

基于应用时间窗多用户 MIMO-OFDM 系统中的比例公平算法

徐 雷 徐大专 张小飞

(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

摘 要: 该文针对基于延时信道状态信息的多用户 MIMO-OFDM 系统, 在用户比例速率要求和功率限制的情况下, 以最大化时间窗 W 内系统吞吐量为目标, 提出了一种基于应用时间窗比例公平算法。该算法首先设计各子载波上满足用户误比特率要求的星座距离, 然后把系统中每个用户按照其比例映射为相应数目的虚拟用户, 最后根据影子价格把子载波最优地分配给虚拟用户。仿真结果表明, 该算法在保证用户公平性的基础上, 有效地提高了系统吞吐量。

关键词: MIMO-OFDM; 应用时间窗; 延时信道状态信息; 影子价格; 比例公平

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)10-2359-05

Proportional Fairness Algorithm for Multiuser MIMO-OFDM Systems Based on the Application Time Window

Xu Lei Xu Da-zhuan Zhang Xiao-fei

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A novel proportional fairness algorithm based on the application time window for multiuser MIMO-OFDM systems with delay channel state information is presented in this paper. With the goal of maximizing overall data throughput in a finite time window W subject to user proportional rate constraints and user power constraints the algorithm of resource allocation is proposed. This algorithm firstly designs constellation distance which meets user's bit error rate. Then it maps every user into the corresponding virtual users according to the proportion. Finally in accordance with the shadow price of optimization theory it optimally allocates subcarrier to virtual users. The simulation results show the algorithm can improve total throughput efficiently under the condition of guaranteeing the proportional fairness of users.

Key words: MIMO-OFDM; Application time window; Delay channel state information; Shadow price; Proportional fairness

1 引言

MIMO 技术通过在具有丰富多径的环境中利用彼此间分开一定距离的多天线来获得空域分集增益, 从而增大了系统容量; 另一方面, OFDM 作为一种能够有效对抗频率选择性衰落的技术, 得到了广泛的应用。MIMO 与 OFDM 技术的结合可以提供更高的传输速率, 更加满足未来多媒体业务的要求^[1]。

目前, 已经有很多文献研究了比例公平资源分配算法。文献[2]针对基于 IEEE802.11b 标准的多速率无线局域网系统, 提出了两种近似的比例公平算法, 这两种算法都是通过智能分配用户给接入点的方法来实现最优的比例公平资源分配。文献[3]根据 IEEE802.16 网络中异构用户具有不同负载的特点,

为尽力而为业务提出了加权比例公平调度方案和分析方案性能的解析模型。文献[4]针对 OFDMA 下行链路系统提出了一种对物理层和 MAC 层联合优化的跨层自适应比例公平资源分配方案。文献[5]针对 SISO-OFDMA 系统, 提出了一种次优的比例公平子载波、功率和比特分配算法。文献[6]提出了最大最小化问题, 通过最大化信道条件最差的用户容量来确保所有用户都获得一个近似相等的速率, 但是最大最小化问题只能实现用户之间的最大公平性。

目前存在的很多算法都是考虑某一时刻用户的公平性, 然而很多服务能够容忍高的时延, 例如几毫秒、几秒甚至几分钟。基于这个特点, 我们定义应用时间窗 W , 应用时间窗 W 小于用户服务允许的最大时延, 因此比例公平资源分配算法设计目标是保证用户在有限长应用时间窗 W 内公平地分享服务, 并且最大化系统吞吐量。

文献[7]针对多信道多速率无线局域网的资源分

2008-10-06 收到, 2009-07-02 改回

江苏省自然科学基金(BK2007192)和国家自然科学基金(60801052)资助课题

配和调度问题研究了比例公平效用函数的使用,并且提出了一种基于应用时间窗比例公平算法。文献[8]把文献[7]的结果扩展到 SISO-OFDMA 情况,但是文献[7,8]提出的比例公平算法是针对各个用户获得近似相等数据速率的特殊情况设计的。本文针对多用户 MIMO-OFDM 系统,在文献[7,8]的基础上,提出了满足各用户比例速率权重不同情况下的基于应用时间窗比例公平算法。该算法在用户比例速率要求和功率限制的情况下,最大化应用时间窗 W 内系统的吞吐量。

