论 文

协同多点传输中迫零预编码和天线选择技术

孟超, 梁天, 李欣, 蒋雁翔, 衡伟*

东南大学移动通信国家重点实验室, 南京 210096

* 通信作者. E-mail: wheng@seu.edu.cn

收稿日期: 2012-07-19; 接受日期: 2013-01-14

国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB316004)、国家科技重大专项 (批准号: 2012ZX03003013-004)、国家自然科学基金 (批准号: 61202448)、国家高技术研究发展计划 (批准号: 2012AA011401) 和东南大学移动通信国家重点实验室 2012 年度自主研究课题 (编号: 2012A02) 资助项目

摘要 MIMO 无线传输技术极大地提高了系统的容量. 在实际通信系统中, 整个网络是一个干扰受限的系统, 小区间干扰对 MIMO 系统传输的影响是显著的, 每个相邻小区的基站天线都可以看成一个干扰源. 由于基站端数据处理能力的提升和回程容量的增加, 多个小区协同多点传输技术引起了人们的广泛关注. 目前的大部分工作都是集中于研究系统的容量 (吞吐量), 而在实际系统中, 每个用户的接收等效信噪比 (即公平性) 对系统的性能如误帧率等有重要的影响. 对于每个用户为单天线的情形, 研究了总功率受限和每天线功率受限下采用迫零预编码的系统容量和公平性. 对两种功率约束条件下的公平性进行了分析, 得到了公平性算法的闭式表达式. 当每个用户为多天线的情形, 为了降低计算的复杂度, 引入了信道范数最大的接收天线选择算法, 把每个用户为多天线的情形转化成等效的每个用户单天线情形, 推导的每用户为单天线的公平性算法仍然适用. 仿真结果显示, 采用迫零预编码的多小区协作可以使系统性能显著提升. 在相同的迫零预编码下, 不同的功率分配策略对系统的容量和公平性有显著的影响. 和用户为单天线相比, 采用天线选择算法可以提升系统的容量和公平性. 考虑了用户公平性时的吞吐量和最大系统吞吐量之间的折中关系, 并给出了仿真结果.

关键词 干扰受限 协同多点传输 迫零预编码 公平性 功率分配 天线选择

1 引言

MIMO (multiple input multiple output) 技术利用多个发送和接收天线, 在不增加频谱资源和天线发送功率的情况下, 可以极大地提高系统的容量. 利用 MIMO 技术提高容量的同时, 还可以提高无线传输的可靠性, 降低误码率. 总的来说, MIMO 技术的研究历程大致遵从了从“单用户 — 多用户 — 多小区”这样一个主线.

单用户 MIMO, 也称为点对点 MIMO 或单链路 MIMO. MIMO 的基础性工作是在 20 世纪 90 年代由 AT&T Bell 实验室的学者完成的. 1995 年 Telatar^[1] 给出了衰落情况下的 MIMO 容量; 1996 年 Foschini^[2] 给出了对角的 Bell 实验室分层空时算法 (D-BLAST, diagonal-Bell labs layered space-time); 1998 年 Tarokh 等^[3,4] 给出了空时码的性能和构造. 单用户 MIMO 技术大致分为两类: 第一类是以获取高频谱效率为目的的空分复用系统, 最典型的是 V-BLAST 系统^[5]; 第二类是以提升系统性能为目的的多种空时编码技术, 如 STBC (space time block code) 和 STTC (space time trellis code).

引用格式: 孟超, 梁天, 李欣, 等. 协同多点传输中迫零预编码和天线选择技术. 中国科学: 信息科学, 2013, 43: 798–809

由于空间的限制, 移动终端一般只配置很少数量的天线, 如一根或两根, 这就极大地限制了实际网络中用户的容量. 多用户 MIMO 技术通过同时和多个用户进行通信, 可以有效地克服这个问题. 因此, 研究多用户 MIMO 在实际系统中的应用具有重要的意义. 多用户 MIMO 由于其特殊的空间信道结构, 其容量尤其是下行信道的容量与单天线相比有很大差别. 关于多用户信道容量方面的研究, 文献 [6,7] 做了很好的综述. 在文献 [8] 中, 作者证明了脏纸编码 (dirty paper coding) 可以达到高斯的多天线广播信道的容量域. 在文献 [9,10] 中, 作者证明了脏纸编码可以达到高斯的多天线广播信道的和容量. 由于脏纸编码算法具有极高的复杂度而实际上只提供了一种容量可达域的描述, 可以采用一些基于线性预编码的次优算法来实现系统容量和复杂度的折中.

