

## 多用户 MIMO 系统下行链路的随机多波束复用技术

黄永明 许道峰 杨绿溪  
(东南大学无线电工程系 南京 210096)

**摘要:** 该文提出了一种随机多波束多用户复用技术,充分利用多用户分集以及基站多天线的空间自由度来提高系统吞吐量。不同于传统的随机波束形成技术,该技术首先在给定预编码码本内随机选取一个码字,然后调度多个空分复用用户以及其余预编码矩阵。该文采用了一种逐次调度的方式,第一次训练调度一个主发送用户并确定一个次发送预编码矩阵,通过第二次训练选择次发送用户,这种方式能以很小的反馈开销有效控制复用用户之间的相互干扰。同时,该文所提技术能进一步推广到用户具有不同天线配置的异构情形。仿真结果表明,该文技术在具有不同相关性的信道环境下都能获得较优的系统吞吐量。

**关键词:** 无线通信;多用户;随机波束;空分复用;多用户分集

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)02-0416-05

## A Random Multi-beam Multiplexing Technique for the Downlink of Multiuser MIMO System

Huang Yong-ming Xu Dao-feng Yang Lu-xi  
(Department of Radio Engineering, Southeast Univ., Nanjing 210096, China)

**Abstract:** A novel random multi-beam multiplexing technique is proposed in this paper, which improves the system throughput by exploiting both multiuser diversity and spatial freedom degrees of multiple transmit antennas at the base station. Different from conventional random beamforming techniques, the proposed one first randomly selects one codeword from a given codebook of precoding matrices, then schedules several spatially multiplexing users and determines other precoding matrices. A successive scheduling algorithm is proposed, which selects a main transmit user and determines the secondary precoding matrix for the other user in the first training phase, then the secondary transmit user is selected based on the secondary precoding matrix in the second training phase. This successive scheduling way is capable of fully suppress the mutual interference between multiplexing users at cost of little feedback overhead. Also, the proposed technique can be extended to heterogeneous cases where users may be configured with different number of receive antennas. Simulation results demonstrate that the proposed technique achieves good throughput over different correlated channel environments.

**Key words:** Wireless communications; Multiuser; Random beamforming; Spatial multiplexing; Multiuser diversity

### 1 引言

信息论研究表明,当发射端精确已知所有用户的信道状态信息(CSI)时,多天线系统广播信道的和容量随着用户数的增长以  $M \log \log(NK)$  的速度渐进增长<sup>[1]</sup>,其中  $M$  为发射天线数,  $N$  为单个用户的接收天线数,  $K$  为用户总数。已有理论证明,脏纸编码(DPC<sup>[2]</sup>)能达到广播信道的和容量,但 DPC 需要复杂的非线性处理,因此并不实用,即使如 THP<sup>[3]</sup>之类的次优的非线性预编码方案,其计算复杂度仍显太高而难以实现。现有的处理简单的线性多用户预编码方案主要有基于迫零准则<sup>[4]</sup>或者对信道矩阵进行块对角化<sup>[5]</sup>,以此把多用户 MIMO 信道分解成并行的互不干扰的单用户信

道。需要指出的是,上述方案都要求发射端精确已知所有用户的信道状态信息(CSI),当用户数目较多的时候,这在实际系统中并不可行。在多用户环境下,通过随机调度(Opportunistic Scheduling, OS)能充分利用多用户分集来提高系统容量,每个用户只需将其信道质量度量 CQI 反馈给基站,系统反馈开销比较小,实现简单。文献[6]提出了一种简单的随机波束形成方案,它把慢衰落信道人工等效成快衰落信道并用一定的调度方案保证用户间的公平性。文献[7]把单天线用户配置的随机波束形成方案推广到多天线用户配置,基站给一个用户同时发送多个数据流,并可以根据反馈信息在多个流之间进行合理的功率分配(注水)以提高系统的吞吐量。实际上,在多用户 MIMO 系统中,一个时频资源块只是调度给一个信道条件好的用户往往并不能充分利用 MIMO 系统的空间自由度。在文献[1, 8]中,发射端每次调度先随机产生多个波束,然后把各个波束分配给信道条件匹配

