

下行多用户 MIMO-OFDMA/SDMA 系统动态资源分配

仲崇显 杨绿溪

(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

摘要: 该文对下行多用户 MIMO-OFDMA/SDMA 系统动态资源分配算法进行了研究, 在满足各种约束条件的前提下, 以最大化系统吞吐量为目标建立了相应的优化模型。由于最优解难以获得, 将整个优化过程分两步完成, 第 1 步定义了一个用于度量配置多根天线的用户空间兼容性的指标, 并根据该指标提出了相应的调度算法; 第 2 步提出了两种次优的资源分配算法。仿真结果表明, 所提算法优于传统的随机调度算法, 与“功率复用”策略结合时, 所提算法的性能接近于基于用户选择的最优分配算法的性能。

关键词: 多输入多输出; 正交频分多址; 空分多址; 动态资源分配; 下行多用户系统

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)12-2972-04

Dynamic Resource Allocation for Downlink Multiuser MIMO-OFDMA/SDMA Systems

Zhong Chong-xian Yang Lu-xi

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Dynamic resource allocation algorithms are investigated for downlink multiuser Multiple Input Multiple Output Orthogonal Frequency Division Multiple Access and Space Division Multiple Access (MIMO-OFDMA/SDMA) systems. Firstly, a mathematical formulation is provided with the goal of maximizing throughput under various constraints. Secondly, since the optimal solution is difficult to obtain, the optimization procedure is divided into two steps. In the first step, a metric is derived to measure the spatial compatibility of users with multiple antennas, and then a scheduling algorithm is developed based on the proposed metric. In the second step, two suboptimal algorithms are developed to assign resources for the scheduled users. Simulation results demonstrate that proposed algorithms outperform random scheduling scheme. When combined with power reuse strategy, proposed algorithms obtain performances close to the optimal scheme based on user selection.

Key words: MIMO; OFDMA; SDMA; Dynamic Resource Allocation (DRA); Downlink multiuser system

1 引言

OFDMA 技术通过充分利用频率分集和多用户分集, 可以获得较高频谱效率^[1]。SDMA 技术通过在相同的频率和时隙内复用多个空间可分离的用户, 可以获得更好的容量性能^[2]。DRA 技术根据用户的信道和干扰状态优化分配各种资源, 不仅可以获得更高的频谱利用率, 而且能够更好地满足用户的 QoS 要求^[3]。当采用 SDMA 策略时, OFDMA 系统的 DRA 问题便成为 NP-complete 问题^[4]。

Koutsopoulos 等人对 OFDM/SDMA 系统中的 DRA 问题进行了研究^[5,6], 根据不同的约束条件提出了几种启发式的次优算法, 其中文献[5]只研究了单速率传输的情况, 文献[6]没有考虑功率分配问题。文献[4-6]提出的算法都是基于用户端配置单根天线这一假设的, 当用户端配置多根天线时各用户的信号空间是多维的, 问题变得更加复杂。文献[7]采用迫

零 SDMA 策略研究了多用户 MIMO-OFDMA 系统的 DRA 问题, 由于全局最优解难以获得, 仅从最大化系统容量的角度对基于用户选择和基于天线选择两种特殊情况进行了研究, 并未考虑 QoS 要求和可用调制阶数等约束条件的限制。

针对上述问题, 本文对多用户 MIMO-OFDMA/SDMA 系统中的 DRA 问题进行了研究, 给出了相应的优化模型, 并将整个优化过程分成子载波-用户调度和资源分配两步来完成。

2 系统模型与问题描述

考虑单小区下行多用户 MIMO-OFDMA/SDMA 系统, 基站端发射天线数为 N_T , 用户数为 U , 第 u 个用户接收天线数为 N_{R_u} , 系统框图如图 1 所示。假设用户端能够获得全部的信道信息, 并可以将该信息准确无误地反馈给基站。