蜂窝网络中 MIMO 技术的另一个重要扩展称之为多小区 MIMO, 也称为协同多点传输、网络 MIMO(networked MIMO)、基站协作或多小区处理 [11,12]. 在网络 MIMO 中, 多个基站相互协作与多个用户进行通信. 在这种方式下, 整个系统等效成一个虚拟的 MIMO 系统. 在理论上, 基站间充分协作, 网络 MIMO 可以完全消除其他小区的干扰, 把蜂窝网由于干扰受限的系统变为噪声受限的系统 [13,14]. 网络 MIMO 引起了广泛的关注, 被 3GPP, LTE-Advanced 看作一项关键技术, 称为 CoMP(coordinated multiple point transmission and reception). 对于上行链路, 协作的基站可通过多用户检测技术区分不同用户的信号. 在下行链路, 假设信道状态信息和所有的用户信息已知, 多个基站可联合设计下行预编码用来去除不同用户间的干扰.

由于脏纸编码算法具有极高的复杂度而实际上只提供了一种容量可达域的描述, 实际系统中可采用一些基于线性预编码的次优算法来计算系统的性能 [15,16]. 迫零预编码是一种比较常用的线性预编码, 和其他线性预编码相比具有较低的计算复杂度. 迫零预编码把多用户信道变成多个独立的子信道, 把系统设计变成了一个功率分配问题. 在高的信干噪比 SINR(signal to interference plus noise ratio) 区域使系统性能良好, 在用户充分多的情况下, 可以提供全部的自由度 [17]. 有很多关于迫零预编码研究的文献 [18~20], 大部分主要集中于关注系统的容量, 而在实际的系统中更关注系统的公平性, 最大化最小 SINR 是出于公平性的考虑, 即必须保证多个小区的大量用户的 QoS(quality of service) 指标. 为了简化系统的复杂度, 一般都假设发射端为总功率受限, 在实际系统中, 由于每个天线都有各自的放大器, 因此本文还考虑了更为实际的每天线功率受限的情形. 在用户为单天线的情形下, 本文分别研究了总功率受限 (total power constraint, TPC) 和每天线功率受限 (per-antenna power constraint, PAPC) 时系统的容量和公平性 (fairness). 在用户为多天线的情形下, 为降低复杂度, 本文采用基于信道范数最大的接收天线选择 (receive antenna selection, RAS) 算法. 天线选择算法的核心思想是使用有限数量的模拟链路自适应切换到可用天线的子集. 一个合适的天线子集可以通过训练序列得到. 这种方法能够以较低的附加成本提供一定的分集性能 [21].

本文结构安排如下: 第 2 节介绍了系统的基本模型, 第 3 节详细研究了各种约束条件下系统的容量和公平性, 第 4 节研究了天线选择算法, 第 5 节是仿真结果分析, 最后是结论.

2 系统模型和信道模型

2.1 系统模型

本文考虑一个由 K 个小区组成的多小区下行链路传输系统, 每个小区有一个基站, 每个基站具有相同的天线数目 N_t , 所有协作的基站的总天线数目为 $M = KN_t$. 本文假设每个小区只选择一个活跃的用户, 每个用户配置的天线数目为 N , $N = 1$ 表示每个用户配置的天线数目为 1. 基站间由光纤进

行连接, 假设收发端都知道完美的信道信息. 整个协作的多小区系统可以看作一个 MIMO 广播信道. 对于第 k 个用户, 其离散时间基带信道可表示为

$$y_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x} + z_k, \quad k = 1, \dots, K, \quad (1)$$

这里 $y_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 表示第 k 个用户的接收信号, $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{KN_t \times 1}$ 表示 K 个基站发送给用户的信号. $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{N \times KN_t}$ 表示从所有 K 个基站的天线到第 k 个用户的下行链路信道. z_k 表示零均值, 单位方差的复高斯噪声采样. 为了简化, 本文利用下面的矩阵形式表示:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{z}, \quad (2)$$

这里 $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_K]^T$, $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1^H, \dots, \mathbf{H}_K^H]^H$, $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_{KN_t}]^T$, $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_K]^T$. 本文假设 $KN \leq KN_t$, 即总的接收天线数目不大于总的发射天线数目.

