

基于多小区协作分布式波束选择算法^①

雷 俊^② 肖立民 李云洲 石明军 姚 彦

(清华大学电子工程系微波与数字通信技术国家重点实验室,清华信息科学与技术国家实验室 北京 100084)

摘 要 针对多天线蜂窝系统中小区间干扰带来的性能损失,研究了使用多小区协作波束选择来减少小区间干扰,提出了可在各个小区独立实现的分布式波束选择算法。该算法首先使小区之间相互交换用户的信道状态信息,之后每个小区基于本小区以及邻小区用户的信道状态信息来估计所有用户的信干噪比,最后选择能够最大化信干噪比乘积的波束。分析表明,在两小区模型下该算法的性能接近最优波束选择算法,同时复杂度大大降低。经仿真结果验证,在多天线蜂窝系统中使用分布式波束选择算法,可以在不影响用户公平性的基础上显著提高系统平均速率。

关键词 无线通信,多天线蜂窝系统,小区间干扰,多小区协作,分布式波束选择

0 引 言

在多天线的通信系统中,如果发送端可以获得信道状态信息,那么通过预编码可以显著提高系统性能^[1]。此时可使用波束成型的预编码方案,此方案实现复杂度较低,在空间相关性较强的情况下接近或达到最优性能^[2, 3],因此对波束成型的优化设计成为近年来的研究热点之一^[4, 5]。为了降低计算波束成型发送向量(以下简称波束)的复杂度,可以事先生成包含多个波束的码本,该码本不仅用作量化待反馈的信道状态信息,而且基站也根据一定的准则从码本中选择合适的波束,从而将波束计算问题转为波束选择问题^[6]。

在单小区多天线系统中,最优的波束选择算法(以下简称信道匹配算法)选择与用户信息最匹配的波束,从而最大化有用信号功率^[7]。但是在由多个小区组成的多天线蜂窝系统中,与本小区用户信道匹配的波束可能对邻小区用户造成较大的干扰,从而会降低整个系统的性能^[8],因此信道匹配算法并不适合多天线蜂窝系统。为了降低小区间干扰,提高系统性能,本文提出了通过多小区协作进行波束选择的思想,并且针对最优协作波束选择算法的高复杂度问题,提出了一种具有低复杂度的可在各个

小区独立实现的分布式协作波束选择算法,并对该算法的性能和复杂度进行了分析,用仿真实验验证了该算法在不同系统模型下的性能。

1 系统模型

本文所考虑的蜂窝系统由 N 个小区组成,其中每个小区包括一个装有 M 根发送天线的基站和 K 个单天线用户。经过系统调度后,第 i 个小区在任一资源块上只服务一个用户,为了简化符号,将此用户也记为 i 。

考虑下行传输,基站 i 向用户 i 发送功率为 P_i 的信息符号 s_i ,该符号在发送之前通过 $M \times 1$ 维波束成型向量 $\mathbf{w}_i$ (以下简称波束)加权,为了满足发射功率约束,需要对波束功率进行归一化,即 $\|\mathbf{w}_i\| = 1, i = 1, \dots, N$,其中 $\|\cdot\|$ 为欧式范数。系统使用的波束从包含 L 个波束的码本 $\mathbf{W}$ 中选择, $\mathbf{W}$ 在系统初始化时随机生成。

基于以上系统模型,用户 j 收到的基带信号可以表示为

$$y_j = \sqrt{\alpha_{jj}} \mathbf{h}_{jj}^H \mathbf{w}_j s_j + \sum_{i=1, i \neq j}^N \sqrt{\alpha_{ij}} \mathbf{h}_{ij}^H \mathbf{w}_i s_i + n_j \quad (1)$$

其中 α_{ij} 是基站到用户 j 的长期平均功率衰减因子(包括路径损耗、阴影衰落等因素的影响), $\mathbf{h}_{ij}$ 是基

① 863 计划(2006AA01Z274),国家重点基础研究发展规划(2007CB310608),新世纪优秀人才支持计划和清华-高通联合研究计划资助项目。

② 男,1977 年生,博士生;研究方向:无线通信;联系人,E-mail:leij03@mails.tsinghua.edu.cn
(收稿日期:2008-12-22)

