

下行 SDM/OFDMA 系统中基于效用函数的多用户调度算法

许宁 周蓓 王莹 张平
(北京邮电大学无线新技术研究所 北京 100876)

摘要: 该文研究了空分复用/正交频分多址(SDM/OFDMA)无线通信系统中的多用户调度问题, 针对该系统的空时频三维调度特点, 提出一种基于效用函数的多用户调度算法。该算法利用空间多用户分集获得增益, 同时兼顾系统的整体效率和用户的个体效用。通过计算机仿真验证了算法具有和穷举搜索算法相近的性能, 但算法复杂度大大降低。

关键词: 无线通信系统; 调度算法; 空分复用; 正交频分多址接入; 效用函数

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)06-1428-04

A Utility Based Multiuser Scheduling Algorithm in Downlink SDM/OFDMA System

Xu Ning Zhou Bei Wang Ying Zhang Ping

(Wireless Technology Innovation Institute, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The multiuser scheduling issue in Spatial Division Multiplexing/Orthogonal Frequency Division Multiple Access (SDM/OFDMA) wireless communication system is studied. This issue is characterized as three dimensions of time, frequency, and space. A utility based multiuser scheduling algorithms is proposed to both improve the system resource utilization and maximize the user's utility. The computer simulation results show that the performance of the proposed algorithms is similar to the exhaustive searching algorithm while the complexity is highly reduced.

Key words: Wireless communication system; Scheduling algorithms; Spatial division multiplexing; Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA); Utility functions

1 引言

随着人们对移动通信需求的不断增长, 未来移动通信系统必须提供高速率的数据传输, 支持大量的数据用户, 并保证用户的服务质量(QoS)。多天线技术利用了电磁波信号的空间特征, 可以大大提高无线链路容量。如果使用信号的空间特征来区分用户, 即采用多用户空分复用(SDM)技术, 可以进一步提高系统容量。在基站对多个用户的下行传输中, 由于接收端之间进行协同的代价很高, 因此一般在发射端(即基站)采用发送波束赋型技术来达到多用户空分复用的目的^[1, 2]。该技术要求发射端的天线数目必须不少于所有接收端天线数目的总和, 因此空分复用可支持的用户数目非常有限。

除空分复用外, 正交频分多址接入(OFDMA)是倍受下一代移动通信系统设计者关注的多址技术。它具有正交频分复用(OFDM)的可以很好对抗符号间干扰(ISI)的特点, 特别适用于高速率宽带无线数据传输。如果将 SDM 和 OFDMA

结合, 可以使系统容量大大提高。在 SDM/OFDMA 系统中, 设计恰当的多用户调度算法, 可以利用空间多用户分集, 进一步提高系统性能^[3, 4]。除追求系统效率最大化的调度设计目标之外, 公平性同样是调度算法设计需要考虑的一个重要问题。借用经济学中的效用概念来衡量系统性能, 可以兼顾效率和公平。

本文研究下行 SDM-OFDMA 系统中的空时频三维调度问题, 在给出系统模型的基础上, 首先将该多用户调度问题建模为一个效用函数最大化问题。最优的调度算法复杂度很高, 本文提出一种次优调度算法, 在维持合理复杂度的基础上, 利用了时间、频率和空间上的多用户分集, 提高了系统性能。本文最后给出计算机仿真结果来验证结论。

2 下行多用户 SDM-OFDMA 系统模型

在本文的下行多用户 SDM/OFDMA 系统中, 发送端(基站)的基带处理单元主要由子载波分配和比特加载、发送波束赋型、以及快速傅里叶反变换(IFFT)3 个模块组成。接收端(移动台)的处理模块主要包括快速傅里叶变换(FFT)、接收端波束赋型和 MIMO 解码解调。

假设系统中共 K 个用户。发送端天线数为 N_t , 接收端 k 的天线数为 N_r^k 。在发送端, 首先对经过编码交织后的用户

2006-11-13 收到, 2007-09-10 改回

国家自然科学基金重大项目(60496312)和国家自然科学基金项目(60302024)资助课题

k 的数据流进行串并变换。设子载波分配和比特加载模块给用户 k 分配的子载波集合为 $\mathcal{I}_k \subseteq \{1, \dots, M\}$, M 为子载波总数。在子载波 $m \in \mathcal{I}_k$ 上加载的比特长度为 $L_{k,m}$ 的数据 $\mathbf{x}_{k,m}$ 。各个 $\mathbf{x}_{k,m}$ 经过发送波束赋型模块的波束赋型矩阵 $\mathbf{T}_{k,m}$ ($N_t \times L_{k,m}$ 维) 处理后, 将输出符号送入各个天线的 IFFT 模块, 添加循环前缀(CP)后, 送到射频天线发送。将占用子载波 m 的用户集合记为 \mathcal{K}_m , 集合中的用户数记为 L_m 。