假设传给 K 个用户的信息符号为 s , 迫零预编码矩阵为 $\mathbf{T}$, 则有

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \mathbf{T} \mathbf{s} + \mathbf{z}. \quad (3)$$

对单天线用户系统, 长度为 K 的信息符号矢量满足 $E[\mathbf{s} \mathbf{s}^H] = \mathbf{I}$. 这里本文采用比较常用的迫零预编码矩阵, 即信道的伪逆矩阵:

$$\mathbf{H}^\dagger = \mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H)^{-1}. \quad (4)$$

这种迫零预编码算法是标准的次优算法, 可以提供性能和复杂度之间的折中. 利用矩阵表示, 迫零预编码和信道矩阵满足条件

$$\mathbf{H} \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sqrt{p_1} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{p_K} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$p_k, k = 1, \dots, K$ 表示第 k 个用户的接收的 SINR, $\sqrt{\mathbf{p}} = [\sqrt{p_1}, \dots, \sqrt{p_K}]^T$. 迫零预编码简化了系统的设计, 把多个用户的聚合信道变成 K 个独立的标量子信道

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{p_1} s_1 \\ \vdots \\ \sqrt{p_K} s_K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_K \end{bmatrix}. \quad (6)$$

对于总功率受限的系统, 预编码矩阵的设计满足如下条件:

$$E[\|\mathbf{x}\|^2] = \mathbf{T} \mathbf{r}[\mathbf{T} \mathbf{T}^H] = \|\mathbf{T}\|_F^2 \leq P, \quad (7)$$

这里 $P > 0$. 从后面可以看出, 总功率受限使系统设计问题简化, 使预编码更加简单有效. 但在实际系统中, 更多的系统服从每天线功率受限的条件

$$E[|x_n|^2] = [\mathbf{T} \mathbf{T}^H]_{n,n} \leq \frac{P}{KN_t}, n = 1, \dots, KN_t. \quad (8)$$

公式 (7) 和 (8) 分别表示了总功率受限和每天线功率受限的功率约束条件, 预编码矩阵为统一的伪逆迫零预编码. 为了形成优化问题, 本文还需要确定目标函数, 在这里, 本文分别考虑了系统的容量和公平性 (即最大化用户的最小接收 SINR).

2.2 信道模型

无线通信系统的性能主要受到无线信道的制约. 在移动无线传输中, 无线传输可分为 3 个独立的部分: 与距离有关的路径损耗, 对数正态阴影衰落, 小尺度衰落. 通过对上述 3 种成分合并, 本文建立宏小区的信道模型. 假设无线信道经历频率平坦衰落. 严格意义上讲, 无线信道都是频率选择性的. 尽管如此, 在 OFDM 中, 可假设每个子载波经历平坦衰落. 在一定时间间隔内, 衰落系数保持准静态, 在不同模块间变化独立^[22]. 因此, 从用户 k 到基站 n 的无线信道可表示为 $N \times N_t$ 的随机矩阵:

$$H_{n,k} = \sqrt{cd_{n,k}^{-\alpha}s_{n,k}}W_{n,k}. \quad (9)$$

$cd_{n,k}^{-\alpha}$ 表示路径损耗. $d_{n,k}$ 表示用户 k 到基站 n 的距离, α 是路径损耗指数, α 的典型值为 $\alpha \in [3, 5]$. c 为传播常数.

$s_{n,k}$ 表示方差为 σ_{sh}^2 的对数正态阴影分布, 即

$$10 \log_{10}(s_{n,k}) \sim N(0, \sigma_{sh}^2). \quad (10)$$

$W_{n,k} \in \mathbb{C}^{N \times N_t}$ 表示小尺度衰落, $W_{n,k}$ 的元素为零均值单位方差的独立同分布循环对称复高斯随机变量.

假设 $d_{n,k}$, $s_{n,k}$ 和矩阵 $W_{n,k}$ 对所有的 n, k 是相互独立的.

3 不同约束条件下的系统性能

为了降低分析和系统的复杂度, 本节考虑每个用户的接收天线为单天线的情形. 分别就不同功率约束条件下采用迫零预编码算法的吞吐量和公平性进行了研究.