设子载波数为 N , 用户 u 在子载波 n 上的信道用矩阵 $\mathbf{H}_{u,n}$ 表示, 子载波 n 上的信道矩阵和预编码矩阵为 $\mathbf{H}_n = [\mathbf{H}_{1,n}^T \mathbf{H}_{2,n}^T \cdots \mathbf{H}_{K,n}^T]^T$ 和 $\mathbf{M}_n = [\mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \cdots \mathbf{M}_K]$, 其中 $(\cdot)^T$ 表示矩阵转置, K 表示子载波 n 上调度到的用户

2007-11-29 收到, 2008-04-22 改回

国家 973 计划项目(2007CB310603), 国家自然科学基金(60672093, 60496310)和国家 863 计划项目(2007AA01Z262)资助课题

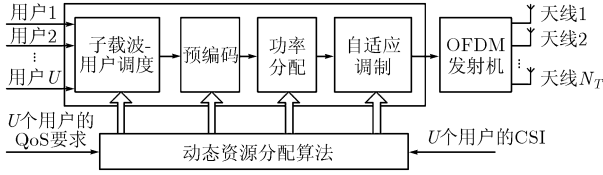


图1 下行多用户 MIMO-OFDMA/SDMA 系统框图

数。子载波 n 上的接收信号可以表示为

$$\mathbf{X}_n = \mathbf{H}_n \mathbf{M}_n \mathbf{d}_n + \mathbf{W}_n \quad (1)$$

其中 $\mathbf{d}_n$ 和 $\mathbf{W}_n$ 分别表示子载波 n 上的发射信号和高斯白噪声，则子载波 n 上调度到的用户 k 的接收信号为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k,n} &= \mathbf{H}_{k,n} \sum_{l=1}^K \mathbf{M}_{l,n} \mathbf{d}_{l,n} + \mathbf{W}_{k,n} \\ &= \mathbf{H}_{k,n} \mathbf{M}_{k,n} \mathbf{d}_{k,n} + \mathbf{H}_{k,n} \tilde{\mathbf{M}}_{k,n} \tilde{\mathbf{d}}_{k,n} + \mathbf{W}_{k,n} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{M}_{k,n}$, $\mathbf{d}_{k,n}$, $\mathbf{W}_{k,n}$ 分别表示用户 k 在子载波 n 上的预编码矩阵、发射信号和高斯白噪声， $\tilde{\mathbf{M}}_{k,n}$ 和 $\tilde{\mathbf{d}}_{k,n}$ 分别为 $\tilde{\mathbf{M}}_{k,n} = [\mathbf{M}_{1,n}, \dots, \mathbf{M}_{k-1,n}, \mathbf{M}_{k+1,n}, \dots, \mathbf{M}_{K,n}]$ 和 $\tilde{\mathbf{d}}_{k,n} = [\mathbf{d}_{1,n}^T, \dots, \mathbf{d}_{k-1,n}^T, \mathbf{d}_{k+1,n}^T, \dots, \mathbf{d}_{K,n}^T]^T$ 。

为了消除用户间干扰，迫零预编码方法要求对任意 $k \neq l$ 满足 $\mathbf{H}_{k,n} \mathbf{M}_{l,n} = 0$ ，即 $\mathbf{M}_{l,n}$ 落在 $\tilde{\mathbf{H}}_{k,n}$ 的零空间内，其中 $\tilde{\mathbf{H}}_{k,n} = [\mathbf{H}_{1,n}^T, \dots, \mathbf{H}_{k-1,n}^T, \mathbf{H}_{k+1,n}^T, \dots, \mathbf{H}_{K,n}^T]^T$ ，对 $\tilde{\mathbf{H}}_{k,n}$ 进行 SVD 可得

$$\tilde{\mathbf{H}}_{k,n} = \tilde{\mathbf{U}}_{k,n} \tilde{\Sigma}_{k,n} [\tilde{\mathbf{V}}_{k,n}^{(1)} \quad \tilde{\mathbf{V}}_{k,n}^{(0)}]^H \quad (3)$$