站 i 到用户 j 的 $M \times 1$ 维信道向量,包含了小尺度衰落的影响, n_j 为满足零均值循环复高斯分布的加性噪声项,其方差为 σ^2 , 记为 $n_j \sim CN(0, \sigma^2)$ 。定义 $P_{ij} = P_i \alpha_{ij}$ 为用户 j 接收到来自基站 i 信号的长期平均功率,则用户 j 的信干噪比为

$$\Gamma_j = \frac{P_{jj} |\mathbf{h}_{jj}^H \mathbf{w}_j|^2}{\sum_{i=1, i \neq j}^N P_{ij} |\mathbf{h}_{ij}^H \mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2} \quad (2)$$

在频分双工系统中,用户需要将信道状态信息量化后反馈给基站。这里使用基于码本的量化方案,用户反馈与其信道内积最大的波束,用户 i 向基站 i 反馈的信道状态信息 ($\hat{\mathbf{h}}_{ii}$) 表示为

$$\hat{\mathbf{h}}_{ii} = \underset{\mathbf{w}_k \in \mathcal{W}}{\operatorname{argmax}} |\mathbf{h}_{ii}^H \mathbf{w}_k|, \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (3)$$

2 波束选择算法

2.1 信道匹配波束选择算法

如果各个基站只有本小区用户的信道状态信息,那么只能使用与单小区系统中相同的波束选择策略,即选择与本小区用户信道最匹配的波束^[7],其算法简称信道匹配算法,如式

$$\mathbf{w}_i^* = \underset{\mathbf{w}_i \in \mathcal{W}}{\operatorname{argmax}} |\hat{\mathbf{h}}_{ii}^H \mathbf{w}_i|, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

所示。其中 $\mathbf{w}_i^*$ 为基站 i 最终所选择的波束。

信道匹配算法可以最大化有用信号功率以及信噪比,因此在单小区系统中或者不考虑干扰的情况下是最优的选择。但是在多小区系统中,与本小区用户信道最匹配的波束可能对其他小区的用户造成较大的干扰,从而降低系统的整体性能。因此信道匹配算法在多小区环境下不再是最优选择。

2.2 最优多小区协作波束选择算法

信道匹配算法的缺点是在选择波束时没有考虑可能造成的小区间干扰,如果基站之间通过交换获取了其它小区中用户的信道信息,并且利用这些信息进行多小区协作波束选择,就可以在增加有用信号功率和降低对其它小区的干扰之间进行折中,从而提高系统性能。

最优多小区协作波束选择问题可以描述为

$$(\mathbf{w}_1^*, \dots, \mathbf{w}_N^*) = \underset{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_N, \mathbf{w}_k \in \mathcal{W}}{\operatorname{argmax}} U(\Gamma_1, \dots, \Gamma_N) \quad (5)$$

$U(\Gamma_1, \dots, \Gamma_N)$ 为优化的目标函数。本文中使用的目标函数为系统和速率,即

$$(\mathbf{w}_1^*, \dots, \mathbf{w}_N^*) = \underset{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_N, \mathbf{w}_k \in \mathcal{W}}{\operatorname{argmax}} \sum_{i=1}^N \log(1 + \Gamma_i) \quad (6)$$

另外一个重要的系统指标——公平性可以通过比例公平^[9]或速率公平等调度算法实现。

根据式(2),每一个用户得到的信干噪比都与所有小区的波束选择结果相关,因此满足式(6)中的最优波束选择算法(以下简称最优算法)是对所有波束组合进行穷举搜索,找到最大化和速率的波束组合。由于需要搜索 L^N 种波束组合,当 L 或 N 较大时,最优算法的复杂度非常高,很难在实际系统中使用。因此有必要研究一种具有低复杂度的替代算法。

2.3 分布式波束选择算法

本文提出一种新的波束选择算法,该算法可在系统中各个基站上独立实现,由于该算法具有分布式特性,因此能够在提高系统性能的同时保持相对较低的复杂度。

根据前面的分析,式(6)的求解之所以比较复杂,主要是因为系统中所有小区的波束选择是相互耦合在一起的,任何一个小区的选择变化都会影响到系统和速率,从而影响到其他小区的选择结果。最终只能进行高复杂度的穷举搜索来寻找最优解。为了降低复杂度,需要对优化问题进行解耦,使得各个小区可以独立地进行波束选择。