3.1 吞吐量

3.1.1 总功率受限的吞吐量性能

在总功率受限下的迫零预编码吞吐量问题引起了广泛的研究. 在迫零预编码矩阵为信道的伪逆矩阵, 约束条件为总功率受限, 目标函数为系统的和吞吐量的优化问题可以表达如下:

$$\begin{aligned} \max_{p \geq 0, T} \quad & \sum_k \log(1 + p_k), \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{H}\mathbf{T} = \text{diag}(\sqrt{\mathbf{p}}), \\ & \text{Tr}[\mathbf{T}\mathbf{T}^H] \leq P. \end{aligned} \quad (11)$$

当 $\mathbf{T} = \mathbf{H}^\dagger \text{diag}(\sqrt{\mathbf{p}}) = \mathbf{H}^H(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \text{diag}(\sqrt{\mathbf{p}})$ 时, 公式 (11) 可进一步表示为

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_k \log(1 + p_k), \\ \text{s.t.} \quad & \sum_k p_k [(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1}]_{k,k} \leq P, \\ & p_k > 0. \end{aligned} \quad (12)$$

上式是一个标准的凸优化问题, 可以通过注水算法求得系统的最大吞吐量^[1,23]. 注水算法在很多文献里反复出现, 这里不再介绍.

3.1.2 每天线功率受限的吞吐量性能

现在考虑约束条件为每天线功率受限下目标函数为吞吐量的情形^[24].

$$\begin{aligned} \max_{p \geq 0, \mathbf{T}} \quad & \sum_k \log(1 + p_k), \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{HT} = \text{diag}(\sqrt{\mathbf{p}})\mathbf{m} \\ & [\mathbf{TT}^H]_{n,n} \leq \frac{P}{KN_t}, \quad n = 1, \dots, KN_t. \end{aligned} \quad (13)$$

由于功率分配 p 带有根号, 这是一个非凸的优化问题, 直接求目标函数有一定的难度. 为了求出问题的解, 由 $\sqrt{\mathbf{p}} = [\sqrt{p_1}, \dots, \sqrt{p_K}]^T$, $\mathbf{T} = \mathbf{H}^\dagger \text{diag}(\sqrt{\mathbf{p}})$. 公式 (13) 可简化为

$$\begin{aligned} \max_{p \geq 0} \quad & \sum_k \log(1 + p_k), \\ \text{s.t.} \quad & [\mathbf{H}^\dagger \text{diag}(\mathbf{p})(\mathbf{H}^\dagger)^H]_{n,n} \leq \frac{P}{KN_t}, \quad n = 1, \dots, KN_t. \end{aligned} \quad (14)$$

公式 (14) 可进一步写成

$$\begin{aligned} \max \quad & \log \det(\mathbf{I} + \text{diag}(\mathbf{p})) \\ \text{s.t.} \quad & \left[\mathbf{H}^\dagger \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & p_K \end{bmatrix} (\mathbf{H}^\dagger)^H \right]_{n,n} \leq \frac{P}{KN_t}, \quad n = 1, \dots, KN_t, \\ & p_k > 0. \end{aligned} \quad (15)$$

公式 (15) 为一个行列式最大化问题, 约束条件服从线性矩阵不等式, 可使用标准的优化工具包进行优化, 这里使用 YALMIP 工具包进行计算^[25].

3.2 公平性

上一小节本文讨论了使用迫零预编码算法, 在总功率受限和每天线功率受限时系统的吞吐量. 吞吐量为本文衡量一个系统提供了重要的性能指标. 而在实际的传输系统中更关注系统的公平性, 最大化最小 SINR 是出于公平性的考虑, 即必须保证多个小区的大量用户的 QoS(quality of service) 指标.

