

多天线系统中的多用户分集方案的性能分析及比较

龚明 邱玲 朱近康

(中国科学技术大学个人通信与扩频实验室 合肥 230027)

摘要 在多天线多用户无线通信系统中,可以利用用户之间彼此独立的随机衰落信道的特点,结合随机波束成型技术,或者空间分集技术,或者天线选择技术,获得多用户分集增益。然而不同多用户分集方案的系统性能不尽相同。该文分析了在多输入单输出(MISO)信道中目前几种典型的多用户分集方案的性能,给出系统吞吐率的定量表达式,并综合比较了不同用户数和不同天线数对各种多用户分集方案性能的影响,为实际多天线多用户系统设计提供了有益的参考。

关键词 多用户分集, 多天线, 性能分析, 吞吐率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)02-0208-05

Performance Analysis and Comparison of Multiuser Diversity Schemes in Multiple Antenna System

Gong Ming Qiu Ling Zhu Jin-kang

(Dept. of EEIS, USTC, Hefei 230027, China)

Abstract In a multiuser wireless system with multiple antennas, the independence of different users' random fading characteristic can be exploited to obtain great gain of multiuser diversity by combining different techniques, such as random beamforming, spatial diversity, antenna selection. The performance of these different multiuser diversity schemes is not the same. This paper gives out the formula of the average throughput and analyzes the performance of some typical multiuser diversity schemes. This paper also compares the effect of number of users and antennas on throughput performance of different multiuser diversity schemes. It will present beneficial reference for the design of practical multiuser system with multiple antennas.

Key words Multiuser diversity, Multiple antenna, Performance analysis, Throughput

1 引言

多入多出(MIMO)天线技术的巨大潜力为新一代无线通信技术的研究提供了广阔的舞台。近年来,多用户的MIMO研究逐渐成为热点问题。理论上,多用户环境下的多天线系统可以取得比单用户系统高得多的系统容量。已经证明利用“脏纸编码(Dirty Paper Coding, DPC)”可以取得相当高的多用户系统和容量(sum capacity)^[1]。但是, DPC以及其它接近容量域边界的次优MIMO多用户方案往往需要复杂的编码处理,同时还需要发端确知所有用户的信道状态信息,这些因素使之尚不能实用。

在多用户环境下,另一种更为简单的能够取得较大系统吞吐率的方案是多用户分集。多用户分集的概念早在 1995

年由Knopp和Humblet^[2]提出。多用户系统利用了各个用户具有彼此独立的随机信道衰落这一特点,每个用户将其信道质量度量反馈到基站,基站在每个时刻合理选择最佳的用户使用信道资源,从而提高整个系统的吞吐率。目前在实用的一些第三代移动通信系统中^[3],辅以一定调度策略的多用户分集技术已经得到运用。

从信息论的角度,在单输入单输出(SISO)天线信道中,时分多址(TDMA)方式的多用户分集即可取得最大的系统容量^[4]。但在MIMO多用户系统中,由于空间自由度的引入,问题变得比较复杂,以上结论并不成立。首先,对每个用户而言,多天线技术在链路上提供了多种时空收发结构,这些结构对多用户分集系统的影响并不直观,例如文献[5]研究了空间分集与多用户分集的关系,发现空间分集会减小多用户分集的增益;文献[6]则分析了空间复用与多用户分集的关系,发现要使多用户分集系统吞吐率接近DPC和容量边界,

2004-08-11 收到, 2004-12-28 改回

国家自然科学基金重大项目(60496314), 863 计划国家重大项目(2003AA123310)资助课题

必须采用相当高的空间复用度,但该文仅为极限情况的理论分析。

本文分析和比较几种具有实用意义的典型多用户分集方案,重点分析了利用随机波束成型的多用户分集方案^[7],对其模型进行了推广,给出实际系统中子流数与系统吞吐率关系的表达式。此外,本文还分析了利用空间分集的多用户分集方案,基于发送天线选择的多用户分集方案和作为参考的利用准确波束成型的多用户分集方案。为了定量比较,对每种方案,本文综合给出了平均系统吞吐率的表达式。通过分析比较不同用户数和不同天线数情况下各种方案的平均系统吞吐率,可以看出各种典型多天线技术对多用户分集系统的影响,为实际多用户多天线系统的设计提供了参考。