2006-07-28 收到, 2007-01-16 改回

国家自然科学基金重大项目(60496310, 60272046), 江苏省自然科学基金(BK2005061)和教育部博士点基金(2002028601)资助课题

的多个用户,这样可以同时获得多用户分集增益和空分复用增益。文献[1]中在产生承载多个用户数据的多个波束时要求各个波束之间相互正交,因此它是一种随机的正交波束空分多址技术,随着用户数的不断增长,它能渐进地达到多天线系统广播信道容量的增长速度。但当用户数目有限时,该方案的性能会急剧下降。文献[9]中提出的随机预编码方案主要是针对用户端配置多根天线的情形,每次调度基站先随机产生多个预编码矩阵,然后把各个矩阵分配给信道条件匹配的多个用户,该方案虽然实现简单,但不能显式地控制复用用户之间的相互干扰。

本文主要考虑 MIMO 系统下行链路的多用户随机调度问题,与传统的随机调度方案不同的是,本文的方案是一种基于预编码码本的调度方式,所谓码本,即预先定义一组可能的预编码矩阵。一次调度需要多个训练步骤,首先从码本中随机选取一个预编码矩阵,用户对此作出相应反馈,基站选取一个主用户,并选择一个对主用户干扰最小的预编码矩阵作为第2个预编码矩阵,然后通过第2次训练选择次用户。这种多次训练的方式能显式地控制复用用户之间的相互干扰,并且只需要很少的反馈量。由于这种方法能调度信道条件较好并且相互正交性较好的多个用户,它能够充分利用多用户 MIMO 系统的多用户分集增益和空分复用增益。实际系统中,多个用户可能具有不同的天线配置,通过融合文献[1]中的随机正交波束空分多址技术思想,本文提出的调度方案能进一步推广应用到这种异构情形。

## 2 多波束复用系统模型

考虑多用户多天线系统的下行链路,基站配置  $M$  根发射天线,用户端配置  $N$  根接收天线,通常有  $M > N$ 。假设基站需要服务的用户总数为  $U$ ,一个时隙可以同时发送  $K$  个用户的信息,并采用多用户预编码。每个用户最多可支持  $N$  路独立的数据流,即使用多个波束,基站根据用户的反馈信息选择  $K$  个发送用户以及  $K$  个预编码矩阵  $\{W_k\}$ ,空分复用信道资源。选中的第  $k$  个用户以  $W_k$  为发送预编码矩阵或波束发送信号  $s_k$ ,基站总的发送信号可以表示为

$$S = \sum_{k=1}^K W_k s_k \quad (1)$$

则被选择的第  $k$  个发送用户的接收信号为

$$\begin{aligned} y_k &= H_k \sum_{i=1}^K W_i s_i + n_k \\ &= H_k W_k s_k + H_k \sum_{i=1, i \neq k}^K W_i s_i + n_k \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $H_k$  为  $N \times M$  维的平坦瑞利衰落信道矩阵;  $n_k$  为白噪声矢量,其元素的单边功率谱密度为  $N_0$ 。同时约定并有  $E[s_i s_i^H] = E_i I_N$ ,其中  $E[\cdot]$  为期望运算符;

一般的多用户预编码方案需要在发射端精确已知所有用户的 CSI,为了减小系统的反馈开销,本文提出的系统将采用预编码码本的方式,即预先定义好一组预编码矩阵,构

成一个码本,每个预编码矩阵作为一个码字对应一个唯一的标号。每次调度时基站从码本中选取  $K$  个预编码矩阵并分配给信道条件匹配的  $K$  个用户,为了保证一定的用户调度公平性,基站在选取预编码矩阵时需要具有一定的随机性,但由于同时调度多个用户,因此需要充分考虑复用用户之间的相互干扰。

