

多用户 MIMO 系统中基于快速匹配调度的有限反馈 SDMA

余辉^{1,2}, 黄永明^{1,2}, 杨绿溪^{1,2}

(1. 东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 东南大学 水声信号处理教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 提出了一种能高效利用多用户分集和空分复用增益的有限反馈空分多址 (SDMA, space division multiple access) 方法。首先利用子空间扰动的方法构造了一种具有分簇结构的多用户预编码码本。基于该码本, 进一步给出了一种新型的多用户机会调度算法, 该算法利用码本的簇结构实现对信道条件匹配的用户组进行快速的机会调度, 同时确定被调度用户的首选码字。仿真结果表明, 在蜂窝网络中, 与传统的有限反馈 SDMA 方法相比, 所提方法可以在不明显增加反馈开销的前提下显著提高系统吞吐量。

关键词: 无线通信; 多用户预编码; 机会调度; 空分多址; 多用户分集

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)02-0011-07

Limited feedback SDMA scheme based on quick-match user scheduling for multiuser MIMO systems

YU Hui^{1,2}, HUANG Yong-ming^{1,2}, YANG Lv-xi^{1,2}

(1. School of Information Science and Engineering, Southeast Univ., Nanjing 210096, China;

2. Key Laboratory of Underwater Acoustic Signal Processing of Ministry of Education, Southeast Univ., Nanjing 210096, China)

Abstract: A limited feedback SDMA (space division multiple access) scheme was proposed by constructing a new codebook and developing a related opportunistic scheduling algorithm. In particular, an SDMA codebook was first devised, which had a cluster-based structure and was generated by using a subspace perturbation method. Then, a novel opportunistic scheduling algorithm was proposed to exploit the cluster structure of the devised codebook. The algorithm was capable of rapidly finding a group of channel-matching users together with their preferred precoders. Simulation results demonstrate that in cellular networks, the proposed SDMA scheme outperforms conventional limited feedback SDMA schemes in terms of throughput, with a comparable feedback overhead.

Key words: wireless communications; multiuser precoding; opportunistic scheduling; SDMA; multiuser diversity

收稿日期: 2009-04-08; 修回日期: 2010-06-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目 (2007CB310603); 国家自然科学基金资助项目 (60672093, 60902012); 国家科技重大专项 (2009ZX03003-004); 教育部博士点新教师基金 (20090092120013); 东南大学科技基金资助项目 (KJ2009349)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2007CB310603); The National Natural Science Foundation of China (60672093, 60902012); The National Science and Technology Major Project of China(2009ZX03003-004); The Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20090092120013); The Technology Project of Southeast University under Grant (KJ2009349)

1 引言

在多天線廣播信道中，利用空間資源可以同時同頻向多個用戶發送數據，即空分复用多個用戶，這種技術稱為空分多址（SDMA）技術^①。相對於傳統的時分多址（TDMA），SDMA 技術可以成倍地提高系統吞吐量。研究表明，在向多個用戶終端發送數據時，紙帶編碼（DPC）^[1]技術通過非線性多用戶預編碼能獲得最優的和容量性能，但該技術複雜度過高並不實用。相比而言，線性多用戶預編碼技術能在複雜度和性能之間取得較優的折衷，典型的方法主要包括迫零（ZF）多用戶預編碼技術^[2]、最小均方誤差（MMSE）多用戶預編碼技術^[3]、基於廣義特徵值多用戶預編碼技術^[4]以及迭代預編碼技術^[5]等。當用戶數目較多時，上述線性多用戶預編碼技術需結合多用戶調度以利用多用戶分集增益，從而提高 SDMA 的性能。但需要指出的是，上述技術通常需要基站完全已知所有用戶的信道狀態信息（CSI），這在實際系統中很難實現。