由于 CP 的作用, 对于 OFDM 信号来说, 宽带频率选择性信道可以等效为一组并行的非频率选择性信道。在子载波 m 上, 等效的信道增益矩阵可以表示成一个 $N_r^k \times N_t$ 维的矩阵 $\mathbf{H}_{k,m}$ 。在接收端, 经过 FFT 模块后, 子载波 m 上的接收信号可以表示为

$$\mathbf{y}_{k,m} = \mathbf{H}_{k,m} \sum_j \mathbf{T}_{j,m} \mathbf{x}_{j,m} + \mathbf{n}_{k,m}, \quad j \in \mathcal{K}_m \quad (1)$$

令 $\mathbf{V}_{k,m}$ 表示子空间 $\bigcap_j \ker(\mathbf{H}_{j,m})$, $j \in \mathcal{K}_m, j \neq k$ 的标准

正交基^[2], 维度为 $d_{k,m}$, 则当 $\mathbf{T}_{k,m} = \mathbf{V}_{k,m} \mathbf{A}_{k,m}$ 时, 有 $\mathbf{H}_{k,m} \sum_j \mathbf{T}_{j,m} \mathbf{x}_{j,m} = 0$, $j \in \mathcal{K}_m, j \neq k$ 。这里的 $\mathbf{A}_{k,m}$ 为 $d_{k,m} \times L_{k,m}$ 维矩阵。要获取 $\mathbf{V}_{k,m}$ 需要对子空间 $\bigcap_j \ker(\mathbf{H}_{j,m})$ 对应的矩阵 $[\mathbf{H}_{1,m}^T, \dots, \mathbf{H}_{k-1,m}^T, \mathbf{H}_{k+1,m}^T, \dots, \mathbf{H}_{L_m,m}^T]^T$ 做奇异值分解(SVD)。按 $\mathbf{T}_{k,m} = \mathbf{V}_{k,m} \mathbf{A}_{k,m}$ 设计的发送波束赋型矩阵 $\mathbf{T}_{k,m}$ 可以消除子载波 m 上的同信道用户间干扰, 从而有

$$\mathbf{y}_{k,m} = \mathbf{H}_{k,m} \mathbf{T}_{k,m} \mathbf{x}_{k,m} + \mathbf{n}_{k,m} = \mathbf{H}_{k,m} \mathbf{V}_{k,m} \mathbf{A}_{k,m} \mathbf{x}_{k,m} + \mathbf{n}_{k,m} \quad (2)$$

由于子空间维数的限制, 复用同一子载波的用户其数目需要满足如下条件^[2]

$$N_t > \max \left\{ \sum_{j \in \mathcal{K}_m, j \neq k} N_r^j, k = 1, \dots, K \right\} \quad (3)$$

假设系统中移动台的接收天线数目都相同, 可以得到 $N_t > N_r(L_m - 1)$, 即

$$L_m = L = \lfloor N_t / N_r \rfloor, \quad m = 1, \dots, M \quad (4)$$

通过发送波束赋型, 同一子载波上的用户信号在空间上分隔开来, 并行传输。显然, 由于各个用户的信道衰落和空间特征不同, 用户间的空间干扰情况也不同。选择不同的用户分组共享频域子信道, 会得到不同的系统性能, 这就产生了多用户调度问题。

3 多用户调度算法

上述 SDM/OFDMA 系统中, 用户可以在包括时间、频率和空间 3 个维度上调度。对于以数据业务为主的无线通信系统来说, 用户最为关心的是平均传输速率。可以用平均速率的效用函数来衡量用户的满意程度。用户效用函数还可以是时延等其他服务质量标准的函数。本文的多用户调度目标是使系统中所有用户的效用最大, 即

$$\max \sum_{k=1}^K U_k(\bar{r}_k[t]) \quad (5)$$

式中用户的平均传输速率 $\bar{r}_k[t]$ 可写为

$$\begin{aligned} \bar{r}_k[t] &= \frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^t r_k[\tau] = \frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^{t-1} r_k[\tau] + \frac{1}{t} r_k[t] = \bar{r}_k[t-1] \\ &\quad + \frac{1}{t} (r_k[t] - \bar{r}_k[t-1]) \end{aligned} \quad (6)$$