2 系统模型

本文考虑蜂窝系统的下行链路。基站有 M 个发送天线,天线间距足够大,信道衰落统计独立,基站为系统中的 K 个移动用户服务,每个用户具有单天线。这里之所以考虑 MISO 信道,一方面因为 MISO 系统的定量分析较 MIMO 系统更易进行;另一方面是目前技术条件所限,移动用户配置多天线还有诸多问题,MISO 系统仍然有相当的实用性。基站在第 n 个时隙里(时隙长度为 T),发送信号为 $\mathbf{s}(t)=[s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T$ 。发送的平均总功率一定,与天线数无关。用户 k 收到的信号为

$$r_k(t) = \sqrt{\rho} \mathbf{H}_k(n) \mathbf{s}(t) + n(t), \quad t \in [(n-1)T, nT] \quad (1)$$

这里假定信道在一个时隙内是近似不变的,时隙之间是变化的。 $\mathbf{H}_k(n)=[h_{1,k}(n), h_{2,k}(n), \dots, h_{M,k}(n)]$, $h_{i,k}(n)$ 为基站第 i 个发送天线到用户 k 接收机的信道响应系数,设为独立同分布的复高斯随机变量,分布为 $\mathcal{CN}(0,1)$ 。 $n(t)$ 为复高斯白噪声,分布为 $\mathcal{CN}(0,1)$ 。设 $\mathcal{E}\{\mathbf{s}(t)^H \mathbf{s}(t)\}=1$, 这样在每个接收天线处,平均信噪比正好为 ρ 。本文对系统中的用户差异进行了简化,即虽然各用户的信道衰落彼此统计独立,但是他们的各种统计参数相同。

3 几种多用户分集方案

3.1 方案 A: 随机波束成型的多用户分集

文献[7]提出了一种随机波束成型的多用户分集方式。基站利用随机产生的酉阵使发端 M 个数据子流承载在 M 个随机波束上,在基站到用户的慢衰落信道上叠加上人工的快变因子,形成人工快变信道。用户可以预先同步基站的伪随机矩阵序列,加上对实际慢变信道的跟踪可以估计等效快变信道的质量。基站每个时隙选择最佳的用户占有信道。信道的人为随机起伏避免了部分用户长时间处于深衰落中而得不到服务,改善了短时用户之间的公平性,对时延约束较强的

业务特别有用。本文对随机波束成型方法进行推广,并不局限于 M 个天线承载 M 个波束,而是可以灵活利用 $M_t(1 \leq M_t \leq M)$ 个随机波束发送 M_t 个数据子流,并重点分析子流数 M_t 对于系统性能的影响。此方案中,发送的信号为 $\mathbf{s}(t) = \mathbf{B}(n) \sqrt{1/M_t} \mathbf{x}(t)$, 其中, $\mathbf{x}(t)=[x_1(t), x_2(t), \dots, x_{M_t}(t)]^T$, $\mathcal{E}\{x_i(t)x_j(t)^*\} = \mathbf{1} \cdot \delta(i-j)$; $\mathbf{B}(n)$ 是从每个时隙随机产生的 $M \times M$ 酉阵取出的 M_t 列, $\mathbf{B}(n)=[\mathbf{b}_1(n), \mathbf{b}_2(n), \dots, \mathbf{b}_{M_t}(n)]^T$, 矢量 $\mathbf{b}_i(n)$ 的弗罗布留范数满足 $\|\mathbf{b}_i(n)\|=1$ 。用户 k 收到的信号为

$$r_k(t) = \sqrt{\frac{\rho}{M_t}} \sum_{i=1}^{M_t} \tilde{h}_{i,k}(n) x_i(t) + n(t) \quad (2)$$