為此，基於信道信息有限反饋的 SDMA 技術近年來受到廣泛關注，根據反饋信息的具體內容大致可以分為 2 類：基於信道量化的 SDMA 技術^[6-8]和基於預編碼/波束碼本的 SDMA 技術^[9]。前者通過對用戶信道矢量或矩陣進行量化，生成基站和用戶終端皆先驗已知的信道量化碼本，以達到減少反饋信息量的目的。但為了保證穩定的系統性能，其反饋量往往需要隨着用戶信道天線維數的增加而增加。相比而言，後者通過量化預編碼/波束的方法達到減少反饋量的目的，因此其反饋開銷對用戶信道接收端天線維數的增加並不敏感，其性能主要依賴於預編碼碼本的構造以及多用戶調度算法的效率。

本文主要考慮多輸入多輸出（MIMO）多用戶系統下行鏈路的有限反饋 SDMA 方案設計，由於目前已有的預編碼碼本構造方法主要針對對點的 MIMO 系統^[9-11]，把其直接應用到 SDMA 系統並不合適，因此文中給出了一種新的預編碼碼本構造方法，生成碼本具有分簇結構。在此基礎上，本文同時提出了一種多用戶機會調度算法，其對應的用戶反饋信息包括首選碼字和最小干擾

簇的標號以及相應的信道質量信息（CQI）。利用該反饋信息，基站可對信道條件匹配的用戶進行快速分組並選擇和速率最高的一組用戶作為被調度用戶。由於所提方法在調度用戶時兼顧了用戶自身信道條件以及用戶之間信道正交性，因此能高效利用多用戶 MIMO 系統的多用戶分集增益和空分复用增益。

本文組織如下：第 2 節介紹了 MIMO 多用戶通信系統下行鏈路模型；第 3 節基於陣列信號處理的理論設計了一種新的 SDMA 碼本；第 4 節基於該碼本得到了一種只需要用戶反饋有限信息的机会調度算法；第 5 節給出了仿真結果；第 6 節是結束語。

2 系統模型

考慮多用戶多天線通信系統的下行鏈路，基站配置 n_T 根發射天線，用戶端都配置 n_R 根接收天線，通常 $n_T \geq n_R$ 。假設基站需要服務的用戶總數為 U ，在一個時隙內可以採用多用戶預編碼技術同時服務 K 個用戶，各用戶均支持 M 路數據流。基站根據用戶的反饋信息選擇 K 個發送用戶以及 K 個預編碼矩陣 $\{\mathbf{W}_k\}$ 空分复用信道資源。若第 k 個用戶的發送信號表示為 \mathbf{s}_k ，則基站的發送信號可以表示為

$$\mathbf{S} = \sum_{k=1}^K \mathbf{W}_k \mathbf{s}_k \quad (1)$$

此時，第 k 個用戶的接收信號為

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{W}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{H}_k \sum_{i \neq k, i=1}^K \mathbf{W}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{n}_k \quad (2)$$

其中， \mathbf{H}_k 為 $n_R \times n_T$ 維的平坦衰落信道矩陣； \mathbf{n}_k 為白噪聲矢量，其功率譜密度為 N_0 。不失一般性，假定 $\mathbf{E}[\mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H] = \mathbf{E}_s \mathbf{I}_M$ ，其中， $\mathbf{E}[\cdot]$ 為期望運算符， \mathbf{E}_s 為信號的發送功率。

為了降低反饋量，考慮預先定義一個包含可選預編碼矩陣的 SDMA 預編碼碼本。每次調度時基站根據用戶的反饋信息選擇 K 個用戶並分配 K 個首選碼字。與傳統的對點通信系統預編碼碼字選擇不同，機會調度 SDMA 技術需要額外考慮用戶間的干擾抑制。

3 SDMA 碼本構造

本節給出了一種新的碼本構造方法，碼字維數

^① 通常 SDMA 概念亦被應用於上行多址信道，本文特指下行多用戶空分多址技術。

为 $n_T \times n_T/2$ ，主要适用于用户端天线配置不超过 $n_T/2$ 的多用户系统。与从 Grassmannian 子空间角度出发构造码本的方法不同，本文从波达方向的角度构造码本。将预编码矩阵的每一列看成是一个波束，分 2 步构造码本。

1) 先设计一些波束，并将其分为几个子集。各子集的波束共同构成一个预编码矩阵。各波束如下：

$$\mathbf{b}_l = \frac{1}{\sqrt{n_T}} [1 \quad e^{j\theta_l} \quad \dots \quad e^{j(n_T-1)\theta_l}]^T \quad (3)$$