2 系统模型和问题描述

2.1 系统模型

系统有 M 个用户,基站有 N_t 根发射天线,移动台有 N_r 根接收天线,子载波数为 K 。在每个子载波上,采用 Alamouti 空时编码级联波束形成的传输方案^[9]。用户 m 在子载波 k 上 MIMO 信道矩阵为 $\mathbf{H}[m, k] = \{\mathbf{H}_{u,v}[m, k]\}$, $1 \leq u \leq N_t$, $1 \leq v \leq N_r$, 假设天线间距足够远,则 $\mathbf{H}_{u,v}[m, k]$ 之间互不相关。基站得到用户 m 在子载波 k 上的反馈信道状态信息 $\mathbf{H}^f[m, k]$, $\mathbf{H}^f[m, k]$ 与当前信道状态信息服从同一复高斯分布,它们之间的相关系数 $\rho = J_0(2\pi f_d \Delta\tau)$, 其中 $\Delta\tau$ 是反馈时延, f_d 是多普勒频移, $J_0(\bullet)$ 是第 1 类零阶贝塞尔函数。基站估计当前信道矩阵 $\mathbf{H}[\hat{m}, k]$ 为

$$\mathbf{H}[\hat{m}, k] = \bar{\mathbf{H}}[m, k] + \boldsymbol{\Xi}[m, k] \quad (1)$$

$$\bar{\mathbf{H}}[m, k] = E\{\mathbf{H}[\hat{m}, k] | \mathbf{H}^f[m, k]\} = \rho \mathbf{H}^f[m, k] \quad (2)$$

式(1)中 $\bar{\mathbf{H}}[m, k]$ 是用户 m 在子载波 k 上的统计信道状态信息, $\boldsymbol{\Xi}[m, k]$ 是复高斯分布矩阵,服从 $\text{CN}\{\mathbf{0}_{N_t \times N_r}, N_r \sigma_\epsilon^2 [m, k] \mathbf{I}_{N_t}\}$, $\sigma_\epsilon^2 [m, k] = (1 - \rho^2) \sigma_h^2$, 其中 $\text{CN}(u, \boldsymbol{\Sigma})$ 表示均值为 u , 协方差矩阵为 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的复高斯分布, σ_h^2 是无线链路的平均功率。

2.2 基于应用时间窗比例公平优化问题描述

定义 1 时刻 n 用户 m 在应用时间窗 W ($1 < W < +\infty$) 内的平均吞吐量为 $T_m^{(W)}[n]$

$$T_m^{(W)}[n] = a_m[n-1] + \frac{1}{\min(n, W)} \sum_{k=1}^K C_{m,k}[n] b_{m,k}[n] \quad (3)$$

式(3)中 $C_{m,k}[n]$ 表示时刻 n 用户 m 在子载波 k 上的分配指示变量, $b_{m,k}[n]$ 表示时刻 n 用户 m 在子载波 k 上加载比特数。式(3)等号右边第 1 项 $a_m[n-1]$ 表示用户 m 过去时间的平均吞吐量;第 2 项表示用户 m 当前时刻 n 的平均吞吐量。 $a_m[n-1]$ 如式(4)所示。

$$a_m[n-1] = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} T_m[i], & n < W \\ \frac{1}{W} \sum_{i=n-W+1}^{n-1} T_m[i], & n \geq W \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中 $T_m[i]$ 为用户 m 在时刻 i 的吞吐量, $T_m[i]$ 如式(5)所示。

$$T_m[i] = \sum_{k=1}^K C_{m,k}[i] b_{m,k}[i] \quad (5)$$

比例公平资源分配算法的设计目标是在用户比例速率要求和功率限制的基础上,最大化应用时间窗 W 内系统吞吐量。因此,可用如下数学模型描述:

$$\left. \begin{aligned} \text{Max : } S[n] &= \sum_{m=1}^M \ln(T_m^{(W)}[n]) \\ \text{s.t. : } C1 \quad C_{m,k}[n] &\geq 0, \sum_{m=1}^M C_{m,k}[n] = 1, \forall m, \forall k \\ C2 \quad T_{m1}^{(W)}[n] : T_{m2}^{(W)}[n] &= w_{m1} : w_{m2} \\ C3 \quad \overline{\text{BER}}[m, k] &\leq \overline{\text{BER}}_o[m, k], \forall m, \forall k \\ C4 \quad E\{\text{SNR}[m]\} &= S_m \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)中目标函数是采用对数效用函数求和。限制条件 $C1$ 是保证子载波在每个时隙的利用率不超过 1; $C2$ 是应用时间窗 W 内用户平均吞吐量的比例公平约束,其中 w_{m1} 和 w_{m2} 是正整数; $C3$ 是保证用户 m 在子载波 k 上误比特率需求; $C4$ 保证了用户 m 的接收信噪比均值 S_m 。