3.2.1 总功率受限的公平性

用迫零预编码算法, 总功率受限的系统公平性可表示为

$$\begin{aligned} \max_{p \geq 0, \mathbf{T}} \quad & \min_k p_k, \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{HT} = \text{diag}(\sqrt{\mathbf{p}}), \\ & \text{Tr}[\mathbf{TT}^H] \leq P. \end{aligned} \quad (16)$$

由 $\mathbf{T} = \mathbf{H}^\dagger \text{diag}(\sqrt{\mathbf{p}}) = \mathbf{H}^H(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \text{diag}(\sqrt{\mathbf{p}})$, 公式 (16) 可进一步写为

$$\begin{aligned} \max \quad & \min_k p_k, \\ \text{s.t.} \quad & \sum_k p_k [(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1}]_{k,k} \leq P, \\ & p_k > 0. \end{aligned} \quad (17)$$

上式是一个标准的最大化最小值问题, 由于约束条件是线性的, 最大化最小值问题就变成了凸优化问题^[26]. 上式的凸优化问题对任何的预编码矩阵都成立, 当预编码矩阵为信道的伪逆矩阵时, 由于不同用户的 SINR 大小各不相同, 要使用户的最小的 SINR 最大化, 就要使不同用户的 SINR 差异在约束条件下尽量小, 使所有用户的 SINR 相等可以得到公式 (17) 的闭式解. 因此求得满足公平性准则的 SINR 为

$$p^* = \frac{P}{\sum_k [(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1}]_{k,k}}. \quad (18)$$

对应的每个用户的吞吐量可表示为 $r^* = \log_2(1 + p^*)$.

3.2.2 每天线功率受限的公平性

与总功率受限的公平性类似, 每天线功率受限的公平性可表示为

$$\begin{aligned} & \max_{p \geq 0, T} \quad \min_k p_k, \\ & \text{s.t.} \quad \mathbf{H}\mathbf{T} = \text{diag}(\sqrt{\mathbf{p}}) \\ & \quad [\mathbf{T}\mathbf{T}^H]_{n,n} \leq \frac{P}{KN_t}, \quad n = 1, \dots, KN_t. \end{aligned} \quad (19)$$

把约束条件进一步简化有

$$\begin{aligned} & \max \quad \min_k p_k, \\ & \text{s.t.} \quad \left[\mathbf{H}^\dagger \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & p_K \end{bmatrix} (\mathbf{H}^\dagger)^H \right]_{n,n} \leq \frac{P}{KN_t}, \quad n = 1, \dots, KN_t, \\ & \quad p_k > 0. \end{aligned} \quad (20)$$

当预编码矩阵为信道的伪逆矩阵时, 使所有用户的 SINR 相等可以得到公式 (20) 的闭式解. 公式 (20) 进一步简化为

$$\begin{aligned} & \max \quad \min_k p_k, \\ & \text{s.t.} \quad p_k [\mathbf{H}^\dagger (\mathbf{H}^\dagger)^H]_{n,n} \leq \frac{P}{KN_t}, \quad n = 1, \dots, KN_t, \\ & \quad p_k > 0. \end{aligned} \quad (21)$$

因此求得满足公平性准则的 SINR 为

$$p^* = \frac{P}{KN_t \max_n [\mathbf{H}^\dagger (\mathbf{H}^\dagger)^H]_{n,n}}, \quad (22)$$

对应的每个用户的吞吐量可表示为 $r^* = \log_2(1 + p^*)$.

4 天线选择算法

在用户为单天线的情形下, 本文分别研究了总功率受限和每天线功率受限下系统的容量和公平性. 在用户为多天线的情形下, 为降低复杂度, 本文采用基于子信道范数最大的接收天线选择算法. 天线

图 1 多小区多用户 MIMO 系统

Figure 1 A multicell multi-user MIMO system

选择算法的核心思想是使用有限数量的模拟链路自适应切换到可用天线的子集. 一个合适的天线子集可以通过训练序列得到. 这种方法能够以较低的附加成本提供一定的分集性能^[21].

当用户 k 有 N 个接收天线时, 假设基站的每个天线发射相同的导频功率, 用户 k 选择信道实现最强的天线, 当选择的天线为第 m 根天线时, 满足如下条件:

$$m = \arg \max_i \frac{|h_{k,i}|^2}{\sigma_k^2}, \quad (23)$$

这里 $h_{k,i}$ 表示协作基站的发送天线到用户 k 的第 i 根天线对应的信道, σ_k^2 表示用户 k 的第 i 根天线对应的噪声功率. 每个用户通过天线选择技术, 从中选择信道范数最大的子信道所对应的天线, 这样把用户为多天线的情形转化为用户天线等效为单天线的情形, 简化了系统计算的复杂度, 而系统的性能比单天线有一定的提高. 然后可以分别分析天线选择后总功率受限和每天线功率受限时系统的吞吐量和公平性, 计算方法如第 3 节分析的单天线情形, 这里不再重复.