## 3 逐次训练调度方案

首先考虑天线配置满足  $M/N = 2$  的情形,在这种情况下,基站每次需要调度两个空分复用用户,每个用户发送  $N$  路独立数据流,与文献[8]中的多用户随机预编码方案不同的是,本文提出的调度方案能够显式地控制复用用户之间的相互干扰,并具有很低的反馈开销。如图1所示,在调度的初始阶段,基站从码本中随机选取一个  $M \times N$  维的预编码矩阵  $W_1$  作为此次调度的发送预编码矩阵之一,这里称之为主预编码矩阵。各个用户在获知此信息后利用各自的 CSI 计算以  $W_1$  作为预编码矩阵所能支持的容量,并把它作为 CQI 反馈给基站,需要指出的是,由于此时采用空分多址接入 SDMA 模式,即两个用户复用信道资源,用户在计算支持容量时需要考虑其他用户的干扰信息。与一般的调度方案不同的是,本文的调度方案在用户第一次反馈时还需要额外反馈码本中与用户干扰最小的预编码矩阵的编号,基站在收集各个用户的上述反馈信息后选择一个主发送用户,该用户将以  $W_1$  为预编码矩阵发送数据,同时确定第2个将采用的发送预编码矩阵  $W_2$ 。到此为止,调度算法完成了第1个训练步骤。为了选择第2个发送用户(次发送用户),该用户将以  $W_2$  为预编码矩阵利用同一信道资源发送数据,调度算法需要进行第二次训练。在第二次训练的初始阶段,基站需要把  $W_1$  和  $W_2$  的编号广播给各用户,然后用户根据自身 CSI 计算若以  $W_2$  为发送预编码矩阵,以  $W_1$  为干扰矩阵时所能支持的容量,并反馈给基站,基站以此信息选择一个次发送用户。

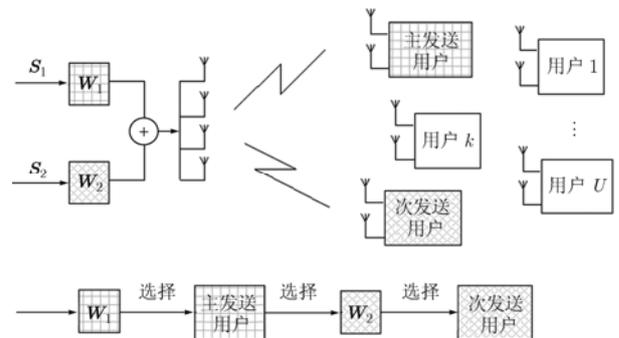


图1 4发2收多用户系统下行链路逐次调度方案的模型图

基于以上思想,各移动端的处理任务为:仅根据估计出的信道信息(由基站到自身的下行信道)及基站和用户所共享的码本来计算出 SDMA 模式下所能支持的最大速率及首选

的干扰用户预编码矩阵。由于实际数据传输模型与调度模型可能有出入,本文采用等效的虚拟模型来进行码字的选择及速率的计算。假设用户端能精确估计其信道状态信息 CSI,因为所有用户的发送预编码矩阵都选自同一码本,在计算用户  $k$  所能支持的容量时可以首先建立如下的虚拟等效模型:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{U}_1 \mathbf{s}_1 + \mathbf{H}_k \mathbf{U}_2 \mathbf{s}_2 + \mathbf{n}_k \quad (3)$$

其中  $\mathbf{U}_1$  视为该用户的发送预编码矩阵,而  $\mathbf{s}_1$  则视为该用户的发送数据;右边第 2 项认为是其他用户的干扰项。若用  $\Omega$  表示码本,则有  $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2 \in \Omega, \mathbf{U}_1 \neq \mathbf{U}_2$ 。