3 多用户 MIMO-OFDM 比例公平资源分配算法

3.1 基于应用时间窗比例公平资源分配算法

首先对用户 m 在子载波 k 上统计信道状态信息 $\bar{\mathbf{H}}[m, k]$ 的相关矩阵进行特征值分解

$$\left. \begin{aligned} \bar{\mathbf{H}}[m, k] \bar{\mathbf{H}}^H[m, k] &= \bar{\mathbf{U}}[m, k] \boldsymbol{\Lambda}[m, k] \bar{\mathbf{U}}^H[m, k] \\ \boldsymbol{\Lambda}[m, k] &= \text{diag}(\lambda_1[m, k], \dots, \lambda_{N_t}[m, k]) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

用户 m 在子载波 k 上的平均误比特率为

$$\overline{\text{BER}}[m, k] \approx 0.2E\left[\exp(-\text{SNR}[m, k] d^2[m, k])\right] \quad (8)$$

式(8)中 $E\{x\}$ 表示对 x 求期望, $d^2[m, k]$ 表示用户 m 在子载波 k 上的星座调制距离, $\text{SNR}[m, k]$ 表示用户 m 在子载波 k 上的接收信噪比。 $d^2[m, k]$ 和 $\text{SNR}[m, k]$ 如式(9), 式(10)所示。

$$d^2[m, k] = \frac{1.6}{2^{b[m, k]} - 1} \quad (9)$$

$$\text{SNR}[m, k] =$$

$$\frac{(\delta_1[m, k] \lambda_1[m, k] + \delta_2[m, k] \lambda_2[m, k]) \times P[m, k]}{N_o} \quad (10)$$

式(8)和式(9)的有效性,在文献[10]中得到验证。式(10)中 N_o 是加性高斯白噪声方差, $P[m, k]$ 表示用户 m 在子载波 k 上的发射功率, $\delta_1[m, k]$ 和 $\delta_2[m, k]$ 表示子载

波 k 上用户 m 发射功率在两个波束形成方向上的分配比例, 文献[11]给出了 $\delta_i[m, k]$ 的解析表达式。目标误比特率 $\overline{\text{BER}}_o[m, k]$ 对应的星座调制距离, 我们用 $d_o^2[m, k]$ 表示。当 $\delta_2[m, k] > 0$ 时, $d_o^2[m, k]$ 如式(11); 当 $\delta_2[m, k] = 0$ 时, $d_o^2[m, k]$ 如式(12)^[9]。

$$d_o^2[m, k] = \left(\frac{Z[m, k] \left(5\overline{\text{BER}}_o[m, k] \right)^{\frac{-1}{Z[m, k]N_r}} - X[m, k]}{\prod_{i=1}^2 (1 + \kappa_i[m, k])^{\frac{-Y_i[m, k]}{Z[m, k]}}} \right) \cdot \frac{N_o}{\sigma_\varepsilon^2[m, k]} \quad (11)$$

$$d_o^2[m, k] = \frac{\left(5\overline{\text{BER}}_o[m, k] \right)^{\frac{-1}{Y_1[m, k]N_r}} - 1}{1 + \kappa_1[m, k]} \frac{N_o}{\sigma_\varepsilon^2[m, k]} \quad (12)$$

式(11), 式(12)中 $Z[m, k] = \sum_{i=1}^2 Y_i[m, k]$, $X[m, k] = \sum_{i=1}^2 \left[Y_i[m, k] / (1 + \kappa_i[m, k]) \right]$, 其中 $\kappa_i[m, k] = \lambda_i[m, k] / (N_r \sigma_\varepsilon^2[m, k])$, $Y_i[m, k] = (1 + \kappa_i[m, k])^2 / (1 + 2\kappa_i[m, k])$, $i = 1, 2$ 。