5 仿真分析

考虑一个实际的三小区系统, 如图 1 所示, 每个小区有一个基站, 每个基站的发射天线为 2, 三个基站工作在相同的频率. 每个小区内活跃的用户数为 1, 每个用户的天线数为 1, 这个系统可表示为 (2,1,3,3). 在进行接收天线选择时, 假设每个用户有两根接收天线. 小区半径为 $R = 500$ m, 表示城市场景. 假设每个小区的用户均匀分布在图 1 虚线所示的协作区域内. 假设传输常数 $c = 1.35 \times 10^8$, 路径损耗指数 $\alpha = 3$, 对数正态分布阴影衰落的标准方差 $\sigma_{sh} = 8$ dB. 本文对每一种实现进行 Monte Carlo 仿真.

图 2 显示了在不同情形下各种算法的吞吐量性能随功率变化的情况. 上面的 4 条曲线从上到下分别为: 总功率受限条件进行接收天线选择情况后的迫零预编码和功率分配算法, 总功率受限条件单天线用户的迫零预编码和功率分配算法, 每天线功率受限进行接收天线选择后的迫零预编码和功率分

图 2 不同情形下系统的容量与功率的关系

Figure 2 Throughput vs. Power in different case

图 3 不同情形下满足公平性准则的 SINR 与功率的关系

Figure 3 Fairness SINR vs. Power in different case

配算法, 每天线功率受限单天线用户的迫零预编码和功率分配算法. 作为比较, 本文给出了两种参考, 一种是单个小区的用户在没有任何干扰条件下的所能达到的容量, 这是单小区用户速率性能的上界, 另一种是一个小区有两个相邻小区为同频干扰时用户的速率. 由仿真结果可以看出, 三小区使用相同的频率时, 随着基站发射功率的增大, 用户的性能没有什么变化, 这主要是由于系统受相邻小区干扰的影响, 由噪声受限的系统变成了干扰受限的系统. 当三个小区进行协作时, 通过预编码矩阵可以去除小区之间的干扰, 使协作的小区由干扰受限的系统变为噪声受限的系统, 系统的性能都比不协作时有了很大的提升, 进行协作的每个小区的平均吞吐量性能都超过了单个小区的吞吐量性能上界. 由图中可以看出, 在相同的天线策略下, 总功率受限的性能总是好于每天线功率受限的性能. 另外, 在相同的功率约束条件下, 基于信道范数最大的接收天线选择的性能总是优于单天线用户时的性能, 这是由于进行接收天线选择算法时, 发送端总是选择信道条件好的信道进行传输, 会提高系统的信道增益. 当多个小区进行协作时, 系统由干扰受限的系统变为噪声受限的系统, 无论采用上述何种算法, 系统的吞吐量性能都随着发送功率的增加而增加. 图 3 给出了有无天线选择和不同功率约束条件下满足公平

图 4 用户公平性的吞吐量和最大系统吞吐量的折中关系

Figure 4 The tradeoff between user' fairness throughput and maximal system throughput

图 5 基于天线选择的用户公平性的吞吐量和最大系统吞吐量的折中关系

Figure 5 The tradeoff between user' fairness throughput and maximal system throughput for antenna selection

性准则的 SINR 随发送功率的变化情况. 通过预编码和功率分配, 对信道条件好的用户分配较少的功率, 给信道条件差的用户分配较多的功率, 这样可使距离基站不同距离的用户的接收 SINR 差距减小, 提高能量的使用效率.

同图 2 类似, 图 3 所示的满足公平性准则的 SINR 在相同的功率约束条件下接收天线选择算法的性能要优于单天线用户时的性能. 4 种情况下的满足公平性准则的 SINR 都随着发送功率的增加而增加, 这和图 2 的情形是一致的, 充分说明了系统由于干扰受限的系统变成了噪声受限的系统, 显示了协作的巨大优势.