对式(6)中的优化问题进行解耦的关键是重新设计目标函数:一方面,新的目标函数应该尽量趋近于系统和速率,从而保证波束选择结果能够提高系统和速率(但可能无法达到最优的系统 and 速率);另一方面,每一个小区都应该有自己的目标函数,而且此目标函数与其它小区的优化过程和结果无关。

基于以上的分析,本文提出以下的多小区协作分布式波束选择算法(简称分布式算法)。

基于一定的信道状态信息,每个基站独立地根据以下的准则进行波束选择:

$$\mathbf{w}_i^* = \underset{\mathbf{w}_i \in \mathcal{W}}{\operatorname{argmax}} \left(\prod_{j=1}^N \hat{\Gamma}_{ij} \right), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

其中 $\hat{\Gamma}_{ij}$ 为基站 i 对用户 j 信干噪比的估计值,定义如下:

$$\hat{\Gamma}_{ii} = \frac{P_{ii} |\hat{\mathbf{h}}_{ii}^H \mathbf{w}_i|^2}{\sum_{k=1, k \neq i}^N P_{ki} + \sigma^2}$$

$$\hat{\Gamma}_{ij} = \frac{P_{ij}}{\sum_{k=1, k \neq i, k \neq j}^N P_{kj} + P_{ij} |\hat{\mathbf{h}}_{ij}^H \mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2}, \quad j \neq i \quad (8)$$

首先,该算法需要多小区协作来取得邻小区用户的信道状态信息,可能的方法包括邻小区用户直

接反馈或者基站间交换信息。在取得需要的信道状态信息后,各个基站只利用自己所选择的波束来独立地估计其它小区用户的信干噪比,最后选择能够最大化信干噪比(估计值)乘积的波束。

为了降低分布式算法的反馈量,对式(8)进行如下变换:

$$\hat{\Gamma}_{ii} = \frac{P_{ii} |\hat{\mathbf{h}}_{ii}^H \mathbf{w}_i|^2}{\sum_{j=1, j \neq i}^N P_{jj} + \sigma^2} = \bar{\Gamma}_i |\hat{\mathbf{h}}_{ii}^H \mathbf{w}_i|^2 \quad (9)$$

$$\hat{\Gamma}_{ij} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{\Gamma}_j} + \frac{P_{ij}}{P_{jj}} (|\hat{\mathbf{h}}_{ij}^H \mathbf{w}_i|^2 - 1)} \quad (10)$$

其中 $\bar{\Gamma}_i$ 为用户 i 的长期信干噪比,定义如下:

$$\bar{\Gamma}_i = \frac{P_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N P_{jj} + \sigma^2} \quad (11)$$

在实际蜂窝系统中使用分布式波束选择算法时,还可以设置一定的长期平均接收信号功率阈值。如果 P_{ij} 低于此阈值,则说明基站 i 对用户 j 的干扰较小,所以基站 i 在选择波束时不用计算 $\hat{\Gamma}_{ij}$,而用户 j 也无需向基站 i 反馈信息,从而可以进一步减少计算复杂度和反馈量。

2.4 算法性能和复杂度分析

为了对分布式算法性能进行初步分析,首先考虑 $N = 2$ 的情况。忽略式(7)优化目标中一些与波束无关的量之后,分布式算法可以写成以下形式:

$$\begin{aligned} (\mathbf{w}_1^*, \mathbf{w}_2^*) &= \underset{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2 \in \mathcal{W}}{\operatorname{argmax}} \{ \hat{\Gamma}_{11} \hat{\Gamma}_{12} \hat{\Gamma}_{21} \hat{\Gamma}_{22} \} \\ &= \underset{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2 \in \mathcal{W}}{\operatorname{argmax}} \left\{ \frac{P_{11} |\hat{\mathbf{h}}_{11}^H \mathbf{w}_1|^2}{P_{21} |\hat{\mathbf{h}}_{21}^H \mathbf{w}_1|^2 + \sigma^2} \times \frac{P_{22} |\hat{\mathbf{h}}_{22}^H \mathbf{w}_2|^2}{P_{12} |\hat{\mathbf{h}}_{12}^H \mathbf{w}_2|^2 + \sigma^2} \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