其中 $(\cdot)^H$ 表示矩阵的共轭转置， $\tilde{\mathbf{V}}_{k,n}^{(1)}$ 和 $\tilde{\mathbf{V}}_{k,n}^{(0)}$ 分别为前 $\tilde{L}_{k,n}$ ($\tilde{L}_{k,n} = \text{rank}(\tilde{\mathbf{H}}_{k,n})$) 个和后 $N_T - \tilde{L}_{k,n}$ 个右奇异向量组成的矩阵。 $\tilde{\mathbf{V}}_{k,n}^{(0)}$ 形成 $\tilde{\mathbf{H}}_{k,n}$ 零空间的一个标准正交基，可以作为用户 k 在子载波 n 上的预编码矩阵，即令 $\mathbf{M}_{k,n} = \tilde{\mathbf{V}}_{k,n}^{(0)}$ 。

通过上述处理，下行多用户系统就简化为 K 个并行无干扰的单用户 MIMO 信道，其中用户 k 在子载波 n 上的等效信道为 $\mathbf{H}'_{k,n} = \mathbf{H}_{k,n} \tilde{\mathbf{V}}_{k,n}^{(0)}$ ，相应地，子载波 n 上的信道为

$$\mathbf{H}'_n = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{1,n} \tilde{\mathbf{V}}_{1,n}^{(0)} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \mathbf{H}_{K,n} \tilde{\mathbf{V}}_{K,n}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对 $\mathbf{H}'_{k,n}$ 进行 SVD 有 $\mathbf{H}'_{k,n} = \mathbf{U}'_{k,n} \Sigma'_{k,n} \mathbf{V}_{k,n}^H$ 。令 $\gamma_{k,n,l}$ 表示子载波 n 上的用户 k 的第 l 个子信道的信噪比(SNR)，即

$$\gamma_{k,n,l} = p_{k,n,l} \Sigma_{k,n,l}'^2 / \sigma_{k,n,l}^2 \quad (5)$$

其中 $p_{k,n,l}$ 为第 l 个空间子信道上分配的功率。考虑到实际系统中 QoS 要求和可用调制阶数的限制，本文将 QoS 定义为限定误码率(BER)，并采用 QPSK、16QAM、64QAM、256QAM 等 4 种调制方式，则下述关系式近似成立：

$$b_{k,n,l} = \log_2 \left[1 - \frac{1.5 \gamma_{k,n,l}}{\ln(5 \text{BER}_k)} \right] \quad (6)$$

其中 BER_k 为用户 k 的 BER， $b_{k,n,l}$ 为子载波 n 上用户 k 的第 l 个子信道的比特数。由于调制阶数的限制， $b_{k,n,l}$ 应截断为 $\bar{b}_{k,n,l} = \text{trunc}(b_{k,n,l}) \in \{0, 2, 4, 6, 8\}$ 。

基于上述分析，下行多用户 MIMO-OFDMA/SDMA 系统的 DRA 问题可以描述为如下约束优化问题：

$$\begin{aligned} R = \max & \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_{k,n}} \bar{b}_{k,n,l} \\ \text{s.t.} & \left\{ \begin{aligned} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_{k,n}} p_{k,n,l} &\leq P_{\text{Total}} \\ \text{BER}_k &\leq \overline{\text{BER}}_k \\ \bar{b}_{k,n,l} &\in \{0, 2, 4, 6, 8\} \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\overline{\text{BER}}_k$ 表示用户 k 的限定 BER。

3 下行多用户 MIMO-OFDMA/SDMA 系统动态资源分配

3.1 基于子空间距离的“最佳用户优先”子载波-用户调度 (BUF-SUS)