$\tilde{h}_{i,k}(n) = \mathbf{H}_k(n) \mathbf{b}_i(n)$ 是 $\mathbf{H}_k(n)$ 在波束矢量 $\mathbf{b}_i(n)$ 上的投影,由于 $\mathbf{b}_i(n)$ 为么正基,所以 $\tilde{h}_{i,k}(n)$ 仍然是分布为 $\mathcal{CN}(0,1)$ 的复高斯随机变量。这样通过选择子流数可以很方便地构造任意等效天线数 $M_t(1 \leq M_t \leq M)$ 的 MISO 信道,为自适应优化系统配置提供了可能。

下面按照是否存在数据子流间干扰两种情况讨论。

3.1.1 $M_t=1$ 的情况 此时系统等效于 SISO 信道的多用户分集系统,无天线子流之间的干扰。接收机的信噪比为 $\gamma_k(n) = \rho |\tilde{h}_{1,k}(n)|^2$, 每个用户向基站报告其信道质量度量 $\gamma_k(n)$; 基站在 K 个用户中选择用户 $k^*(n) = \arg \max_{k=1,2,\dots,K}$

$\{\gamma_k(n)\}$ 使用信道。为了定量分析系统吞吐率,需要给出 $\gamma_k^*(n)$ 的概率分布。显然, $\gamma_k(n)$ 是分布为 $\chi(2)$ 的随机变量, $\chi(n)$ 表示自由度为 n 的卡方分布。由文献[8], $\gamma_k(n)$ 的概率分布函数(PDF)和累积分布函数(CDF)分别为, $f(\gamma) = \frac{1}{\rho} e^{-\gamma/\rho}$ 和 $F(\gamma) = \int_0^\gamma f(x) dx = 1 - e^{-\gamma/\rho}$ 。参考文献[5],从 K 个独立同分布的随机变量 $\gamma_k(n)$ 选出最大者 $\gamma_k^*(n)$, $\gamma_k^*(n)$ 的 K 的累计分布函数为 $F_{(K)}^*(\gamma) = [F(\gamma)]^K$, 因此,

$$f_{(K)}^*(\gamma) = [F_{(K)}^*(\gamma)]' = K[F(\gamma)]^{K-1} f(\gamma) \quad (3)$$

将 $f(\gamma)$ 和 $F(\gamma)$ 代入式(3),可得

$$f_{(K)}^*(\gamma) = K \left(1 - e^{-\frac{\gamma}{\rho}} \right)^{K-1} \frac{1}{\rho} e^{-\gamma/\rho} \quad (4)$$

这样,可以求出系统的平均吞吐率:

$$\mathcal{E}(C^*) = \int_0^\infty \log_2[1 + \gamma] f_{(K)}^*(\gamma) d\gamma \quad (5)$$

3.1.2 $1 < M_t \leq M$ 的情况 由于发送端同时发送多路子流,采用了空间复用方法,多个子流之间可能会相互干扰,信道质量的度量因子从信噪比(SNR)变为信干噪比(SINR)。用户 k 接收到的信号为

$$r_k(t) = \sqrt{\frac{\rho}{M_t}} \tilde{h}_{m,k}(n) x_m(t) + \sqrt{\frac{\rho}{M_t}} \sum_{i=1, i \neq m}^{M_t} \tilde{h}_{i,k}(n) x_i(t) + n(t) \quad (6)$$

用户看到 M_t 路并行的等效信道,对第 m 路信号而言,用户

将第1项视作有用信号,第2项为其它 M_t-1 个子流对有用信号的干扰,第3项为噪声项,这样,第 m 路的信干噪比为

$$\gamma_{m,k}(n) = \frac{|\tilde{h}_{m,k}(n)|^2}{\frac{M_t}{\rho} + \sum_{i=1, i \neq m}^{M_t} |\tilde{h}_{i,k}(n)|^2} \quad (7)$$