其中， θ_l 是波束的相位，即波达方向，以 2π 为周期。在 $0 \sim 2\pi$ 区间均分相位值，如 $\theta_l = 2\pi(l-1)/n_b$ ($l=1, \dots, n_b$)。可产生 n_b 个波束：

$$\mathbf{b}_l = \frac{1}{\sqrt{n_T}} [1 \quad e^{j2\pi(l-1)/n_b} \quad \dots \quad e^{j2\pi(n_T-1)(l-1)/n_b}]^T, l=1, \dots, n_b \quad (4)$$

由阵列信号处理理论可知，由此产生的波束以 $\pi/n_b/d_T$ 的角度等间隔等功率传输^[12]，其中 d_T 为相邻发射天线之间的间隔。假设 n_b 满足 $n_b = n_U n_T$ ， n_U 为整数。将一系列波束构造为如下酉矩阵阵：

$$\mathbf{B}_s = [\mathbf{b}_s, \mathbf{b}_{s+n_U}, \dots, \mathbf{b}_{s+(n_T-1)n_U}], s=1, \dots, n_U \quad (5)$$

2) 上一步的归一化矩阵将用于产生多簇。首先将每个 \mathbf{B}_s 分为 2 个子矩阵，表示为 $\mathbf{B}_s \left(1: \frac{n_T}{2} \right)$ ， $\mathbf{B}_s \left(\frac{n_T}{2} + 1: n_T \right)$ 。然后利用扰动酉矩阵 $\{A_i D(i=1, \dots, L_c)\}$ ^[13] 乘以各子矩阵从而构成相应的簇。其中 $A_i = \text{diag}(e^{j\phi_{i1}}, e^{j\phi_{i2}}, \dots, e^{j\phi_{in_T/2}})$ ， ϕ_{im} 是 $[0, 2\pi]$

内均匀分布的随机变量， D 表示维数为 $\frac{n_T}{2} \times \frac{n_T}{2}$ 的归一化 DFT 矩阵，即 $D = \{D_{mm}\}$ ， $D_{mm} = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{j \frac{4\pi(m-1)(n-1)}{n_T}}$

($m, n=1, 2, \dots, \frac{n_T}{2}$)。由于每一对子矩阵都组成酉矩阵，故由这些矩阵张成的子空间是相互正交的。事实上，利用这种正交性可以获得渐近最优的 SDMA 性能^[14]。

码本构建的过程如图 1 所示。由图 1 可知本节构造的 SDMA 码本包含 $N_c = 2n_U$ 个簇。每个簇含有 L_c 个预编码矩阵。实际上 IEEE 802.20 SDMA 码本^[9]是本文所提码本配置为 $n_U=1, n_T=4$ 的一个特例。值得一提的是，本节所提码本不仅增大了簇数，而且还扩展了由此产生的多用户预编码的模式。

4 调度算法

利用上述码本的分簇结构，本节设计了一种只需要用户反馈有限信息的机会调度算法。该算法的目的是在 n_T 个固定子流上调度多个用户以达到系统吞吐量最大化。首先研究 $n_T = 2n_R$ 的天线配置模型，每个用户复用 n_R 个子流。此时需要基站同时选择 2 个用户发送信息。

4.1 快速匹配机会调度

4.1.1 反馈信息

为了获得第 k 个用户在 SDMA 模式下的最大可达速率，假定如下的虚拟收发模式：假定用户端已知准确信道状态信息，基站发送给该用户的信号为 s_1 、预编码矩阵为 \mathbf{U}_1 。同时基站以等功率发送信号 s_2 给另一用户、预编码矩阵为 \mathbf{U}_2 。 \mathbf{U}_1 和 \mathbf{U}_2 为码