式(6)满足限制条件 $C3$ 和 $C4$ 的时刻 n 用户 m 在子载波 k 上加载比特 $b_{m,k}[n]$ 如式(13)。

$$b_{m,k}[n] = \log_2 \left(1 + \frac{1.6}{d_o^2[m, k]} \right) \quad (13)$$

基于应用时间窗比例公平算法的思想: 首先把系统中用户按照其比例映射为相应数目的虚拟用户, 虚拟用户满足误比特率要求的星座调制距离与原用户相同; 然后运用影子价格把子载波资源最优地分配给虚拟用户, 使每个虚拟用户有相同的平均吞吐量并且使系统总吞吐量最大。

例 1 系统中有 2 个用户, $T_1^{(W)}[n]: T_2^{(W)}[n] = 3:4$, 我们把用户 1 映射为 3 个虚拟用户 $\{v1, v2, v3\}$, 用户 2 映射为 4 个虚拟用户 $\{v4, v5, v6, v7\}$; 并且时刻 n 子载波 k 上用户 1 的 3 个虚拟用户有相同的满足误比特率要求的星座调制距离 $d_o^2[1, k]$, 用户 2 的 4 个虚拟用户有相同的满足误比特率要求的星座调制距离 $d_o^2[2, k]$ 。

定义 2 时刻 n 子载波 k 上虚拟用户 vm 的影子价格

$$\frac{\partial S[n]}{\partial C_{vm,k}[n]} = \frac{b_{vm,k}[n]}{\min(n, W)a_{vm}[n-1] + \sum_{k=1}^K C_{vm,k}[n]b_{vm,k}[n]} \quad (14)$$

子载波分配准则: 子载波分配给影子价格高的用户将会给系统带来最大的效益。有两种情况:

(1) 当用户 i 和用户 j 子载波 k 上的指示变量

$C_{i,k}^*[n] > 0$, $C_{j,k}^*[n] = 0$ 时, 则用户 i 和用户 j 的影子价格满足式(15):

$$\left. \frac{\partial S[n]}{\partial C_{i,k}^*[n]} \right|_{C_{i,k}^*[n]} \geq \left. \frac{\partial S[n]}{\partial C_{j,k}^*[n]} \right|_{C_{j,k}^*[n]} \quad (15)$$

(2) 当用户 i 和用户 j 子载波 k 上的指示变量 $C_{i,k}^*[n] > 0$, $C_{j,k}^*[n] > 0$ 时, 则用户 i 和用户 j 的影子价格满足式(16):

$$\left. \frac{\partial S[n]}{\partial C_{i,k}^*[n]} \right|_{C_{i,k}^*[n]} = \left. \frac{\partial S[n]}{\partial C_{j,k}^*[n]} \right|_{C_{j,k}^*[n]} \quad (16)$$

系统中有 V 个虚拟用户, $V = \sum_{m=1}^M w_m$ 。本文提出的基于应用时间窗比例公平算法 ($1 < W < +\infty$) 称为 ATWPFA (Application Time Window Proportional Fairness Algorithm), 文献[7,8]提出的比例公平算法是 ATWPFA 的一种特殊情况, 即各个用户获得近似相等的数据速率。ATWPFA 描述如下:

第 1 步 计算各用户满足 $\overline{\text{BER}}_o[m, k]$ 需求的星座距离 $d_o^2[m, k]$, 用式(13)计算时刻 n 用户 m 在子载波 k 上加载比特 $b_{m,k}[n]$ 。

第 2 步 初始化 $C_{vm,k}[n] \leftarrow 1/V$, 时刻 n 虚拟用户 vm 的吞吐量 $T_{vm}[n] \leftarrow \sum_{k=1}^K b_{vm,k}[n]/V$ 。

for $k = 1$ to K

第 3 步 时刻 n 接入子载波 k 的虚拟用户集合 $I_k \leftarrow \{vm | C_{vm,k}[n] > 0\}$, 时刻 n 子载波 k 上的平均速率 $R_k[n] \leftarrow \sum_{vm \in I_k} \frac{\partial S[n]}{\partial C_{vm,k}[n]} / |I_k|$, 影子价格