每个用户将 M_t 个等效信道的质量度量 $\gamma_{m,k}(n)$ ($m=1,2,\dots,M_t; k=1,2,\dots,K$) 反馈到基站。基站可以按照用户粒度进行调度,对每个用户估算其潜在的用户吞吐率 $C_k(n) = \sum_{m=1}^{M_t} \log_2[1 + \gamma_{m,k}(n)]$,然后将信道分配给最佳用户使用。但是,容易看出还有更高效的调度方式,即基站按照子流信道进行调度。基站将第 m 个子流信道分配给用户 $k_m^*(n)$ 使用, $k_m^*(n) = \arg \max_{k=1,2,\dots,K} \{\gamma_{m,k}(n)\}$,这样系统的吞吐率为 $C^*(n) = \sum_{m=1}^{M_t} \log_2[1 + \gamma_{m,k_m^*(n)}]$ 。

参照文献^[9]求得 $\gamma_{m,k_m^*}(n)$ 的概率密度分布函数为

$$f_{(K,m)}^*(\gamma) = K \left(1 - \frac{e^{-\frac{\gamma}{M_t/\rho}}}{(1+\gamma)^{M_t}} \right)^{K-1} \frac{e^{-\frac{\gamma}{M_t/\rho}}}{(1+\gamma)^{M_t}} \left(\frac{M_t}{\rho} (1+\gamma) + M_t - 1 \right) \quad (8)$$

鉴于公式(7)的特点,用户数较多时,同一个用户有1个以上子流在竞争中被选中的概率极低,这样 $\gamma_{m,k_m^*}^*(n)$ ($1 < m < M_t$) 近似为 M_t 个独立同分布的变量,系统的平均吞吐率为

$$\mathcal{E}\{C^*\} = M_t \int_0^\infty \log_2[1 + \gamma] f_{(K,m)}^*(\gamma) d\gamma \quad (9)$$

3.2 方案B: 空间发射分集的多用户分集

利用空间分集特性,基站可利用发射分集,将单路数据通过时空编码在 M 个天线上发送,以提高无线通信链路的传输性能。由于基站简单地在每个天线上平均分配功率,用户估计到子流信道的SNR^[5]为: $\gamma_k(n) = \frac{\rho}{M} \sum_{i=1}^M |\tilde{h}_{i,k}(n)|^2$, 基站选择最佳用户使用信道。易知 $\gamma_k(n)$ 的分布为 $\chi(2M)$, $\gamma_k(n)$ 的PDF和CDF分别为

$$f(\gamma) = \left(\frac{M}{\rho} \right)^M \frac{\gamma^{M-1}}{(M-1)!} e^{-\frac{\gamma}{\rho/M}} \quad (10)$$

$$F(\gamma) = \Gamma^c \left(\frac{M}{\rho}, M \right) \quad (11)$$

其中 $\Gamma^c(x, M)$ 为不完全 Γ 函数, $\Gamma^c(x, M) = \frac{1}{\Gamma(M)}$

$\int_0^x e^{-t} t^{M-1} dt$ 。仿上利用式(3)和式(5),可求得系统的平均吞吐率。

3.3 方案C: 发射天线选择的多用户分集

每个时隙,基站以单天线发送数据。每个用户将

$\gamma_{m,k}(n) = \rho |\tilde{h}_{i,k}(n)|^2$ 作为信道质量度量反馈到基站。基站选择 $[m^*(n), k^*(n)] = \arg \max_{k=1,2,\dots,K; m=1,\dots,M} \{\gamma_{m,k}(n)\}$ 。基站只在天线

$m^*(n)$ 以全部功率发送用户 $k^*(n)$ 的数据。这实际上等效于 $K \cdot M$ 个SISO用户的多用户分集情况。利用式(4), $\gamma_{m^*,k^*}^*(n)$ 的PDF为 $f_{(K)}^*(\gamma) = K \cdot M (1 - e^{-\gamma/\rho})^{K \cdot M - 1} \frac{1}{\rho} e^{-\gamma/\rho}$, 进而可利用式(5)求得系统平均吞吐率。