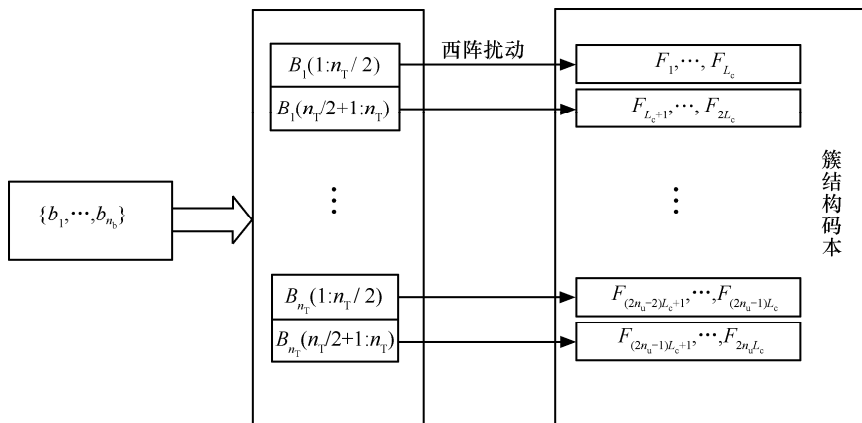


图 1 SDMA 码本结构

本中任意 2 个不同的码字。由此 $[U_1, U_2]$ 组成了多用户联合预编码矩阵。此时，用户 k 的虚拟接收信号可表示为

$$y_k = H_k U_1 s_1 + H_k U_2 s_2 + n_k \quad (6)$$

若采用 MMSE 接收机，虚拟接收信号的线性滤波输出可表示为

$$z_k = G_k^H y_k = G_k^H H_k U_1 s_1 + G_k^H H_k U_2 s_2 + G_k^H n_k \quad (7)$$

其中

$$G_k = \left(H_k U_1 U_1^H H_k^H + H_k U_2 U_2^H H_k^H + \frac{N_0}{E_s} I_N \right)^{-1} H_k U_1 \quad (8)$$

若把第 i 种可能的预编码矩阵组合 (U_1, U_2) 表示为 $(U_1^{(i)}, U_2^{(i)})$ ，相应的 G_k 表示为 G_k^i ，则第 m 路数据流的信干噪比如下：

$$\mu_{k,m,i} = \frac{1}{1 - \left[(U_1^{(i)})^H H_k^H G_k^{(i)} \right]_{mm}} - 1, \quad m \in [1, M] \quad (9)$$

$$\tilde{\mu}_{k,m,i} = \frac{1}{1 - \left[\left(A_1^H U_1^H H_k^H \left(H_k U_1 U_1^H H_k^H + H_k U_2 U_2^H H_k^H + \frac{N_0}{E_s} I_N \right) H_k U_1 A_1 \right) \right]_{mm}} - 1, \quad m \in [1, M] \quad (12)$$

由式(12)可知对预编码矩阵 U_1 的扰动将会影响信干噪比，进而影响系统性能，实际上扰动可以补偿线性接收机所造成的性能损失^[13]。然而，对于扰动预编码矩阵 U_2 的扰动并不影响系统的信干噪比性能。这意味着利用同一簇中的任一预编码阵作为干扰预编码阵得到的性能都是相同的。因此只需逐个搜索矩阵 U_1 并按簇搜索 U_2 即可获得最大可达速率。将用户达到最大速率时的期望干扰簇表示为 J_k 。

本节机会调度算法充分利用了所提码本的簇结构以降低反馈开销并简化算法的复杂度。在每次调度中，用户 k 仅需要反馈以下信息：1) SDMA 模式下支持的最大可达速率 C_k ；2) 其首选码字索引 I_k ；3) 期望干扰簇索引 J_k 。

4.1.2 选择算法

基站收到各用户的反馈信息后，根据反馈索引将用户分类并将具有较好正交性的类两两作为一组，这样可以得到信道条件好且相互间具有较好干扰抑制的用户组。具体步骤如下。

理想状态下，此时的可达速率为

$$C_{k,i} = \sum_{m=1}^M \log(1 + \mu_{k,m,i}) \quad (10)$$

通过遍历 (U_1, U_2) 的所有选择，可得该系统的最大可达速率，计算公式为

$$C_k = \max_{i \in [1, L(L-1)]} \{C_{k,i}\} \quad (11)$$

其中， $L = N_c L_c$ 表示码本的大小。若不考虑所用码本的分簇结构，获得上述 C_k 共需搜索码本组合 $L(L-1)$ 次，使速率达到 C_k 的预编码阵 U_1 和 U_2 则分别作为用户的首选预编码阵(表示为 I_k)和期望干扰预编码阵。