$\frac{\partial S[n]}{\partial C_{vm,k}[n]}$ 用式(14)求得。

第 4 步 影子价格分类

$$I_k^+ \leftarrow \left\{ vm \mid vm \in I_k, \text{ 并且 } \frac{\partial S[n]}{\partial C_{vm,k}[n]} \geq R_k[n] \right\}$$

$$I_k^- \leftarrow \left\{ vm \mid vm \in I_k, \text{ 并且 } \frac{\partial S[n]}{\partial C_{vm,k}[n]} < R_k[n] \right\}$$

$$\bar{I}_k^+ \leftarrow \left\{ vm \mid C_{vm,k} = 0, \text{ 并且 } \frac{\partial S[n]}{\partial C_{vm,k}[n]} \geq R_k[n] \right\}$$

$$\bar{I}_k^- \leftarrow \left\{ vm \mid C_{vm,k} = 0, \text{ 并且 } \frac{\partial S[n]}{\partial C_{vm,k}[n]} < R_k[n] \right\}$$

$$R_k^{\text{new}}[n] \leftarrow \sum_{vm \in I_k \cup \bar{I}_k^+} \frac{\partial S[n]}{\partial C_{vm,k}[n]} / |I_k \cup \bar{I}_k^+|$$

如果 $R_k^{\text{new}}[n]$ 等于 $R_k[n]$, 进入第 5 步; 否则, 令 $R_k[n] \leftarrow R_k^{\text{new}}[n]$, 返回第 4 步。

$$\text{第5步 } \delta_{vm,k}[n] \leftarrow \frac{\partial S[n]}{\partial C_{vm,k}[n]} - R_k[n]$$

$$\forall vm \in I_k \cup \bar{I}_k^+; \delta_{vm,k}[n] \leftarrow 0, \forall vm \in \bar{I}_k^-$$

$$\alpha \leftarrow \min_{vm \in \bar{I}_k^+ \cup \bar{I}_k^-} \left\{ (1 - C_{vm,k}[n]) / \delta_{vm,k}[n] \right\}$$

$$\beta \leftarrow \min_{vm \in I_k} \{ -C_{vm,k}[n] / \delta_{vm,k}[n] \}, \gamma \leftarrow \min(\alpha, \beta)$$

调整虚拟用户 vm 在子载波 k 的接入时间百分比 $C_{vm,k}[n] \leftarrow C_{vm,k}[n] + \gamma \delta_{vm,k}[n]$ 。

第6步 计算时刻 n 虚拟用户 vm 的吞吐量 $T_{vm}[n] \leftarrow \sum_{k=1}^K b_{vm,k}[n] C_{vm,k}[n]$, 更新影子价格 $\frac{\partial S[n]}{\partial C_{vm,k}[n]}$ 。如果影子价格满足(1)或(2), 进入下一个子载波; 否则, 返回第3步。

end

3.2 基于应用时间窗比例公平资源分配算法的两种特殊情况

当 $W=1$ 时, 即服务对时延很敏感, 上述的基于应用时间窗比例公平资源分配算法把影子价格用式(17)代替就可以适用于这种情况。

$$\frac{\partial S[n]}{\partial C_{vm,k}[n]} = \frac{b_{vm,k}[n]}{\sum_{k=1}^K C_{vm,k}[n] b_{vm,k}[n]} \quad (17)$$

当 $W=\text{Infinite}$ 时, 即服务对时延没有要求, 资源分配的优化目标是在保证公平性的基础上最大化吞吐量, 可用式(18)和式(19)分配时刻 n 的子载波资源:

$$vm^*(k) = \arg \max \frac{b_{vm,k}[n]}{E\{T_{vm}^*[n]\}} \quad (18)$$

$$C_{vm^*(k),k} = 1, C_{vm,k} = 0, \forall vm \neq vm^*(k) \quad (19)$$

式(18)中, $E\{T_{vm}^*[n]\}$ 表示时刻 n 虚拟用户 vm 吞吐量的期望值。

4 数值仿真与性能分析

用 matlab 进行仿真, 基站配有 2 根发射天线, 移动台配有 2 根接收天线; 系统有 6 个用户, 用户的比例速率权重分别为 2, 3, 1, 1, 2 和 1; 所有用户在子载波上误比特率要求都为 1×10^{-3} ; 系统中各用户的接收信噪比均值为 10 dB, 11 dB, 12 dB, 13 dB, 14 dB 和 15 dB; OFDM 符号子载波数 $K=16$, OFDM 符号持续时间 4 ms; 假设信道是有指数时延谱的频率选择性衰落信道, 多普勒扩展为 20 Hz。归一化多普勒频率定义为应用时间窗的长度乘以多普勒频率。