图 4 显示了用户为单天线时在总功率受限和每天线功率受限条件下, 考虑用户公平性时的吞吐量和系统最大化吞吐量之间的折中关系; 图 5 显示了用户端为多天线, 采用接收天线选择算法, 在总功率受限和每天线功率受限条件下, 基于用户公平性时的吞吐量和系统最大化吞吐量之间的折中关系. 从图 4 和 5 可以看出, 无论是否采用天线选择算法, 在两种功率约束条件下, 考虑用户公平性的吞吐

量都要比系统的最大化吞吐量小. 如图 4 所示, 在总功率受限时, 考虑用户公平性的吞吐量要比系统的最大化吞吐量低约 2 bits/s/Hz/cell. 这是由于目标函数不同时, 功率的分配方式也不同.

6 结论

本文研究了多小区协作中的迫零预编码和接收天线选择技术. 在用户为单天线的情况下, 研究了不同功率约束条件下发送端进行迫零预编码和功率分配技术, 除了研究常用的性能指标容量, 还研究了具有实际意义的满足公平性准则的 SINR 性能. 在用户天线为多天线的情形, 基于接收天线选择算法后对系统的两种性能进行了研究. 从仿真结果的分析中可知, 系统的功率约束条件对系统的性能有重要的影响, 采用相同的接收天线选择算法, 总功率受限的系统的性能指标总是分别好于每天线功率受限的性能指标. 考虑了用户公平性时的吞吐量和最大系统吞吐量之间的折中关系.

参考文献

- 1 Telatar E. Capacity of mulit-antenna Gaussian channels. *Europ Trans Telec*, 1999, 10: 585–595
- 2 Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell Labs Tech J*, 1996. 41–59
- 3 Tarokh V, Seshadri N, Calderbank A R. Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction. *IEEE Trans Info Theory*, 1998, 44: 744–765
- 4 Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time block coding for wireless communications: performance results. *IEEE J Sel Areas Commun*, 1999, 17: 451–460
- 5 Wolniansky P W, Foschini G J, Golden G D, et al. V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel. In: *URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics*. Pisa, 1998. 295–300
- 6 Goldsmith A, Jafar S A, Jindal N, et al. Capacity limits of MIMO channels. *IEEE J Sel Area Commun*, 2003, 21: 684–702
- 7 Spencer Q H, Swindlehurst A L, Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels. *IEEE Trans Signal Proc*, 2004, 52: 461–471
- 8 Weingarten H, Steinberg Y, Shamai S. The capacity region of the Gaussian multiple-input multiple-output broadcast channel. *IEEE Trans Inf Theory*, 2006, 52: 3936–3964
- 9 Vishwanath S, Jindal N, Goldsmith A. Duality, achievable rates, and sum-rate capacity of Gaussian MIMO broadcast channels. *IEEE Trans Inf Theory*, 2003, 49: 2658–2668
- 10 Yu W, Cioffi J M. Sum capacity of Gaussian vector broadcast channels. *IEEE Trans Inf Theory*, 2004, 50: 1875–1892
- 11 Somekh O, Benjamin M Z, Shamai S. Sum rate characterization of joint multiple cell-site processing. *IEEE Trans Inf Theory*, 2007, 53: 4473–4497
- 12 Jafar S A, Foschini G J, Goldsmith A J. PhantomNet: exploring optimal multicellular multiple antenna systems. In: *Vehicular Technology Conference Birmingham*, 2002, 1. 261–265
- 13 Somekh O, Zaidel B M, Shamai S. Sum rate characterization of joint multiple cell-site processing. *IEEE Trans Inf Theory*, 2007, 53: 4473–4497
- 14 Gesbert D, Hanly S, Huang H, et al. Multi-cell MIMO cooperative networks: a new look at interference. *IEEE J Sel Area Commun*, 2010, 28: 1380–1408
- 15 Choi L U, Murch R D. A transmit preprocessing technique for multiuser MIMO systems using a decomposition approach. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2004, 3: 20–24
- 16 Serbetli S, Yener A. Beamforming and scheduling strategies for time slotted multiuser MIMO systems. In: *Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. California, 2004. 1227–1231