3.4 方案D: 准确波束成型下的多用户分集(参考系统)

所有用户需要反馈完全的信道信息 $\{\tilde{h}_{i,k}(n)\}$ 给基站。基站评估利用波束成型与每个用户通信的潜在吞吐率。如果选择与用户 k 通信,基站的发送信号为, $s(t) = b_k(n)x(t)$, 其中

$$b_k(n) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^M |\tilde{h}_{i,k}(n)|^2}} [\tilde{h}_{1,k}(n), \tilde{h}_{2,k}(n), \dots, \tilde{h}_{M,k}(n)]^H$$

。由于基站在发端采用了与信道特征模一致的波束,所以在用户 k 的

接收端能够得到较大的SNR: $\gamma_k(n) = \rho \sum_{i=1}^M |\tilde{h}_{i,k}(n)|^2$ 。与利用空间发射分集的多用户分集方案相比,波束成型的方法在信噪比上有 $10 \log_{10}(M)$ dB的增益。基站选择最佳用户 $k^*(n)$, 仿式(3), 式(4), 式(10), 和式(11), 可以求出 $\gamma_{k^*}^*(n)$ 的PDF和系统的平均吞吐率。

4 性能分析与比较

为了比较上述各种多用户分集方案的性能,我们进行了计算和仿真,结果如下。

图1(a)是在高信噪比 $\rho=15$ dB下,系统吞吐率与用户数的关系;右图则是在低信噪比下的对应情况。图1(b)分别给出了上节分析结果的理论计算曲线和蒙特卡罗仿真得到的结果。由图可见,本文所推导的公式能正确描述系统的吞吐率性能。在所有多用户分集方案中,系统吞吐率都随用户数 K 增大而提高,提高程度不尽相同。

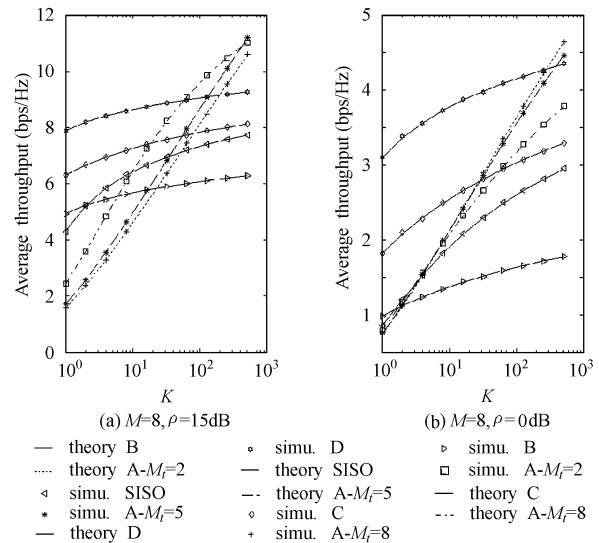


图1 各种多用户分集方案下系统吞吐率与用户数的关系

方案 D 中, 基站可对每个用户单独做波束成型, 高效的利用信道, 但方案 D 需要反馈信道响应系数矩阵, 开销巨大, 而且系统对信道估计、参数反馈错误较为敏感, 所以方案 D 不太实用, 这里只作为比较的参考。较实用但性能比方案 D 稍差的是方案 C, 从图中可见它比 SISO 的情况好, 由于它在天线之间也进行选择, 选择的自由度是用户数和天线数的乘积, 随着用户数的增加, 它相对与 SISO 的优势在减小。这里用的 SISO 方案并非真正的单天线发送, 而是指随机波束成型技术中只用一个子流的极端情况, 其吞吐率随用户数增加而快速增长, 多用户分集增益比较明显, 而且具有随机波束成型提高用户短期公平度的优点, 所以该方案也较有实用意义。对于方案 B, 可以看出在用户数比较少的时候, 它比 SISO 方案好, 因为利用空间分集可以使得合并后的等效信道的平均衰落减小, 但是当用户数多的时候, 空间分集技术在多用户分集系统中并无优势, 在所有方案中其平均吞吐率最差。因为多用户分集系统是在多个候选信道中选最好者使用, 等效信道的动态范围越大, 最终选到的胜者的性能也越好。而空间分集的出发点是提高链路的可靠性, 利用分集技术削平信道的起伏。因此, 如仿真结果, 空间分集技术用于多用户分集系统中并不能提高系统的吞吐率。这个结论与文献[5]相同。