而最优算法为

$$(\mathbf{w}_1^*, \mathbf{w}_2^*) = \underset{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2 \in \mathcal{W}}{\operatorname{argmax}} \{ \log(1 + \Gamma_1) + \log(1 + \Gamma_2) \} \quad (13)$$

当信干噪比 Γ_1 和 Γ_2 较大时,忽略式(13)对数函数中的常数项,得到

$$(\mathbf{w}_1^*, \mathbf{w}_2^*) = \underset{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2 \in \mathcal{W}}{\operatorname{argmax}} \{ \log(\Gamma_1 \Gamma_2) \} = \underset{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2 \in \mathcal{W}}{\operatorname{argmax}} (\Gamma_1 \Gamma_2) \quad (14)$$

由于式(14)与式(12)是等价的,因此两小区模型中,在较高信干噪比的情况下,分布式算法可以接近最优性能。

当 $N > 2$ 时,对分布式算法性能的精确分析比较困难,主要通过仿真来获得算法的性能指标。需要注意的是,在实际的蜂窝网络中用户收到的干扰

信号虽然来自多个小区,但是多数情况下存在一个占主导地位的干扰小区,其干扰信号功率明显大于其它小区的干扰信号功率。如果使用前述的基于阈值的反馈和波束选择算法,只考虑这一个小区的干扰,那么得到的就是两小区模型,因此上述对 $N = 2$ 的分析结论在多小区系统中仍然是有意义的。

对分布式算法的复杂度分析可以分为两方面:计算复杂度和反馈量。

首先分析分布式算法的计算复杂度。从式(7)和(8)可以看出,基站 i 在选择波束时不需要知道其它基站波束选择的结果,因此该算法可以在各个基站上分布式实现,不需要存在中心处理节点。每个基站都需要对整个码本进行搜索来选择波束,整个系统需要搜索 NL 次,相当于最优算法的 $\frac{L}{N^{L-1}}$ 。

为了对算法反馈量进行明确的比较,假设基站所需信息由用户通过空中接口(over the air, OTA)反馈,假设其中的标量信息使用 4 比特量化,矢量信息使用大小为 2^6 的码本进行量化。

使用最优算法时,系统中任何一个基站都需要全部用户的信道状态信息,因此用户 j 需要向对基站 i 反馈的信息为 $P_{kj}, \mathbf{h}_{kj}, k = 1, 2, \dots, N$, 系统总反馈量为 $10N^3$ 比特。

根据式(10),在使用分布式算法时,用户 j 需要向对基站 i 反馈的信息包括 $(\bar{\Gamma}_j, P_{ij}/P_{jj}, \mathbf{h}_{ij})$, 系统总反馈量为 $14N^2$ 比特,为最优波束选择算法的 $\frac{7}{5N}$ 。另外由于 $\bar{\Gamma}_j$ 和 P_{ij}/P_{jj} 为变化较慢的长期统计量,因此可以降低二者的反馈频率,从而进一步减少反馈量。

3 仿真结果

本节利用蒙特卡罗仿真来验证和分析分布式算法的性能,仿真中使用的主要参数如表 1 所示。为了验证基于两小区模型的分析结果,比较分布式算法与最优算法之间的性能差距,首先对两小区模型进行仿真,之后再基于更为实际的多小区模型进行仿真,从而分布式算法相对于信道匹配算法得到的性能增益。

3.1 两小区模型

从蜂窝系统模型中选择中心两个相邻的小区并忽略其它小区的干扰,从而形成两小区模型,两小区模型中其它相关参数见表 1。

表 1 仿真中使用的主要参数

参数	设定值
蜂窝模型	19 个小区, 57 个扇区
天线模式	70 度扇区化波束
基站到基站距离	500m
天线数目	4 发 1 收
每小区用户数(K)	60, 随机均匀分布
用户与基站间最小距离	35m
基站总发射功率	43 dBm
天线增益	基站天线: 14 dB 用户天线: -1 dB
噪声系数	10 dB
与距离 d 相关的路径损耗	$28.6 + 35\log_{10}(d)$, 距离的单位为米
穿透损耗	10 dB
阴影衰落标准偏差	8.9 dB
基站间阴影衰落相关系数	0.5
小尺度衰落模型	瑞利
码本生成方法	基于 DFT 矩阵 ^[6]
标量量化	4 比特
调度算法	等服务质量 (EGoS)