- 17 Caire G, Shamai S. On the achievable throughput of a multiantenna Gaussian broadcast channel. *IEEE Trans Inf Theory*, 2003, 49: 1691–1706
- 18 Zhang H, Dai H. Cochannel interference mitigation and cooperative processing in downlink multicell multiuser MIMO networks. *EURASIP J Wirel Commun Netw*, 2004, 2004: 222–235
- 19 Karakayali M K. Network coordination for spectrally efficient communications in cellular systems. *IEEE Wirel Commun Mag*, 2006, 13: 56–61
- 20 Wiesel A, Eldar Y C, Shamai S. Zero-Forcing Precoding and Generalized Inverses. *IEEE Trans Signal Proc*, 2008, 56: 4409–4418
- 21 Gorokhov A, Gore D A, Paulraj A J. Receive antenna selection for MIMO spatial multiplexing: theory and algorithms. *IEEE Trans Signal Proc*, 2003, 51: 2796–2807
- 22 You X, Wang D, Zhu P, et al. Cell edge performance of cellular mobile systems. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2011, 29: 1139–1150
- 23 Cover T, Thomas J. *Elements of Information Theory*. New York: Wiley, 1998
- 24 Zhang R. Cooperative multi-cell block diagonalization with per-base-station power constraints. *IEEE J Sel Area Commun*, 2010, 28: 1435–1445
- 25 Lofberg J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In: *IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design*. Taipei, 2004. 284–289
- 26 Boyd S, Vandenberghe L. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004

Zero-forcing precoding and antenna selection research for coordinated multiple point transmission

MENG Chao, LIANG Tian, LI Xin, JIANG YanXiang & HENG Wei*

National Mobile Communication Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China

*E-mail: wheng@seu.edu.cn

Abstract Communication system capacity is greatly improved by multiple input multiple output (MIMO) wireless transmission technology. In a commercial cellular system, the entire network is essentially an interference-limited system. While the problem of other-cell interference (OCI) is inherent in cellular systems, its affect on MIMO transmission is more significant, because each neighboring base station (BS) antenna element can act as a unique interfering source. Because of the fast improvement in processing capability at BSs and the increase in the backhaul capacity, coordinated multi-cell MIMO communications with cooperative processing among BSs have attracted a significant amount of interest in recent years. Most of the current work is focused on the study of system capacity, but the equivalent SNR of each user (i.e., fairness) has an important influence on system performance, such as the frame error rate. Considering the single antenna configuration for the user, the system capacity and fairness based on a zero-forcing precoding design are studied in the case of the total power and per antenna power constraints. The fairness is analyzed for the two types of power constraints, and a closed solution is given. Considering the multiple antenna configuration for the user, the receive antenna selection algorithm, which maximizes the channel norm, is used to reduce the computational complexity. Thus the case for the user with a multiple antenna configuration is transformed into the case for the user with a single antenna configuration, The fairness algorithm for the user with a single antenna is still applicable. The simulation results show that multi-cell collaboration with zero-forced precoding can significantly improve system performance. In the same zero-forced precoding, different power allocation strategies have a significant affect on system capacity and fairness. Compared with the user with a single antenna, the antenna selection algorithm can enhance system capacity and fairness. The tradeoff between user fairness throughput and maximum system throughput is considered, and simulation

results are also given.

Keywords interference-limited, coordinated multiple point transmission, zero-forcing precoding, fairness, power allocation, antenna selection

MENG Chao was born in 1981. He received his M.S. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2008. Currently, he is pursuing a Ph.D. degree at the National Mobile Communications Research Laboratory at Southeast University. His research interests include coordinated multiple point transmission and energy efficiency.

LIANG Tian was born in 1984. He received his M.S. degree from Nantong University in 2011. Currently, he is pursuing a Ph.D. degree at the National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University. His research interests include wireless sensor networks and evolutionary algorithms.

JIANG YanXiang was born in 1977. He received his B.S. degree in electrical engineering from Nanjing University, Nanjing, China, in 1999, and his M.E. and Ph.D. degrees in radio engineering from Southeast University, Nanjing, China, in 2003 and 2007. Currently, he is working at the National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing, China, as an Associate Professor. He received the NJU excellent graduate honor from Nanjing University in 1999. His research interests include mobile communications, wireless signal processing, parameter estimation, synchronization, signal design, and digital implementation of communication systems.

HENG Wei was born in 1965. He received his B.S. degree in information engineering from Huazhong University of Science and Technology in 1987, a M.S. degree in 1990 in signal and information processing, and a Ph.D. degree in 1997 in communication and information systems both from Southeast University. From 1997 to 2002, he was a research scholar at the Catholic University of America. Since 2002, he has been a professor at the National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University. His research interests include mobile communications and signal processing.