设计有效的 SDMA 算法，需要选定一种复杂度较低的子载波分配或用户调度策略，以确定每个子载波上的最佳调度用户集合。一个好的调度方案应使被调度用户信道矩阵的行空间与已调度用户信道矩阵的零空间尽可能接近。鉴于此，本文定义一个基于子空间距离的指标，用以度量配置多根接收天线的用户之间的空间兼容性 (spatial compatibility)。采用 SVD 可以将 $\mathbf{H}_{k,n}$ 表示为 $\mathbf{H}_{k,n} = \mathbf{U}_{k,n} \Sigma_{k,n} [\mathbf{V}_{k,n}^{(1)} \quad \mathbf{V}_{k,n}^{(0)}]^H$ ，其中 $\mathbf{V}_{k,n}^{(1)}$ 和 $\mathbf{V}_{k,n}^{(0)}$ 分别为前 $L_{k,n}$ ($L_{k,n} = \text{rank}(\mathbf{H}_{k,n})$) 个和后 $N_T - L_{k,n}$ 个右奇异向量组成的矩阵，同样 $\tilde{\mathbf{H}}_{k,n}$ 可以分解为式(3)的形式。令 $\text{row}(\mathbf{H}_{k,n})$ 和 $\text{null}(\tilde{\mathbf{H}}_{k,n})$ 分别表示 $\mathbf{H}_{k,n}$ 的行空间和 $\tilde{\mathbf{H}}_{k,n}$ 的零空间，则 $\mathbf{V}_{k,n}^{(1)}$ 和 $\tilde{\mathbf{V}}_{k,n}^{(0)}$ 分别形成 $\text{row}(\mathbf{H}_{k,n})$ 和 $\text{null}(\tilde{\mathbf{H}}_{k,n})$ 的一个标准正交基。根据矩阵理论，两个子空间之间的距离可以用它们的正交投影来度量，而 $\mathbf{V}_{k,n}^{(1)} \mathbf{V}_{k,n}^{(1)H}$ 和 $\tilde{\mathbf{V}}_{k,n}^{(0)} \tilde{\mathbf{V}}_{k,n}^{(0)H}$ 分别是 $\text{row}(\mathbf{H}_{k,n})$ 和 $\text{null}(\tilde{\mathbf{H}}_{k,n})$ 上的正交投影。因此，将 $\text{row}(\mathbf{H}_{k,n})$ 和 $\text{null}(\tilde{\mathbf{H}}_{k,n})$ 之间的距离定义为

$$D(\text{row}(\mathbf{H}_{k,n}), \text{null}(\tilde{\mathbf{H}}_{k,n})) = \left\| (\mathbf{V}_{k,n}^{(1)})_L (\mathbf{V}_{k,n}^{(1)})_L^H - (\tilde{\mathbf{V}}_{k,n}^{(0)})_L (\tilde{\mathbf{V}}_{k,n}^{(0)})_L^H \right\|_F \quad (8)$$

其中 $\|\cdot\|_F$ 表示 Frobenius 范数， $L = \min(L_{k,n}, \tilde{L}_{k,n})$ ， $(\mathbf{V}_{k,n}^{(1)})_L$ 和 $(\tilde{\mathbf{V}}_{k,n}^{(0)})_L$ 分别为 $\mathbf{V}_{k,n}^{(1)}$ 和 $\tilde{\mathbf{V}}_{k,n}^{(0)}$ 的前 L 列组成的矩阵。显然，当 $L_{k,n} = \tilde{L}_{k,n}$ 时，式(8)定义的距离是准确的；而当 $L_{k,n} \neq \tilde{L}_{k,n}$ 时，子空间的截断必将导致部分有用信息丢失。但是，由于选取的是 $\mathbf{V}_{k,n}^{(1)}$ 和 $\tilde{\mathbf{V}}_{k,n}^{(0)}$ 中 L 个最大奇异值对应的右奇异向量，因此信号子空间的主要信息得以保留。可见，式(8)中定义的子空间距离 D 可以有效地度量配置多根接收天线的用户之间的空间兼容性。

下面采用上述指标设计一种新的调度方案，由于该指标不依赖于预编码矩阵的信息，因而比联合最优调度的复杂度更低。考虑到传统的基于系统吞吐量最大化准则的方案都倾向于调度各子载波上信道条件最好的用户(称为最佳用户)，在初始分配时首先为每个子载波调度最佳用户，然后将满足

$k^* = \arg \min_k D(\text{row}(\mathbf{H}_{k,n}), \text{null}(\widetilde{\mathbf{H}}_{k,n}))$ 的用户 k^* 依次调度到子载波 n , 直到满足 $\sum_{k=1}^K L_{k,n} \geq N_T$ 或 $D > \varepsilon$, ε 是一个预先确定的阈值, 第 1 个不等式意味着子载波 n 上的 N_T 个空间子信道已全部被占用, 第 2 个不等式意味着所有等待被子载波 n 调度的用户与该子载波上已调度到的用户之间都是空间不兼容的。