下面将指出利用所提码本的簇结构特性实际上可以大大降低计算复杂度。首先研究预编码矩阵 U_1 和 U_2 的扰动对线性接收机 SDMA 系统的和速率的影响。定义扰动后的新预编码矩阵为 $\tilde{U}_1 = U_1 A_1$ 和 $\tilde{U}_2 = U_2 A_2$ ，其中， A_1 和 A_2 为扰动酉矩阵。由式(9)可知在 SDMA 接入系统中采用预编码阵 $(\tilde{U}_1, \tilde{U}_2)$ ，则其第 m 个数据流的信干噪比为

1) 将首选码字所在的簇作为首选簇。对于用户 k ，其首选簇的索引用 \tilde{J}_k 表示。基于以上信息及期望干扰簇索引 $\{J_k\}$ ，用户可以做以下分类：具有相同首选簇 m 和期望干扰簇 n 的用户分为一类，用 (m, n) 表示，

$$\text{类}(m, n) \triangleq \{k \mid \tilde{J}_k = m, J_k = n\}$$

如果假定调度的用户所选码字必须来自不同的簇，那么将会有 $N_g = 2n_U(2n_U - 1)$ 个不同类。

2) 将类 (m, n) 和类 (n, m) 作为一组，用 $n \sim m$ 表示。由于这 2 个类的信道具有很好的正交性，它们之间的互干扰将会被抑制。

3) 在组 $n \sim m$ 中，找出类 (m, n) 和类 (n, m) 中可支持和速率达到该组最大值的用户对。此时，本方案将获得多用户分集增益。

4) 在所有可能的组中找到和速率最大的组；该组中达到最大速率的 2 个用户将作为本次调度的用户。

本算法旨在找出信道条件好且相互间具有较

好正交性的 2 个用户, 故称之为快速匹配机会调度。有可能信道条件好的用户不能找到与之匹配的用户, 但是其可支持速率大于任 2 个用户的和速率。此时本算法将再次在该用户的期望干扰簇中找出可达和速率最大的次用户, 并调度该组用户。

当所提码本只包含 2 个簇($n_U=1$)时, 本方案即简化为 IEEE 802.20 中的 MIMO-SDMA 算法^[9]。此时只有 $N_g = 2n_U(2n_U - 1) = 2$ 个有效类, 调度算法中只包含 1 组簇; 故步骤 4) 可以省略。同时也可省去反馈信息中的期望干扰簇索引。

4.1.3 反馈开销及调度复杂度

该算法的调度信息包括 $\{C_k, I_k, J_k\}$, 总反馈比特数为 $Q(C_k) + \log(N_c^2 L_c)$, 为了获得最大可支持速率, 需要按式(9)、式(10)计算 $N_c L_c (N_c - 1)$ 次可达速率。为了便于比较, 同时分析了 IEEE 802.20 SDMA^[9]的反馈开销, 由于 IEEE 802.20 SDMA 码本只由 2 个簇组成, 每个簇包含 14 个码字, 此时用户只需反馈 CQI 和一个码字索引, 因此该方案的反馈开销包括 $Q(C_k) + 5$ bit。

4.2 调度算法扩展

上述调度算法仅限于基站同时服务 2 个用户。此节将其扩展至更普通的应用场景。假设用户端天线配置为 $n_r \in \{n_T/2, n_T/4, n_T/8, \dots, 1\}$, 为使算法适用于该情形, 需一次调度数目大于 2 的多个用户。由于预编码码字维数为 $n_T \times n_T/2$, 每个被选预编码矩阵可能承载多个用户的信号。