定义 3 蜂窝小区中用户 Jain 公平指数

$$\text{Jain} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{\sum_{m=1}^M \frac{T_m^{(W)}[n]}{w_m}}{\sum_{m=1}^M \left(\frac{T_m^{(W)}[n]}{w_m} \right)^2} \right)^2 \quad (20)$$

式(20)中, N = 仿真时间/OFDM 符号持续时间。可以看到, Jain 公平指数的值越接近 1 表明算法取得的公平性越好, Jain 公平指数的值等于 1 表明各用户比例速率可以得到严格保证。

图 1 比较了各种算法的系统吞吐量随归一化多普勒频率变化。仿真条件: 各用户的相关系数 ρ 都等于 0.9。我们把文献[5]、文献[6]与本文算法进行比较。图 1 可以看出系统吞吐量从大到小依次为: $W=\text{Infinite}$ 算法, ATWPTA 算法, $W=1$ 算法, 文献[5]算法, 文献[6]算法。本文提出算法的系统吞吐量随着归一化多普勒频率变大而变大, 并且趋近于 $W=\text{Infinite}$ 算法的系统吞吐量, 其它算法的系统吞吐量不随归一化多普勒频率变化而改变。这是因为 ATWPTA 算法设计时考虑了应用时间窗 W , 并且随着应用时间窗变大 ATWPTA 算法能够更好地利用时域分集, 提高系统的吞吐量, 而其它算法则没有利用时域分集。图 2 的仿真条件与图 1 相同, 图 2 比较了各算法 Jain 公平指数随归一化多普勒频率的变化。从图 2 中可以看出各算法的公平性从好到坏依次为: 文献[6]算法, $W=1$ 算法, 文献[5]算法, ATWPTA 算法, $W=\text{Infinite}$ 算法。尽管文献[5]算法和文献[6]算法的 Jain 公平指数略微优于 ATWPFA 算法, 但是在系统吞吐量方面文献[5]算法和文献[6]算法则明显低于 ATWPFA 算法。综上所述, ATWPTA 算法相比其它算法在吞吐量和公平性之间取得了良好的折中。

图 3 比较了相关系数 ρ 不同情况下各算法的系统吞吐量。仿真条件: W 为 60 个 OFDM 符号持续时间; 各用户的相关系数 ρ 相同。从图 3 可以看出, 各算法的吞吐量都随相关系数 ρ 的增加而增加, 相关系数 ρ 变大说明反馈时延变小; 在不同相关系数 ρ 情况下, ATWPTA 算法的系统吞吐量明显优于文献[5]算法和文献[6]算法。图 4 的仿真条件与图 3 相同, 图 4 比较了相关系数 ρ 不同情况下各算法的 Jain 公平指数。图 4 可以看出, 相比文献[5]算法和文献[6]算法, ATWPTA 算法在增加系统吞吐量的同时取得了良好的公平性。

5 结论

针对基于延时信道状态信息的多用户 MIMO-OFDM 系统, 在用户比例速率要求和功率限制的情况下, 本文提出了一种基于应用时间窗比例公平算法。仿真结果表明: 该算法在保证用户公平性的基础上, 有效地提高系统的吞吐量, 并且相比其它算法能够获得吞吐量和公平性的良好折中。

