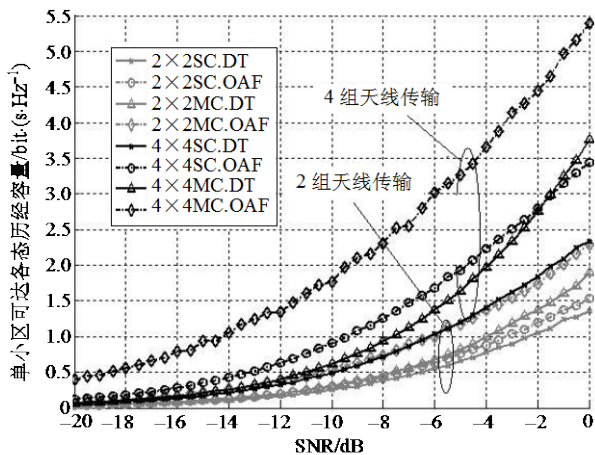


图4 低信噪比小区可达各态历经容量

为了分析不同信噪比条件下的系统性能, 本文分别仿真了低信噪($-20 \sim 0$ dB)和中高信噪($0 \sim 20$ dB)条件的各态历经速率, 设定 $d=0.5$, $\alpha^2=-10$ dB, $\lambda=3$ 。低信噪比和中高信噪比条件下的各态历经速率变化曲线分别如图4和图5所示。由图可知, 相同的链路条件下, 多基站联合解码性能优于单基站解码。因此在MIMO信道下, 单基站解码传输仍然是干扰受限的传输系统, 而多基站联合解码可有效地将小区间的干扰转化为有用信号。使用单基站解码时, 在各种信噪比条件下, 中继都对移动用户产生协作传输增益; 而多基站联合解码时, 中继对移动用户在中低信噪比条件下带来协作增益, 但当信噪比上升到 $9 \sim 10$ dB时, OAF中继产生的额外噪声抑制了系统性能提高, 移动中继的作用逐渐弱化, 基站协作联合解码的作用得到突显。

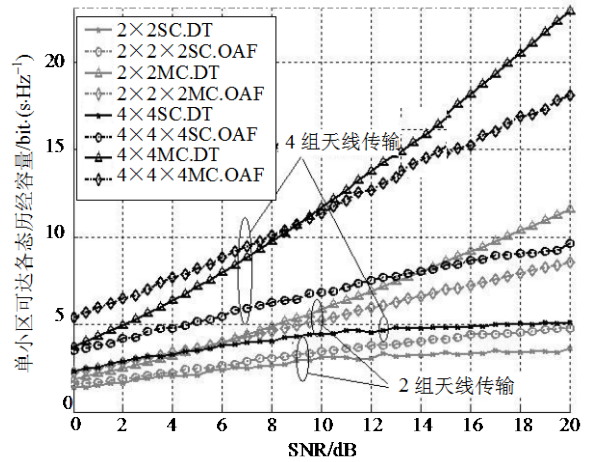


图5 中高信噪比小区可达各态历经容量

为分析小区间干扰系数的变化对系统性能的影响, 设定 $d=0.5$, $SNR=5$, $\lambda=3$, 仿真结果如图6所示。单基站解码时, 小区内协作对系统传输的增益不明显; 干扰系数大于 -20 dB时, 随着干扰系数的增加, 单小区内OAF协作增益被小区内干扰抵消, 反而使系统性能递减; 多基站联合解码时, 协作增益在干扰系数小于 -25 dB时不明显, 干扰系数在 $-20 \sim -10$ dB之间, 中继增益占优势, $-10 \sim 0$ dB之间时, 基站协作增益占优势。