若用户 k 的可复用流数小于 $n_T/2$, 即 $M < n_T/2$, 则该用户只用到某个预编码码字的一列或子矩阵作为发送波束或矩阵。此时要修正方程(6)的虚拟接收模式使之不仅能计算最大可达速率, 同时能选出首选预编码码字及首选子矩阵。首先将 U_1 分割为 $U_1 = [\Phi_1, \dots, \Phi_p]$, 其中, $\Phi_1 \in C^{n_r \times M}$ 、 $P = n_T/M$ 用户 k 的虚拟接收模型可修正为

$$y_k = H_k \Phi_p s_1 + H_k \bar{\Phi}_p \bar{s}_1 + H_k U_2 s_2 + n_k y_k \quad (13)$$

其中, s_1 表示基站发送给用户 k 的信号, Φ_p 为其预编码矩阵。 $\bar{\Phi}_p$ 为矩阵 U_1 中除去 Φ_p 的那部分。 \bar{s}_1 表示基站利用 $\bar{\Phi}_p$ 中的波束传送给其他用户的信号。该模型假定每次选择 2 个预编码矩阵 U_1 和 U_2 , 接收信息 s_1 和 \bar{s}_1 的目标用户被看为是共用一个预编码矩阵 U_1 的用户组。使用第 4.1 节类似方法可计算用

户 k 的第 m 个数据流的信干噪比。为了获得在 SDMA 模式下的最大可支持速率, 需遍历搜索所有可能的 (U_1, U_2) 组合及 Φ_p 。最大可达速率可以表示为

$$C_k = \max_{i,p} \sum_{m=1}^M \log(1 + \mu_{k,m,i,p}) \quad (14)$$

其中, $\mu_{k,m,i,p}$ 为第 m 个子流的信干噪比; i 和 p 分别为 $(U_1^{(i)}, U_2^{(i)})$ 及 Φ_p 的索引。令预编码矩阵 I_k 可获得的速率表示为 C_k 。期望干扰簇的定义同 4.1 节。由于用户 k 仅利用首选码字的一个子矩阵作为发送矩阵, 因此需额外反馈索引 P_k 以指出子矩阵的位置。将属于同一首选码字的用户分为一组, 表示为

$$S_i = \{k | I_k = i\} \quad (15)$$

其中, i 表示特定预编码矩阵的索引, 该组的元素是用户的索引值。将集合 S_i 分为若干子集 $S_{i,j}$, 其中 j 代表子集的索引号。 $S_{i,j}$ 具有如下特性

$$\bigcup_{k \in S_{i,j}} \{P_k\} = \{1, 2, \dots, P\} \quad (16)$$

该用户子集定义为虚拟用户。利用反馈信息可计算出该虚拟用户的最大可支持和容量, 即 $\sum_{k \in S_{i,j}} C_k$ 。基于虚拟用户概念的引入, 4.1 节的多用户调度算法很容易被扩展到本节考虑的更普通场景, 此时扩展算法的目标是每次选择 2 个虚拟用户以及对应的首选预编码码字。

该算法的调度信息包括 $\{C_k, I_k, J_k, P_k\}$, 总反馈比特数为 $Q(C_k) + \log(N_c^2 L_c P)$, 为了获得最大可支持速率, 需要按式(9)、式(14)计算 $N_c L_c (N_c - 1) P$ 次可达速率。

5 仿真结果

本节将用计算机仿真考察本文提出的有限反馈 SDMA 技术的性能。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, 信道采用准静态信道模型, 各用户接收端具有相同的噪声方差并定义 $SNR = \frac{n_T E_s}{N_0}$ 。仿真时假定 MIMO 通信系统中多个用户与基站等距并随机分布于基站周围的场景。本文的蒙特卡洛仿真将不考虑信道估计和反馈误差。