其中用户 k 在子载波 m 上的瞬时速率

$$r_k[t] = \sum_{m=1}^M r_{k,m}[t] I_{k,m}[t] \quad (7)$$

若用户 k 在时隙 t 占用子载波 m 进行传输, 则指示变量 $I_{k,m}[t] = 1/L$, 反之 $I_{k,m}[t] = 0$ 。根据 OFDMA 的特性, 有 $\sum_{k=1}^K I_{k,m}[\tau] = 1, \forall m = 1, \dots, M$ 。

为简化问题, 对式(5)在 $\bar{r}_k[t-1]$ 点处使用一阶泰勒展开, 有

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K U_k(\bar{r}_k[t]) &= \sum_{k=1}^K U_k(\bar{r}_k[t-1]) \\ &\quad + \sum_{k=1}^K U'_k(\bar{r}_k[t-1]) (\bar{r}_k[t] - \bar{r}_k[t-1]) \\ &= \sum_{k=1}^K U_k(\bar{r}_k[t-1]) + \sum_{k=1}^K U'_k(\bar{r}_k[t-1]) \frac{1}{t} (r_k[t] - \bar{r}_k[t-1]) \end{aligned} \quad (8)$$

因为在 t 时刻, 和 $t-1$ 时刻相关的量都是已知量, 所以由式(8)可得

$$\begin{aligned} \max \sum_{k=1}^K U_k(\bar{r}_k[t]) &\Leftrightarrow \max \sum_{k=1}^K \frac{1}{t} U'_k(\bar{r}_k[t-1]) r_k[t] \\ &\Leftrightarrow \max \sum_{k=1}^K U'_k(\bar{r}_k[t-1]) r_k[t] \\ &= \max \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K (U'_k(\bar{r}_k[t-1]) r_{k,m}[t] I_{k,m}[t]) \end{aligned} \quad (9)$$

因此最优化问题式(5)等价于

$$\max \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K (U'_k(\bar{r}_k[t-1]) r_{k,m}[t] I_{k,m}[t]) \quad (10)$$

约束条件为

$$\sum_{k=1}^K I_{k,m}[\tau] = 1, \quad \forall m = 1, \dots, M \quad (11)$$

本文不考虑功率分配问题, 即假设功率分配是已知的。对于上节所述的 SDM-OFDMA 系统来说, 由于同信道干扰, 选择不同用户进行空分复用, 会得到不同的传输速率 $r_{k,m}[t]$ 。因此需要对所有可能的用户组合进行穷举搜索, 才能找出最优化问题式(10)的最优解。

穷举搜索调度算法步骤如下:

(1) 在调度时隙 t , 对于子载波 m , 从 K 个用户中选取 L 个用户, 共有 C_K^L 种组合方式。将这些不同组合构成的用户集合表示为 $\Omega_l, l = 1, \dots, C_K^L$;

(2) 对于用户集合 Ω_l , 根据式(1)计算 $r_{k,m}[t], k \in \Omega_l$;

(3) 对于所有组合, 选择值 $\sum_{k \in \Omega_l} U'_k(\bar{r}_k[t-1]) r_{k,m}[t], l = 1, \dots, C_K^L$ 最大的用户组合 Ω_l^* , 令 $I_{k,m}[t] = 1/L, k \in \Omega_l^*$ 。其余用户置 $I_{k,m}[t] = 0$;

(4) 对于所有子载波按步骤(1)到步骤(3)对 $I_{k,m}[t]$,

$k = 1, \dots, K$ 进行赋值。算法结束。

穷举搜索算法需要考察 C_K^L 个用户组合, 在每个组合中都需要进行 SVD 运算获得波束赋型矩阵 $\mathbf{T}_{k,m}$, 才能得到 $r_{k,m}[t]$ 。而 SVD 算法的复杂度是很高的。为降低算法复杂度, 本文提出一种改进的算法——选择搜索调度算法, 减少需要考察的用户组合数量, 同时保证较好的性能。

选择搜索调度算法步骤如下:

(1) 在调度时隙 t , 对于子载波 m , 根据用户和基站间的信道信息 $\mathbf{H}_{k,m}$, 计算单用户 MIMO 系统的信道容量, 记为 $u_{k,m}[t]$ 。按值 $U_k'(\bar{r}_k[t-1])u_{k,m}[t]$, 对 K 个用户进行降序排列。取出排序用户中的前 S ($L < S < K$) 个用户;

(2) 从选出的 S 个用户中取出 L 个用户, 共有 C_S^L 种选取方式。将这些不同组合构成的用户集合表示为 Ω_s , $s = 1, \dots, C_S^L$;

(3) 对于组合方式 Ω_s , 根据式(1)计算 $r_{k,m}[t]$, $k \in \Omega_s$;

(4) 对于所有组合, 选择 $\sum_{k \in \Omega_s} U_k'(\bar{r}_k[t-1])r_{k,m}[t]$, $s = 1, \dots, C_S^L$ 中值最大的用户组合 Ω_s^* , 令 $I_{k,m}[t] = 1/L$, $k \in \Omega_s^*$ 。其余用户 $I_{k,m}[t] = 0$;

(5) 对于所有子载波, 按步骤(1)到步骤(4)对 $I_{k,m}[t]$, $k = 1, \dots, K$ 进行赋值。算法结束。

在上述搜索算法中, SVD 分解运算在较小的用户范围内进行, 降低了复杂度。步骤(1)在选择用户时考虑了效用函数的影响, 步骤(4)选择用户组合时考虑了系统效率。如果将步骤(4)中的用户组合选择准则改为 $\sum_{k \in \Omega_s} r_{k,m}[t]$, 直观上系统效率会有所提高, 但事实并非如此。显然, 若取 $S=L$, 则取消了空间调度的可能, 只剩时域和频域调度; 若取 $S=K$, 则调度结果等价于穷举搜索调度算法。

由于 $S < K$, 选择搜索调度算法的复杂度要低于穷举搜索。随着用户数 K 的增多, 穷举搜索复杂度与 $K!$ 成比例增加, 而选择搜索只随 K 线性增加。

效用函数 U 可以根据不同的用户业务特征和设计目的选取各种形式, 使系统可以满足多种业务的需求。当效用函数 $U(r) = r$ 时, 调度算法单纯追求系统效率最大化。当 $U(r) = \log(r)$ 时, 则考虑了用户间的公平性。

4 仿真分析

本节给出仿真结果, 并分析算法复杂度。仿真系统的带宽为 10MHz, 子载波数 $M=32$ 。基站发射天线数 $N_t = 4$, 接收端天线数 $N_r = 2$ 。因此 $L=2$ 。仿真中用户数 K 取 4, 8, 16, 24, 32 和 40。为体现效用函数的影响, 将总用户分为远近不同的两组, 平均信噪比(SNR)分别为 16dB 和 6dB。基站和用户间的空间信道增益 $\mathbf{H}_{k,m}$ 矩阵由 3GPP 推荐的空间信道模型(SCM)^[5]产生。为了简化和公平比较, 本文采用容量公式

$$c_{k,m} = \log_2 \det \left| 1 + \frac{\mathbf{H}_{k,m} \mathbf{V}_{k,m} \mathbf{V}_{k,m}^* \mathbf{H}_{k,m}^*}{\sum_{j \in K_m, j \neq k} \|\mathbf{H}_{k,m} \mathbf{V}_{j,m}\|^2 + 1/A_{\text{SNR}}} \right| \quad (12)$$

计算用户的实际传输速率和吞吐量。式中 A_{SNR} 为用户的平均 SNR。

我们对下列几种调度算法进行了仿真和比较。

(1) 效用函数 $U(r) = r$, $S=4, 6$ (选择搜索调度)和 $S=K$ (穷举搜索调度)。

(2) 效用函数 $U(r) = \log(r)$, $S=4, 6$ (选择搜索调度)和 $S=K$ (穷举搜索调度)。

(3) 效用函数 $U(r) = \log(r)$, 用户组合选择准则为 $\sum_{k \in \Omega_s} r_{k,m}[t]$, $S=4, 6$ (选择搜索调度)。