在第 1 个训练步骤中,由于主预编码矩阵在调度初始阶段已经确定,故有  $\mathbf{U}_1 = \mathbf{W}_1$ ,而  $\mathbf{U}_2$  可能为码本中除  $\mathbf{W}_1$  外的任一码字。假设用户端采用 MMSE 检测方法,线性处理后的接收信号可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_k &= \mathbf{G}_k^H \mathbf{y}_k = \mathbf{G}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{U}_1 \mathbf{s}_1 + \mathbf{G}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{U}_2 \mathbf{s}_2 + \mathbf{G}_k^H \mathbf{n}_k \\ &= \mathbf{G}_k^H \tilde{\mathbf{H}}_{k,1} \mathbf{s}_1 + \mathbf{G}_k^H \tilde{\mathbf{H}}_{k,2} \mathbf{s}_2 + \mathbf{G}_k^H \mathbf{n}_k \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{G}_k = \left( \mathbf{H}_k \mathbf{U}_1 \mathbf{U}_1^H \mathbf{H}_k^H + \mathbf{H}_k \mathbf{U}_2 \mathbf{U}_2^H \mathbf{H}_k^H + \frac{N_0}{E_s} \mathbf{I}_N \right)^{-1} \mathbf{H}_k \mathbf{U}_1 \quad (5)$$

当  $\mathbf{U}_2$  取码本中的第  $i$  个码字时,则用户的第  $n$  个数据流的 SINR 可以表示为

$$\mu_{k,n,i} = \frac{|\mathbf{G}_k^H \tilde{\mathbf{H}}_{k,1}|_{nm}|^2}{\sum_{m \neq n} |\mathbf{G}_k^H \tilde{\mathbf{H}}_{k,1}|_{nm}|^2 + \|\mathbf{G}_k^H \tilde{\mathbf{H}}_{k,2}\|_n^2 + \frac{N_0}{E_s} \|\mathbf{G}_k^H\|_n^2}, \quad n = 1, \dots, N \quad (6)$$

式(6)中  $(\mathbf{A})_{nm}$  表示矩阵  $\mathbf{A}$  的第  $(n, m)$  个元素,  $(\mathbf{A})_n$  表示矩阵  $\mathbf{A}$  的第  $n$  行。因此,  $\mathbf{U}_2$  在可能的第  $i$  种取值时用户  $k$  所能支持的速率可以表示为

$$C_{k,i} = \sum_{n=1}^N \log(1 + \mu_{k,n,i}) \quad (7)$$

遍历  $\mathbf{U}_2$  所有的取值可能,可以得到用户  $k$  能支持的最大速率:

$$C_k^1 = \max_i \{C_{k,i}\} \quad (8)$$

实际上,用户  $k$  获得  $C_k^1$  时  $\mathbf{U}_2$  的取值即为码本中对用户干扰最小的码字,其编号可以表示为

$$I_k = \arg \max_i \{C_{k,i}\} \quad (9)$$

完成上述计算后,用户  $k$  向基站反馈  $C_k^1$  和  $I_k$ ,  $C_k^1$  作为 CQI 信息在实际系统中一般先要进行量化处理。基站在收集所有用户的反馈信息后,选择具有最大支持速率的用户作为当前调度的主发送用户,即

$$\kappa_1 = \arg \max_k \{C_k^1\} \quad (10)$$

并把该用户同时反馈的标号  $I_{\kappa_1}$  对应的码字作为次发送预编码矩阵,记为  $\mathbf{W}_2$ ,因为该矩阵对主发送用户具有最小的干扰,也意味着调度方案能显式地控制了次发送用户对主发送用户的干扰。

第 2 个训练步骤的主要任务是寻找次发送用户,由于主

发送预编码矩阵和次发送预编码矩阵已经由第 1 个训练步骤确定,调度方案将选择具有最大支持速率的用户作为次发送用户。同样采用式(3)的虚拟模型来计算各个用户的支持速率,与第 1 个训练步骤不同的是,此时有  $\mathbf{U}_1 = \mathbf{W}_2, \mathbf{U}_2 = \mathbf{W}_1$ ,类似上述的计算方法,很容易得到用户  $k$  的支持速率  $C_k^2$ ,此时用户只需要向基站反馈  $C_k^2$ 。基站在收集所有请求用户的反馈后,选择具有最大支持速率的用户作为次发送用户,即

$$\kappa_2 = \arg \max_k \{C_k^2\} \quad (11)$$

实际上,由上面的计算过程可以发现,具有最大支持速率的用户的信道条件一般需要满足下面两个特征:(1)信道条件与  $\mathbf{W}_2$  尽可能匹配;(2)  $\mathbf{W}_1$  对该信道干扰尽可能小。从这个意义上来说,第 2 个训练步骤隐性地控制了主发送用户对次发送用户的干扰。