空间复用技术对于多用户分集系统吞吐率的提高却很重要。比较 SISO 的情况, 方案 A 多个子流同时发射, 可以获得更高的吞吐率, 吞吐率随用户数的增加最为明显。在高信噪比情况下, 用户数大于 64 时, 方案 A 甚至超过了作为参考的准确波束成型的方案 D。利用空间复用正是它的优势, 当然选用的子流数也会对吞吐率造成影响。

关于子流数, 天线数的分析在图 2, 图 3 中更为清楚。图 2(a), 图 2(b) 是高信噪比下用户数较少和较多时各种多用户分集方案随发送天线或者子流数变化的情况。而图 3 是低信噪比下对应的情况。从图中可以看出, 增加天线数对于各种方案的效果并不相同。对于 C 方案, 无论是在高信噪比端还是在低信噪比端, 吞吐率随 M 增加而增加, 因为 C 方案的选择增益与天线数成正比。对于 D 方案, 吞吐率也随 M 增长, 其等效的信噪比是随天线数增加而增加的。而 B 方案就不一样了, 天线数增加, 吞吐率反而下降, 如上所述, 用户信噪比均值不变, 而浮动范围减小严重影响了取得的多用户分集增益。

对方案 A, 情况稍为复杂。在高信噪比区域, 空间多个子流信道相互干扰成为影响性能的主要因素。本文中接收机只有 1 个天线, 信道为低秩矩阵, 且没有采用复杂的子流干扰抵消技术, 所以发送过多的独立子流不会使吞吐率线性增加, 反而因为子流间干扰而降低吞吐率。当用户数较少的时候, 选择 2 个子流达到的吞吐率最高。当系统内的用户数超

过 256 个时, 选择同时发送 3 个子流更优。但在信噪比低时, 噪声为影响吞吐率的主要因素, 如图 3 所示, 采用更多的并行子流可提高系统吞吐率。而且用户数越多, 吞吐率随子流数增加的趋势越明显。从式(7)可知, 用户数多时, 某些用户的子信道质量较好的可能性增加, 所以在低信噪比时, 方案 A 的系统吞吐率随用户数快速增长。