3.2 基于 BUF-SUS 的动态资源分配

即便是在用户确定的情况下, 通过对所有子载波进行联合预编码、功率分配和自适应调制来获取式(7)所述优化问题的最优解仍具有极高的复杂度。本文提出两种次优的 DRA 算法, 以获得近似最优的次优解。

算法 1 (BUF-SUS DRA) 将总发射功率平均分配给所有子载波然后对每个子载波上的吞吐量独立进行优化。对于子载波 n , 问题可以描述为

$$\begin{aligned} R_n = \max & \sum_{k \in S_n} \sum_{l=1}^{L_{k,n}} \bar{b}_{k,n,l} \\ \text{s.t.} & \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k \in S_n} \sum_{l=1}^{L_{k,n}} p_{k,n,l} \leq P_n \\ \text{BER}_k \leq \overline{\text{BER}}_k \\ \bar{b}_{k,n,l} \in \mathfrak{M} \end{array} \right. \end{aligned} \quad (9)$$

其中 R_n 为子载波 n 的吞吐量, S_n 为子载波 n 上调度到的用户的集合, $P_n = P_{\text{Total}}/N$ 为分配给子载波 n 的发射功率。上述问题可采用第 2 节中的迫零预编码方案结合功率分配和自适应调制来解决。

算法 2 (BUF-SUS DRA with PR) 的基本思想与算法 1 相同, 但借鉴了文献[4]中功率复用的思想, 将截断 $b_{k,n,l}$ 所造成的功率损失累积起来分配给其他等待优化的子载波使用。由式(5)和式(6)可知, 对于子载波 n 上的用户 k 的第 l 个子信道, 传输 $\bar{b}_{k,n,l}$ 比特的信息所需的发射功率为 $\bar{p}_{k,n,l} = (1 - 2^{-\bar{b}_{k,n,l}}) \sigma_{k,n,l}^2 \ln(5\text{BER}_k) / 1.5 \Sigma_{k,n,l}'^2$, 截断 $b_{k,n,l}$ 所引起的功率损失为 $\Delta p_{k,n,l} = p_{k,n,l} - \bar{p}_{k,n,l}$ 。对于子载波 n , 问题可以描述为

$$\begin{aligned} R_n = \max & \sum_{k \in S_n} \sum_{l=1}^{L_{k,n}} \bar{b}_{k,n,l} \\ \text{s.t.} & \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k \in S_n} \sum_{l=1}^{L_{k,n}} \bar{p}_{k,n,l} \leq P_n + P_a \\ \text{BER}_k \leq \overline{\text{BER}}_k \\ \bar{b}_{k,n,l} \in \mathfrak{M} \end{array} \right. \end{aligned} \quad (10)$$

其中, 变量 P_a 用于将先于子载波 n 分配的所有子载波上未被充分利用的功率累积起来。通过上述功率复用, 可以以较低的复杂度进一步提升系统的吞吐量性能。

4 仿真结果与分析

为简单起见, 假设所有用户具有相同的接收天线数 N_R 和限定误码率 $\overline{\text{BER}} = 10^{-3}$, 且假设 N_R 是 N_T 的整数因子, 每个子载波上调度到的最大用户数为 $K = N_T/N_R$ 。设子载波数为 64, 多径信道的径数为 7, 每径的功率服从指数衰落

分布, 抽样频率为 20MHz, 均方根时延扩展为 50ns。仿真中将本文所提算法与基于随机调度的 DRA 方法(Random DRA, RDRA)和基于用户选择的容量最大化方法^[7](CM-US DRA)进行了比较。