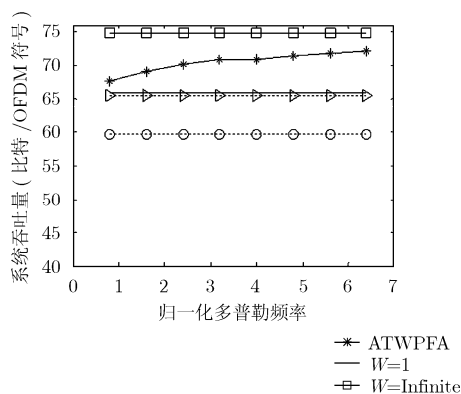


图1 各算法的系统吞吐量比较

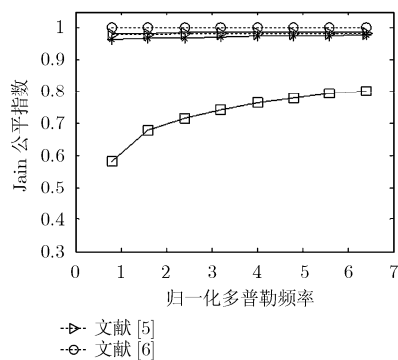


图2 各算法 Jain 公平指数比较

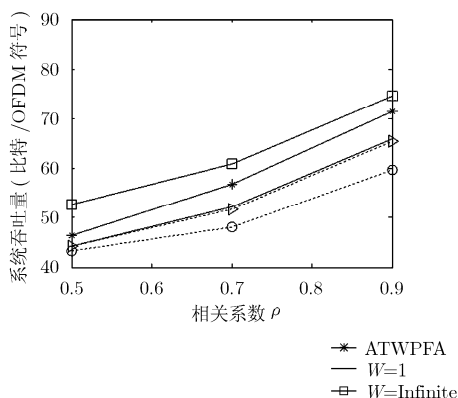


图3 各算法系统吞吐量随 ρ 的变化

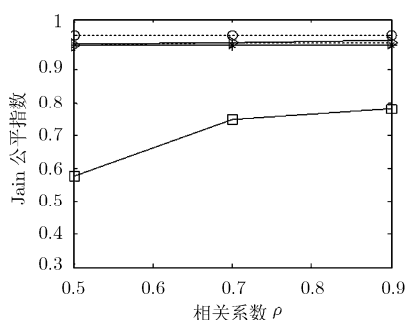


图4 各算法 Jain 公平指数随 ρ 的变化

参 考 文 献

[1] Yang H W. A road on future broadband wireless access: MIMO-OFDM-BASED air interface[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(1): 53-60.

[2] Li L, Pal M, and Yang Y R. Proportional fairness in multi-rate wireless LANs[C]. *IEEE INFOCOM 2008*, Phoenix, AZ, USA, Apr. 13-18, 2008: 1004-1012.

[3] Fen H, James S, and Ho P H, et al. Performance analysis of weighted proportional fairness scheduling in IEEE 802.16 networks[C]. *ICC 2008*, Beijing, China, May 19-23, 2008: 3452-3456.

[4] 侯华, 周武阳, 朱近康. 基于跨层公平性准则的自适应无线资源分配方法[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(3): 632-642.
Hou H, Zhou W Y, and Zhu J K. An adaptive wireless resource allocation scheme based on cross-layer fairness criterion[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2008, 30(3): 632-642.

[5] Yu G D, Zhang Z Y, and Chen Y, et al. Subcarrier and bit allocation for OFDMA systems with proportional fairness[C]. *IEEE WCNC 2006*, Las Vegas, USA, April 3-6, 2006, 3: 1717-1722.

[6] Rhee W and Cioffi J M. Increasing in capacity of multiuser OFDM system using dynamic Subchannel allocation[C]. *IEEE VTC 2000*, Tokyo, Japan, May 15-18, 2000, 2: 1085-1089.

[7] Liew S C and Zhang Y J. Proportional fairness in multi-channel multi-rate wireless networks-part I: the case of deterministic channels with application to AP association problem in large-scale WLAN[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(9): 3446-3456.

[8] Zhang Y J and Liew S C. Proportional fairness in multi-channel multi-rate wireless networks-part II: the case of time-varying channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(9): 3457-3467.

[9] Xia P F, Zhou S L, and Giannakis G B. Adaptive MIMO-OFDM based partial channel state information [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(1): 202-213.

[10] Chung S T and Goldsmith A J. Degrees of freedom in adaptive modulation: a unified view[J]. *IEEE Transactions on Communication*, 2001, 49(9): 1561-1571.

[11] Zhou S L and Giannakis G B. Optimal transmitter eigen-beamforming and space-time block coding based on channel mean feedback[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(10): 2599-2613.

徐 雷: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为通信中的信号处理、自适应传输、跨层设计。
徐大专: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为通信中的信号处理、差错控制编码、信息论。
张小飞: 男, 1977 年生, 副教授, 研究方向为阵列信号处理。