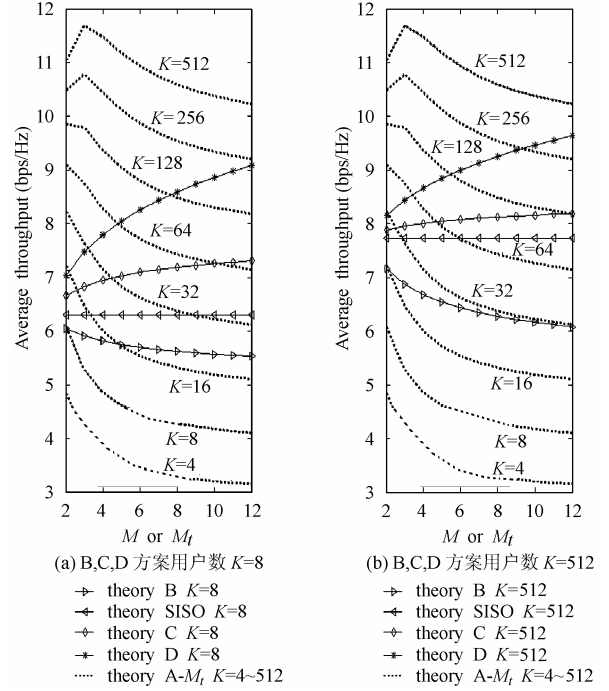


图2 高信噪比下吞吐率与天线数(子流数)的关系

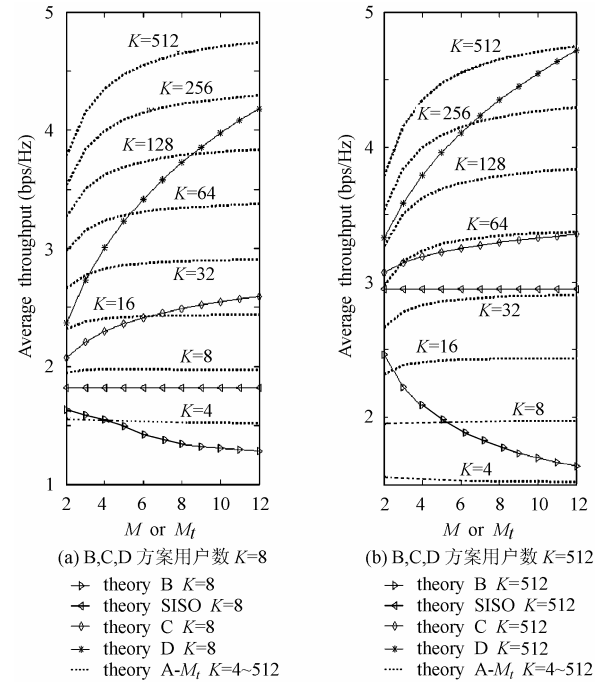


图3 低信噪比下吞吐率与天线数(子流数)的关系

5 结束语

本文针对 MISO 信道, 通过分析比较典型的多天线多用

户分集方案的平均系统吞吐率,发现合理的根据信道和系统用户数选择适当的多用户分集方案非常重要。在本文提到的所有多用户分集方案中,随机波束成型技术是一个重要的选择,而且可以利用本文的分析和仿真结果,进一步针对不同情况,自适应选择子流数来优化系统性能。

参 考 文 献

- [1] Wonjong R, Cioffi J M. On the capacity of multiuser wireless channels with multiple antennas. *IEEE Trans on Information Theory*, 2003, 49(10): 2580 – 2595.
 - [2] Knopp R, Humblet P A. Information capacity and power control in single-cell multiuser communications. *IEEE Internet. Conf. Communication(Ice' 95)*, Seattle, WA, 18-22 June 1995, vol.1: 331 – 335.
 - [3] Bender P, Black P, Grob M, *et al.*. CDMA/HDR: A bandwidth-efficient high-speed wireless data service for nomadic users. *IEEE Communications Magazine*, 2000, 38(7): 70 – 77.
 - [4] Jindal N, Goldsmith A. Dirty paper coding vs. TDMA for MIMO broadcast channels. *IEEE International Conf. on Communications (ICC)*, Paris, France, June 2004: 682 – 686.
 - [5] Jing J, Buehrer R M, Tranter W H. Antenna diversity in multiuser data networks. *IEEE Trans on communications*, 2004, 52(3): 490 – 497.
 - [6] Wei Yu. Spatial multiplex in downlink multiuser multiple-antenna wireless environments, *IEEE Global Telecommunications Conference*, San Francisco, vol.22, no.1, Dec. 2003: 1887 – 1891.
 - [7] Viswanath P, Tse D N C, Laroia R. Opportunistic beamforming using dumb antennas. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2002, 48(6): 1277 – 1294.
 - [8] Prokakis J G. *Digital Communications*. 3rd edition. USA McGraw-Hill Inc, 1995: 41 – 45.
 - [9] Sharif M, Hassibi B. On the capacity of MIMO broadcast channel with partial side information. *The 37th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove CA, USA, Nov. 9-12,2003, vol.1: 958 – 962.
- 龚 明: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为移动通信与个人通信、信号处理, 个人通信信号处理.
- 邱 玲: 女, 1963 年生, 博士, 副教授, 研究方向为移动通信、通信中的信号处理、扩频通信.
- 朱近康: 男, 1943 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信与个人通信、扩频通信、通信中的信号处理.