图 1 给出了在此两小区模型中分别使用信道匹配算法、分布式算法和最优算法, 在不同的码本大小条件下得到的每小区平均速率。从图 1 可以看到: 在各个码本大小条件下分布式算法的性能均接近最优算法, 并且显著优于信道匹配算法。以码本大小为 64 为例, 分布式算法得到的每小区平均速率是信道匹配算法的 1.31 倍, 与最优算法性能之间的差距仅有 0.0018 bit/s/Hz。随着码本长度增加, 三种算法的性能均有提高, 但是信道匹配算法与其他两种算法性能的差异也逐渐加大。

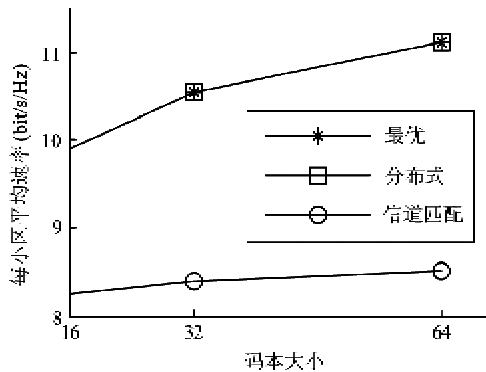


图 1 两小区模型中不同波束选择算法的性能

3.2 多小区模型

为了分析分布式算法在实际系统中的性能增

益, 图 2 和图 3 中的仿真模型设为包含 57 个扇区的蜂窝系统, 仿真参数设置如表 1 所示。为了更加真实地反映实际系统性能, 仿真中限定用户可以获得的最高信干噪比为 20dB, 而且考虑存在 4dB 的实现损失。需要注意的是由于计算复杂度的问题, 仿真中不再给出最优波束选择算法的性能。

图 2 给出了分别使用信道匹配和分布式波束选择算法得到的每小区平均速率。注意由于小区间干扰和信干噪比受限的影响, 图 2 中的速率要明显低于图 1 中两小区模型的仿真结果。

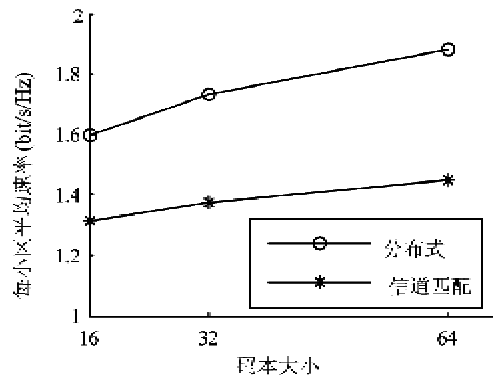


图 2 多小区系统中不同波束选择算法的性能

从图 2 可以看到, 分布式算法所得到的平均速率高于信道匹配算法, 而且性能增益在码本大小增加时更加明显。当码本大小为 64 时, 使用分布式波束选择算法得到的每小区平均速率大约是信道匹配算法的 1.3 倍。

为了防止分布式算法影响到用户调度结果, 从而以牺牲用户公平性为代价换取图 2 中的平均速率增益, 需要对使用分布式算法和信道匹配算法得到的用户公平性进行比较。这里使用的公平性指标为用户平均速率累积分布, 该指标的计算分两步: (1) 计算系统中每个用户 (总共有 NK 个用户) 在仿真时长内的平均速率 R_k ; (2) 利用下式计算用户平均速率的累积分布函数 $F(x)$:

$$F(x) = \frac{|S|}{NK}, S = \{k: R_k < x\} \quad (15)$$

其中 $|S|$ 表示集合 S 中包含元素的数目。

图 3 给出了分别使用分布式算法和信道匹配算法得到的用户速率累积分布曲线, 可以看到, 这两种算法具有相似的累积分布曲线, 将信道匹配算法得到的曲线整体向右平移, 则可得到分布式算法对应的曲线。因此分布式算法不会影响到用户公平性, 其性能增益来自小区间干扰的降低。