图 2 和图 3 给出了独立信道环境下不同信噪比

($SNR=25dB$, $SNR=15dB$) 本文提出方案的系统平均吞吐量与用户数变化的曲线, 为了与其他 SDMA 方案比较, 图中同时给出了 IEEE 802.20 SDMA 方案^[9]和采用任意归一化码字的随机 SDMA 方案^[14]的性能。采用 IEEE 802.20 方案的反馈开销为 $Q(C_k)+5bit$, 本文方案在码本大小为 4×4 和 4×8 ($m \times n$ 表示 $N_c = m$, $L_c = n$) 时分别需要反馈 $Q(C_k)+6bit$ 和 $Q(C_k)+7bit$ 。可见, 本文中快速匹配机会调度 SDMA 与 IEEE 802.20 SDMA 技术反馈开销相近。仿真结果显示本文所提 SDMA 技术在系统吞吐量方面优于 IEEE 802.20 SDMA。如图所示, 各方案所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 SDMA 技术能充分利用系统的多用户分集。本文所提方案更加有效地抑制了用户间干扰, 在用户数较多时与 IEEE 802.20 SDMA 相比有 $0.4bit/s/Hz$ 左右的间距; 且随着码本的增大可以获得更高的增益。

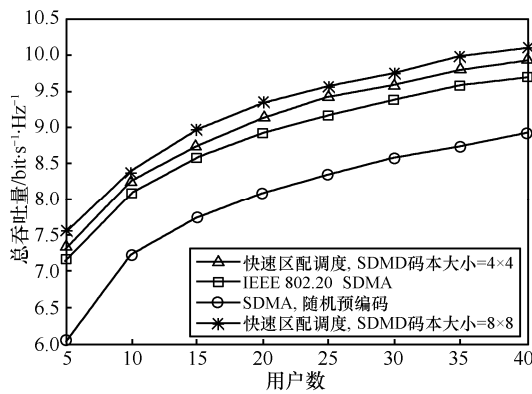


图 2 不同 SDMA 技术的系统吞吐量性能比较($SNR=15dB$)

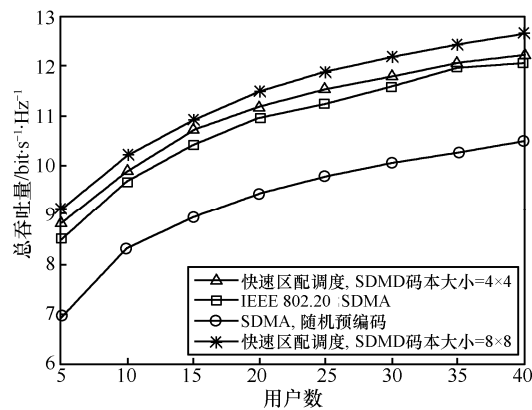


图 3 不同 SDMA 技术的系统吞吐量性能比较($SNR=25dB$)

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 和图 5 给出了发射端具有空间相关性(相关矩阵

$$R(i, j) = \begin{cases} 0, & i < j \\ r^{i-j}, & i, j = 1, \dots, n_T \end{cases}, \text{ 其中, } r = 0.6e^{j2\pi\theta}$$

$\theta \in [0, 1]$ 为服从均匀分布的随机变量)、接收端不具有空间相关性时本文所提方案的吞吐量性能。仿真结果显示该信道条件下, 本文所提 SDMA 技术与 IEEE 802.20 SDMA 相比具有 $0.7 \sim 1bit \cdot s^{-1} \cdot Hz^{-1}$ 的增益, 说明本文所提方案对空间相关性信道具有很好的顽健性。由于发射端天线具有空间相关性, 各 SDMA 技术的性能都有所下降。

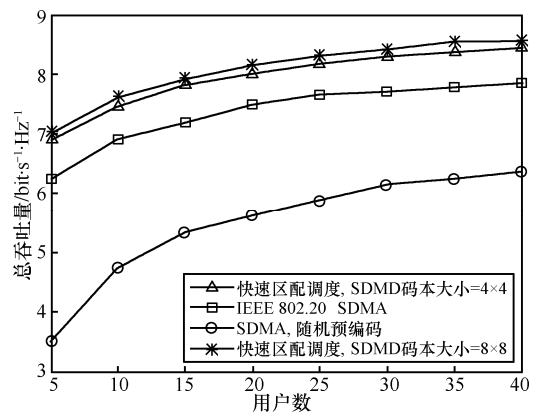


图 4 不同 SDMA 技术的系统吞吐量性能比较($SNR=15dB$)