需要指出的是,整个调度过程仅需要很小的反馈量,即  $\{C_k^1, C_k^2, I_k\}$ ,通过逐次的训练过程,有效地控制了两个复用用户之间的相互干扰。

#### 4 调度算法的推广

上节主要考虑了天线配置满足  $M/N = 2$  时,本节将考虑用户具有异构天线配置的情形,假设用户最多配置  $N = M/2$  根天线,不同的用户可能有  $\{N, N/2, N/4, \dots, 1\}$  多种不同的天线配置。为了充分利用多天线的空间自由度,这时候可能需要同时调度超过两个用户空分复用。由上节的调度机制可以看到,如果同时调度两个用户,其相互干扰可以通过低反馈的逐次调度进行有效控制。在更具一般性的异构天线配置情形下,码本中码字定义为  $M \times N$  的预编码矩阵,这样上节的调度方案可以结合文献[1]中的随机正交波束空分多址技术按组逐次调度用户。具体思路如下,通过逐次调度方案可以半随机地从码本中选择两个发送预编码矩阵及其相应的用户组,同时利用随机正交波束空分多址技术把发送预编码矩阵中各波束分配给相应用户组中的具体用户,即把波束分配给具有最高 SINR 的用户。因此,当多用户复用信道时仍采用两个发送预编码矩阵,并结合正交抑制干扰的方法,多个用户选择合适的波束同时发送数据。总体的调度方案和第 3 节类似,不同的是,各用户在第 1 个训练步骤中的反馈信息会随自身的实际接收天线数而有所不同,如果用户天线数为  $N$ ,则其反馈完全等同于第 3 节的情形。若第  $k$  个用户的接收天线  $N_k < N$ ,则首先把  $\mathbf{U}_1$  分解成  $\mathbf{U}_1 = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \dots \ \varphi_P]$ ,其中  $P = N/N_k$ ,  $\varphi_p$  为  $M \times N_k$  的矩阵,同样,  $\mathbf{s}_1 = [\mathbf{s}_{11}^T \ \mathbf{s}_{12}^T \ \dots \ \mathbf{s}_{1P}^T]^T$ ,此时式(3)可以重新表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_k &= \mathbf{H}_k \sum_{i=1}^P \varphi_i \mathbf{s}_{1i} + \mathbf{H}_k \mathbf{U}_2 \mathbf{s}_2 + \mathbf{n}_k \\ &= \mathbf{H}_k \varphi_p \mathbf{s}_{1p} + \underbrace{\mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq p}^P \varphi_i \mathbf{s}_{1i}}_{\text{Interference}} + \mathbf{H}_k \mathbf{U}_2 \mathbf{s}_2 + \mathbf{n}_k \end{aligned} \quad (12)$$

然后,用户  $k$  分别视  $\varphi_p, p=1, \dots, P$  为发送矩阵或波束,其余数据项为干扰,类似上一节的方法,分别计算  $\mathbf{s}_{1p}$  中各数流的 SINR, 记为  $\mu_{p,n,i}^k$ , 其中下标  $n$  表示第  $n$  个数据流,  $n \in [1, N_k]$ , 下标  $i$  表示  $\mathbf{U}_2$  在码本中第  $i$  种取值。则对应不同的  $p$  值和  $i$  值, 用户  $k$  支持的速率可以表示为

$$C_{p,i}^k = \sum_{n=1}^{N_k} \log(1 + \mu_{p,n,i}^k) \quad (13)$$

用户从  $\{C_{p,i}^k, i, p\}$  中的最大值反馈给基站, 同时把对应的指标  $p$  和  $i$  同时反馈给基站。

基站根据反馈信息, 把反馈相同预编码矩阵编号  $i$  的用户归在一起, 组成多个类, 并根据相应的  $p$  值, 在类内寻找最好的一种波束分配方案, 使得  $\mathbf{U}_1$  中各波束能承载最大的和速率。然后选取具有最大和速率的一个类, 该类对应的  $i$  值标示的预编码矩阵即为次发送预编码矩阵, 该类中最佳波束分配对应的用户即为次发送用户组。在第 2 个训练步骤中, 若用户天线数  $N_k < N$ , 同样需要额外反馈对应的  $p$  值, 用类似的方法同样确定次发送预编码矩阵对应的次发送用户组。