图 2 给出了每个子载波调度两个用户时阈值 ε 对吞吐量性能的影响。当 ε 较小时, 平均吞吐量随 ε 的增大而增大, 但是当 ε 达到一定数值时增加便不再明显。这是因为 ε 是用户空间兼容性的度量指标, 当 ε 很小时, 系统对用户空间兼容性要求较高, 绝大多数用户无法同时被同一个子载波调度, 致使数据流数较小, 从而使吞吐量大大降低; 当 ε 很大时, 高度相关的用户可能同时被调度到, 由于同信道干扰的影响, 吞吐量不再增加。考虑到系统性能和算法复杂度的折衷, 结合图 2 得到的结果, 在后面的仿真中选取阈值 $\varepsilon = 0.5$ 。

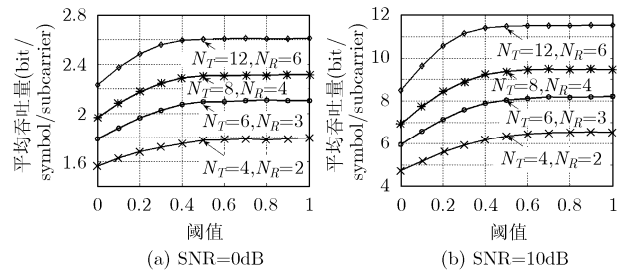


图 2 每个子载波调度两个用户时阈值 ε 对系统平均吞吐量性能的影响

图 3 给出了 $N_R = 2, U = 20$, 不同 N_T 时各算法的吞吐量性能与 SNR 的关系。首先, CM-US DRA 算法的吞吐量性能明显优于其他算法, 因为该算法是一种凸优化方法, 可以获得基于用户选择的 DRA 问题的最优解, 而且优化过程中没有考虑 QoS 要求和调制阶数的限制。其次, BUF-SUS DRA 算法在各种仿真条件下都优于 RDRA 算法, 因为前者充分利用了用户的信道子空间信息, 在调度过程中考虑了用户之间的空间兼容性, 降低了用户间的相互干扰; 而后者为各子载波从 U 个用户中随机选取 K 个进行数据传输, 调度

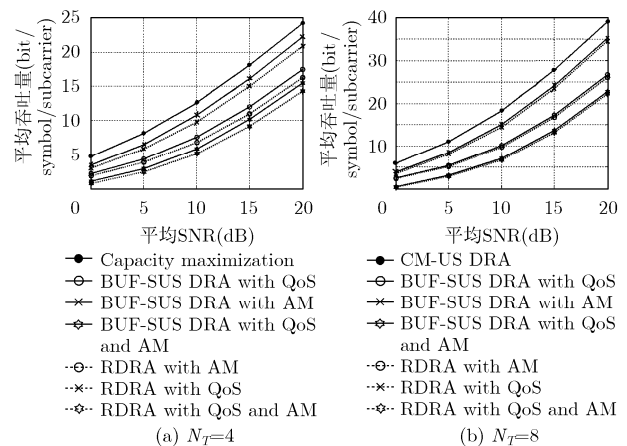


图 3 $N_R=2, U=20$, 不同发射天线数时系统平均吞吐量与 SNR 的关系

到的用户之间可能存在较强的干扰。另外,随着 N_T 的增加 BUF-SUS DRA 算法的性能增益变小,这是因为 N_T 越大 $L_{k,n}$ 和 $\tilde{L}_{k,n}$ 之间的差别就越大,式(8)对子空间截断所丢失的有用信息就越多,从而使得吞吐量性能下降。

图4给出了 $N_T = 6, N_R = 3$, 不同用户数时各算法的吞吐量性能与 SNR 的关系。从图中可以看出,随着用户数的增大, BUF-SUS DRA 算法的增益变大。这是因为该算法利用了系统固有的多用户分集特性,用户越多该特性就越突出。从图4还可以发现, BUF-SUS DRA 算法所体现出来的多用户分集特性并不是特别明显,这是因为该算法主要关注的是用户的空间兼容性,对多用户分集特性利用的不够充分,而且用户调度完毕后还对其进行了预编码和功率注水等优化设计,从而使得多用户分集特性体现得不十分明显。