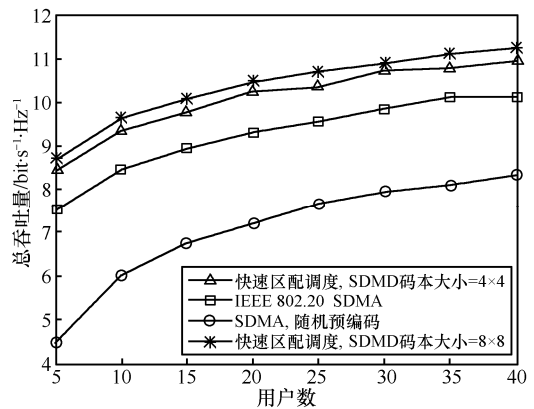


图 5 不同 SDMA 技术的系统吞吐量性能比较($SNR=25dB$)

6 结束语

本文结合多用户预编码码本构造和机会调度思想提出了一种新的有限反馈 SDMA 方法。首先从阵列信号处理和酉扰动的角度构造了具有簇结构的 SDMA 码本, 以簇为基本结构有利于降低调度复杂度和用户间干扰抑制。基于该码本, 本文同时给出了一种基于有限反馈信息的快速匹配多用户机会调度算法。仿真结果显示, 在稀疏网络中, 本文方法可以在不明显增加反馈量

的情况下获得比 IEEE 802.20 SDMA 更高的系统吞吐量。

参考文献:

- [1] COSTA M. Writing on dirty paper[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1983, 29(3):439-441.
- [2] SPENCER Q H, SWINDLEHURST A L, HAARDT M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2004, 52(2): 461-471.
- [3] SERBETLI S, YENER A. Transceiver optimization for multiuser MIMO systems[J]. IEEE Trans Sig Processing, 2004, 52(2): 214-226.
- [4] TARIGHAT A, SADEK M, SAYED A H. A multiuser beamforming scheme for downlink MIMO channels based on maximizing signal-to-leakage ratios[A]. Proc Int Conf Acoust, Speech, Signal Processing[C]. USA, 2005. 1129-1132.
- [5] SCHUBERT M, BOCHE H. Solution of the multiuser downlink beamforming problem with individual SINR constraints[J]. IEEE Trans Veh Tech, 2004, 53(1):18-28.
- [6] JINDAL N. MIMO broadcast channels with finite-rate feedback[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2006, 52(9):5045-5060.
- [7] DING P, LOVE D J, ZOLTOWSKI M D. Multiple antenna broadcast channels with limited feedback[A]. Proc Int Conf Acoust, Speech, Signal Processing[C]. France, 2006.45-48.
- [8] HUANG K, ANDREWS J G, HEATH JR R W. Orthogonal beamforming for SDMA with limited feedback[A]. Proc Int Conf Acoust, Speech, Signal Processing[C]. USA, 2007.97-100.
- [9] IEEE 802.20 C802.20-06-04. Part 12: Precoding and SDMA Codebooks[S]. 2006.
- [10] ZHOU S, LI B. BER criterion and codebook construction for finite-rate precoded spatial multiplexing[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2006, 54(5):1653-1665.
- [11] LOVE D J, HEATHJR R W. Limited feedback unitary precoding for spatial multiplexing systems[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2005, 51(2): 2967-2976.
- [12] MUN C, HAN J, KIM D. Quantized principal component selection precoding for limited feedback spatial multiplexing[A]. Proc IEEE Int Conf Commun[C]. Japan, 2006. 4149-4154.
- [13] SHARIF M, HASSIBI B. On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2005, 51(2):506-522.
- [14] HUANG Y, XU D, YANG L, *et al.* A Limited feedback precoding system with hierarchical codebook and linear receiver[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2008, 7(4):4843-4848.

作者简介:



余辉(1987-), 男, 安徽六安人, 东南大学硕士生, 主要研究方向为多用户 MIMO 通信信号处理。



黄永明(1977-), 男, 江苏吴江人, 博士, 东南大学副教授, 主要研究方向为 MIMO 通信信号处理、多用户通信信号处理和协作通信。



杨绿溪(1964-), 男, 安徽桐城人, 东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动通信空时信号处理、协作通信和网络编码。