## 5 仿真结果

本节将用计算机仿真考察本文提出的随机预编码与复用方案的性能。仿真时假设基站配置 4 根发射天线, 用户端配置 2 根接收天线, 信道环境为平坦衰落, 各用户的信道矩阵具有相同的统计特性, 各用户接收端具有相同的噪声方差, 其信噪比定义为  $\text{SNR} = ME_s/N_0$ 。仿真时码本采用 Grassmannian 预编码码本<sup>[9]</sup>, 注意这里并未对码本进行优化选择。

图 2 和图 3 给出了独立信道环境下不同信噪比 ( $\text{SNR} = 20\text{dB}, \text{SNR} = 10\text{dB}$ ) 时本文提出方案的系统平均吞吐量随用户数变化的曲线, 为了同其他随机波束形成/预编码与复用方案比较, 图中同时给出了文献[8]中并未显式考虑用户间干扰的随机预编码与复用方案(RBF+SDMA)的性能, 以及文献[1]中的随机正交波束空分多址方案(Orthogonal RBF+SDMA)的性能。由图所示, 各方案获得的吞吐量都随着同时请求服务的用户数的增加而增加, 这是由于随机波束方式能充分利用系统的多用户分集。虽然各方案都采用了多用户空分复用, 文献[8]的方案由于在设计多个随机预编码矩阵时并未考虑用户间的干扰问题, 因此相对其他方案, 该方案性能较差, 相比随机正交波束空分多址方案在用户数较多时 ( $U = 40$ ) 有  $1 \sim 1.5\text{bps/Hz}$  的间距。本文提出的方案通过逐次训练(两次训练)的方式更加有效地抑制了用户间的干扰, 因此在较高信噪比 ( $\text{SNR} = 20\text{dB}$ ) 时其性能明显优于其他方案, 当采用 64 长度的 Grassmannian 码本时, 相比随机正交波束空分多址方案在用户数较多时有  $0.5\text{bps/Hz}$  左右的性能增益, 而在用户数较少时则有  $1\text{bps/Hz}$  的增益, 说明本文提出的方案对用户数的减少具有很好的鲁棒性。而当采用

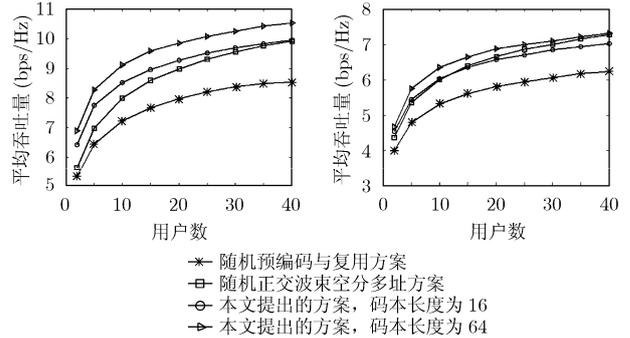


图2 随机多波束多用户复用系统的平均吞吐量 ( $\text{SNR}=20\text{dB}$ )

图3 随机多波束多用户复用系统的平均吞吐量 ( $\text{SNR}=10\text{dB}$ )

16 长度的码本时, 本文的方案在用户数较少时仍优于随机正交波束空分多址方案的性能, 码本长度的减小限制了文中方案的随机性, 从而减少了多用户分集增益。当用户信噪比较低 ( $\text{SNR} = 10\text{dB}$ ) 时由于此时噪声的影响明显增强, 各方案之间的性能差距有所缩小, 但本方案当采用 64 长度的预编码码本时仍然具有最优的性能。