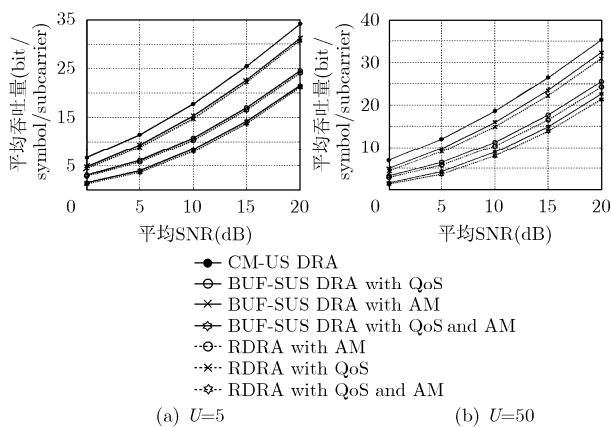


图4 $N_T=6, N_R=3$, 不同用户数时系统平均吞吐量与 SNR 的关系

图5给出了 $N_R = 2, U = 20$, 不同发射天线数时功率复用对吞吐量性能的影响。采用功率复用策略,系统吞吐量在各种仿真条件下都得到了提升,发射天线数 N_T 增大时更为明显。这是因为发射天线数越多所能提供的空间子信道就越多,每个子载波上累积下来分配给其他子载波使用的功率也就越多,从而可以更好地提高系统的吞吐量性能。

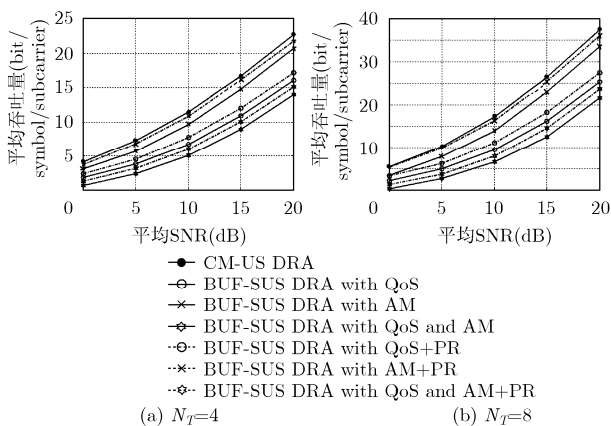


图5 功率复用对系统吞吐量性能的影响

5 结束语

本文对下行多用户MIMO-OFDMA/SDMA系统中的动态资源分配问题进行了研究,建立了相应的优化模型,考虑到问题的复杂性,将整个优化过程分成调度和分配两步来处理。仿真结果表明,本文提出的算法优于传统的随机调度算法,尤其是与“功率复用”策略的结合使得本文所提算法的性能进一步提高。需要指出的是,本文所提出的方案是建立在基站端完全已知信道信息的基础之上的,在实际应用中需要较大的反馈量。因而,如何在基站端已知部分信道信息的情况下设计出更具鲁棒性的资源分配方案便成为亟待解决的关键问题,在以后的工作中我们将对此进行深入研究。

参考文献

- [1] Wong C Y, Cheng R S, and Letaief K B, *et al.*. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation. *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [2] 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.
- [3] Letaief K B and Zhang Y J. Dynamic multiuser resource allocation and adaptation for wireless systems. *IEEE Wireless Communications*, 2006, 13(4): 38-47.
- [4] Bartolome D and Perez-Neira A I. Practical implementation of bit loading schemes for multiantenna multiuser wireless OFDM systems. *IEEE Trans. on Communications*, 2007, 55(8): 1577-1587.
- [5] Koutsopoulos I, Ren T, and Tassiulas L. The impact of space division multiplexing on resource allocation: A unified approach. *Proc. IEEE INFOCOM*, San Francisco, California, USA, 2003, 1: 533-543.
- [6] Koutsopoulos I and Tassiulas L. Adaptive channel assignment in SDMA-based wireless LANs with transceiver resource limitations. *EURASIP J. on Signal Processing*, 2006, 86(8): 1879-1895.
- [7] Chan P W C and Cheng R S. Capacity maximization for zero-forcing MIMO-OFDMA downlink systems with multiuser diversity. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2007, 6(5): 1880-1889.

仲崇显: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为MIMO通信、多用户通信和无线资源管理。

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。