(4) 效用函数 $U(r) = \log(r)$, 只有时域和频域调度, 没有空间调度, 即 $S=L=2$ 。

本文对表征系统资源使用效率的系统吞吐量和表征用户效用的公平性因子进行了统计和比较。图 1 出了系统吞吐量的比较结果。可以看到当效用函数 $U(r) = \log(r)$ 时, 利用空间多用户分集调度的性能和没有空间调度相比, 系统吞吐量提高 10%。当 $S/K=4/8=50\%$ 时, 选择搜索调度的性能比穷举搜索调度差 4%。当 $S/K=6/16=37.5\%$ 时, 比穷举搜索性能差 3%, 但搜索复杂度则从穷举搜索的 $O(7680)$ 降低到选择搜索的 $O(3552)$, SVD 运算次数从 7680 次降低到 960 次。调度算法 C 的性能比 B 差, 这是由于选择搜索的步骤(1)的用户排序时采用考虑公平性的效用函数, 而用户组合选择时仅考虑系统容量最大化, 此时信道状况比较差的用户可能在用户排序时受效用函数影响被选择, 在用户组合时又由于信道状况差被抛弃, 未达算法兼顾公平性和效率的初衷, 反而降低了系统的效率。

图 2 给出各个算法公平性因子的比较。公平性因子可以衡量调度算法是否给用户提供了公平的效用, 公平性因子接近 1, 表明算法可以提供公平性保障。本文的公平性因子为

$$I = \left| \frac{\sum_{k=1}^K \bar{r}_k[t]}{K} \right|^2 / \sum_{k=1}^K (\bar{r}_k[t])^2 \quad (13)$$

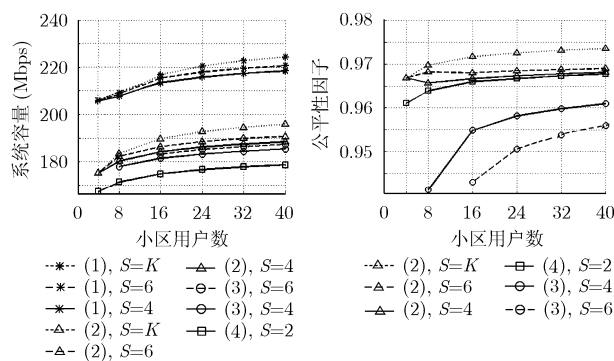


图1 系统吞吐量

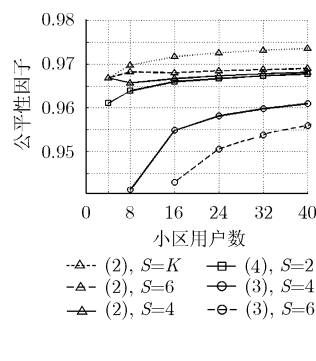


图2 公平性因子

当效用函数 $U(r) = r$ 时, 调度算法的公平性因子为 0.5 左右(没有在图中画出), 也就是说距离基站较远的用户总是得不到服务。当效用函数 $U(r) = \log(r)$ 时, 各算法的公平性因子都在 0.9 以上, 而本文提出的搜索选择调度算法, 其公平性因子高于 0.96, 因此可以很好得保证用户公平性。

5 结束语

本文针对空分复用/正交频分多址(SDM/OFDMA)无线通信系统的下行调度问题, 提出一种基于效用函数的多用户调度算法。该算法的特点是对空分复用的用户分组进行选择搜索。一方面利用了空间多用户分集增益, 提高了系统资源的利用率, 即系统的效率; 另一方面通过用户效用函数的作用, 兼顾了用户个体间的公平。通过调整算法中的 S 值, 可以维持较为合理的复杂度。调度算法中的效用函数也可以换成和数据包时延相关的效用函数, 来满足业务的时延要求。这些将在今后进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 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.
 - [2] Choi L U and Murch R D. A transmit preprocessing technique for multiuser MIMO systems using a decomposition approach. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(1): 20-24.
 - [3] Anton-Haro C, Svedman P, Bengtsson M, Alexiou A, and Gameiro A. Cross-layer scheduling for multi-user MIMO systems. *IEEE Communications Magazine*, 2006, 44(9): 39-45.
 - [4] Xu Ning, Wang Ying, and Zhang Ping. Multiuser scheduling in downlink MIMO/OFDMA system with transmit preprocessing, APCC 2006, Busan, Korea. 2006: 1-5.
 - [5] 3GPP, Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations. TR 25.996, V 6.1.0, 2003.
- 许 宁: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为无线网络中的服务质量和资源管理。
- 周 蓓: 女, 1983 年生, 硕士生, 研究方向为无线资源管理。
- 王 莹: 女, 1976 年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为未来移动通信中的关键技术。
- 张 平: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为未来无线通信系统。