实际系统中基站往往由于周围散射体的缺乏而使多天线之间存在一定的空间相关性, 图 4 给出了考虑发射端空间相关性(相邻天线之间相关系数为 0.5)时本文提出方案的吞吐量性能, 码本仍采用 64 长度的 Grassmannian 预编码码本。而作为比较的另外两种方案在随机产生预编码矩阵时首先生成和信道矩阵具有相同统计特性的随机矩阵, 然后经过 SVD 分解等方法产生随机预编码矩阵<sup>[10]</sup>, 这种方式能充分考虑信道空间相关性的影响。由图可见, 本文的方案即使在存在空间相关性的信道环境下仍然具有明显的性能优势。

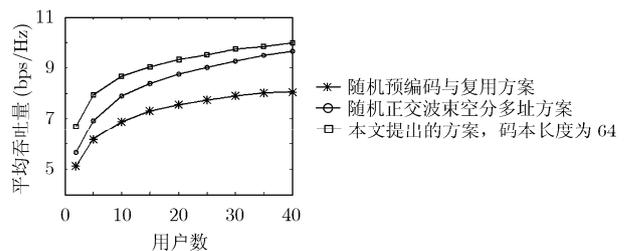


图4 相关信道下随机多波束多用户复用系统的平均吞吐量 ( $\text{SNR}=20\text{dB}$ )

## 6 结束语

针对多用户 MIMO 系统所具有的潜在的多用户分集和空间自由度, 本文提出了一种随机多波束复用技术。不同于一般的随机波束形成系统, 本文提出的方案中的预编码矩阵是在给定的码本内进行随机选取, 然后调度信道条件匹配的用户。为了充分利用 MIMO 系统的空间资源, 需要同时调度多个用户复用信道资源, 文中采用了一种逐次调度的方式, 第 1 次训练调度一个主发送用户并确定一个次发送预编

码矩阵, 通过第2次训练选择次发送用户。这种方式能以很小的反馈开销有效控制复用用户之间的相互干扰。仿真结果表明, 本文提出的方案由于同时利用了多用户分集以及空间自由度, 能获得比传统随机波束或预编码技术更优的吞吐量性能。

### 参考文献

- [1] Sharif M and Hassibi B. On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2005, 51(2): 506-522.
  - [2] Costa M. Writing on dirty paper. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1983, 29(3): 439-441.
  - [3] Windpassinger C, Fischer R F H, Vencel T, and Huber B J. Precoding in multiantenna and multiuser communications. *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 2004, 3(2): 1305-1316.
  - [4] Spencer Q H, Swindlehurst A L, and Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2004, 52(2): 461-471.
  - [5] Wong K K, Murch R, and Letaief K B. A joint-channel diagonalization for multiuser MIMO antenna systems. *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 2003, 2(4): 773-786.
  - [6] Viswanath P, Tse D N C, and Laroia R. Opportunistic beamforming using dumb antennas. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2002, 48(6): 1277-1294.
  - [7] Chung J, Hwang C S, Kim K, and Kim Y K. A random beamforming technique in MIMO systems exploiting multiuser diversity. *IEEE Journal Selected Areas Commun*, 2003, 21(5): 848-855.
  - [8] Bala E and Cimini Jr L J. A random precoding technique for the downlink of multiuser MIMO systems. Conference on Information Sciences and Systems, Princeton University, 2006. (<http://conf.ee.princeton.edu/ciss/schedule>)
  - [9] Love D J. [Dynamo.ecn.prudue.edu/~djlove/grass.html](http://dynamo.ecn.prudue.edu/~djlove/grass.html).
  - [10] Sharma N and Ozarow L H. A study of opportunism for multiple-antenna systems. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2005, 51(5): 1804-1814.
- 黄永明: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为 MIMO 通信信号处理、多用户信号处理。  
许道峰: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为 MIMO 通信系统中的信号处理、多用户系统信号处理。  
杨绿溪: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动通信空时信号处理、盲信号处理和神经网络。