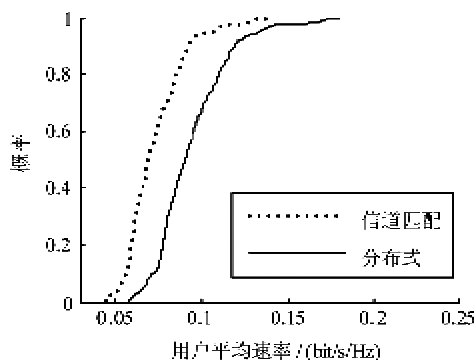


图3 用户平均速率的累积概率分布

4 结 论

本文针对多天线蜂窝通信系统提出了一种新的多小区协作波束选择算法。通过多小区之间相互交换信道信息并协作选择发送波束,可以有效减小邻小区干扰,从而提高系统性能。与最优协作波束选择算法相比,本文提出的算法可以在各个小区独立地实现,因此其计算复杂度和反馈量均大大降低。与单小区信道匹配波束选择算法相比,提出的算法可以增加系统平均速率,同时保持与单小区波束选择算法相似的用户公平性。

另一方面,与多基站联合为一个或多个用户服务的多小区协作方案相比,所提出的多小区协作分布式波束选择算法仍保持现有蜂窝系统中基站与用户的一一对应关系,无需在多个基站间共享用户数据,因此对现有网络架构的影响较小,可以作为一种较实用的多小区协作方案应用在下一代通信系统中。

参考文献

- [1] Goldsmith A, Jafar S A, Jindal N, et al. Capacity limits of MIMO channels. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal*, 2003, 21(5): 684-702
- [2] Srinivasa S, Jafar S A. The optimality of transmit beamforming: A unified view. *Information Theory, IEEE Transactions*, 2007, 53(4): 1558-1564
- [3] Jafar S A, Goldsmith A. Transmitter optimization and optimality of beamforming for multiple antenna systems. *Wireless Communications, IEEE Transactions*, 2004, 3(4): 1165-1175
- [4] Shuying S, Schubert M, Boche H. Rate optimization for multiuser MIMO systems with linear processing. *Signal Processing, IEEE Transactions*, 2008, 56(8): 4020-4030
- [5] Spencer Q H, Peel C B, Swindlehurst A L, et al. An introduction to the multi-user MIMO downlink. *Communications Magazine, IEEE*, 2004, 42(10): 60-67
- [6] Sarkar S, Kadous T, Tingfang J, et al. MIMO in wireless wan - the UMB system. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops Bangalore, India*, 2008. 57-64
- [7] Lo T K Y. Maximum ratio transmission. *Communications, IEEE Transactions*, 1999, 47(10): 1458-1461
- [8] Andrews J G, Wan C, Heath R W. Overcoming interference in spatial multiplexing MIMO cellular networks. *Wireless Communications, IEEE*, 2007, 14(6): 95-104
- [9] Viswanath P, Tse D N C, Laroia R. Opportunistic beamforming using dumb antennas. *Information Theory, IEEE Transactions*, 2002, 48(6): 1277-1294

Distributed beam selection algorithm based on multi-cell cooperative

Lei Jun, Xiao Limin, Li Yunzhou, Shi Mingjun, Yao Yan

(State Key Laboratory on Microwave and Digital Communications,

Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology,

Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

Multicell cooperative beam selection was studied to reduce inter-cell interference in multiple antenna cellular systems. A distributed beam selection algorithm was proposed, which can be independently implemented in each cell. The proposed algorithm assumes that the channel state information of users is exchanged between cells. Then each cell estimates the signal-to-interference-noise ratio SINR of all users based on channel state information of both its own user and the users in other cells and selects the beam which can maximize product of the estimated SINR of all users. The performance and complexity of the proposed algorithm was analyzed. The analysis results show that the proposed algorithm can achieve near optimal performance under the two-cell model, with much lower complexity than that of the optimal algorithm. The simulation results show that the average rate of multiple antenna cellular systems can be significantly increased by utilizing the proposed algorithm, without compromising user fairness.

Key words: wireless communication, multiple antenna cellular systems, inter-cell interference, multicell cooperation, distributed beam selection