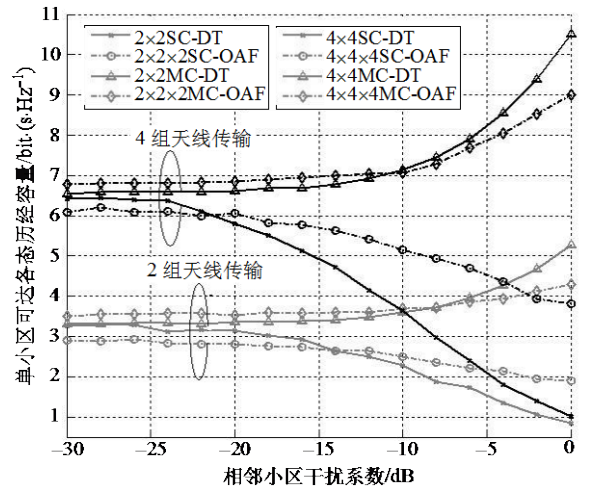


图6 小区间干扰系数与可达各态历经容量的关系

4 结束语

基于Wyner线性模型融合MIMO传输建立的时分线性蜂窝模型, 本文研究了用户OAF协作、基站联合解码以及用户与基站联合协作, 并推导了各种协作传输方式下单小区可达各态历经速率的计算方法。基于理论分析和仿真, 得出以下结论:

- 1) MIMO传输中引入OAF协作传输, 继承了MIMO传输带来的速率增益的优势。
- 2) 单基站解码方式下, OAF协作可有效地提高

蜂窝系统上行链路单基站解码的接收性能。

3) 多基站解码MIMO传输时, OAF协作在中低信噪比传输时呈现出有效的增益, 且与多基站联合解码增益呈现出线性叠加关系; 高信噪比时, OAF协作增益由于非再生中继增加的噪声被削弱了, 且传输路径增加时愈加明显。

参 考 文 献

- [1] ZHANG H, DAI H, ZHOU Q. Base station cooperation for multiuser MIMO: Joint transmission and BS selection[C]// Conference on Information Sciences and Systems. New Jersey Princeton, USA: [s.n.], 2004.
- [2] FU C Y, GLITHO R, KHENDEK F. A cross-layer architecture for signaling in multi-hop cellular networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(9): 174-182.
- [3] SANDEROVICH A, SOMEKH O, POOR H V, et al. Uplink macro diversity of limited backhaul cellular networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(8): 3457-3478.
- [4] WYNER A D. Shannon-theoretic approach to a Gaussian cellular multiple-access channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1994, 40(6): 1713-1727.
- [5] STEFANIA S, ISSAM T, MATTHEW B. LTE, the UMTS long term evolution: from theory to practice[M]. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- [6] FAN Y, THOMPSON J. MIMO configurations for relay channels: theory and practice[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(5): 1774-1786.
- [7] WANG B, ZHANG J, HOST-MADSEN A. On the capacity of MIMO relay channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(1): 29-43.
- [8] CHEN Shu-ping, WANG Wen-bo, ZHANG Xing. Ergodic and outage capacity analysis of cooperative diversity systems under rayleigh fading channels[C]//IEEE ICC Workshops 2009. Beijing, China: IEEE Communication Society, 2009: 1-5.
- [9] SHI J, MCKAY M R, CAI J Z, et al. Ergodic capacity analysis of amplify-and-forward MIMO dual-hop systems[C]//ISIT 2008. Toronto, Canada: IEEE Information Theory Society, 2008: 6-11.
- [10] 李汀, 杨绿溪. 一种多用户多中继MIMO通信系统迭代预编码方案[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(8): 1914-1918.
LI Ting, YANG Lu-xi. Iterative precoding for multiuser multi-relay MIMO system[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2009, 31(8): 1914-1918.
- [11] NATHAN L, SHLOMO S. Clustered local decoding for wyner-type cellular models[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(11): 4967-4985.
- [12] SIMEONE O, SOMEKH O, POOR H, et al. Local base station cooperation via finite-capacity links for the uplink of linear cellular networks[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2009, 55(1): 190-204.
- [13] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [14] 寇明延, 张登福, 徐志刚, 等. MIMO时分蜂窝系统混合协作上行性能研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(7): 1538-1542.
KOU Ming-yan, ZHANG Deng-fu, XU Zhi-gang, et al. Uplink performance of mimo TDMA cellular system with hybrid collaboration[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(7): 1538-1542.

编辑 黄 莘