

# WLAN 中基于多包接收的跨层资源分配方案

徐 雷<sup>1</sup>, 徐大专<sup>1</sup>, 张小飞<sup>1</sup>, 王俊波<sup>1,2</sup>, 徐淑芳<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 210016; 2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210016)

**摘 要:** 针对 WLAN, 提出了一个基于多包接收的跨层资源分配方案. 本文首先给出多个用户“共享”子信道的条件, 并提出了子信道“独占”和“共享”混合模式的信道分配方案; 然后, 推导了满足用户 QoS 要求的功率和比特加载表达式. 仿真结果表明: 本文提出方案不仅能有效提高系统吞吐量, 而且能降低平均包延时; 并且具有计算复杂度低的特点.

**关键词:** 无线局域网; 多包接收; 跨层设计; MIMO-OFDM; DCF 协议

**中图分类号:** TN929.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2011) 10-2402-05

## Cross-Layer Resource Allocation Scheme for WLAN Based on Multi-Packet Reception

XU Lei<sup>1</sup>, XU Da-zhuan<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-fei<sup>1</sup>, WANG Jun-bo<sup>1,2</sup>, XU Shu-fang<sup>1</sup>

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;  
2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** Tailored for the WLAN, we propose a cross-layer resource allocation schemes based on multi-packet reception. Firstly, the condition of sharing the subchannel by more than one user is obtained. Secondly, the subchannel allocation scheme including “exclusive” and “share” modes are proposed. Finally, the expression of power and bit loading which meets the QoS requirement is derived. Analysis and simulation show that proposed scheme not only improves the system throughput efficiently but also reduces the average packet delay and has low computational complexity.

**Key words:** WLAN, multi-packet reception, cross-layer design, MIMO-OFDM, distributed coordination function protocol

## 1 引言

无线局域网 (Wireless Local Area Network, WLAN) 有着方便、廉价以及较高的传输速率等诸多优势<sup>[1,2]</sup>. 传统 WLAN 的系统容量远达不到理论值, 尤其在网络负载高时. 这是由于传统的网络是基于分层的方法来设计的, 分层设计方法无法保证网络的最优资源利用率和用户业务的 QoS 需求. 因此为了提高 WLAN 性能, 有必要设计同时考虑物理层和 MAC 层参数的跨层资源分配方案. 近几年, 随着网络信号处理技术的飞速发展, 物理层具有多包分辨的能力. 文献[3]针对无线传感器网络的特点和信道矩阵满秩性要求, 设计了协作无线传感器网络的中继选择准则, 提出了一个新的跨层多包接收方案. 文献[4]研究了多包接收对 WLAN 系统吞吐量的影响, 设计了一种联合 MAC-PHY 的协议.

OFDM 系统中的资源分配算法已经被很多学者广泛的研究. 文献[5]研究了 OFDM 系统中下行链路的多

用户子信道分配问题, 提出了一个次优的低复杂度子信道分配方案, 该方案保证了用户得到近似相等的吞吐量. 文献[6]针对多用户 OFDM 系统的比例公平问题, 提出了一种非迭代的资源分配方案. 文献[7]在空时编码级联波束成形的 MIMO-OFDM 系统中推导了考虑“过期”信道状态信息并满足用户 QoS 的星座调制距离, 提出了单用户的资源分配方案. 已经有学者开始研究 WLAN 中的资源分配问题. 文献[8]针对多信道多速率 WLAN 的资源分配和调度问题, 研究了比例公平调度函数的使用, 并提出了一种基于应用时间窗比例公平算法. 文献[9]把文献[7]中“过期”信道状态信息的概念引入到 WLAN 中, 提出了一个跨层资源分配方案. 文献[10]针对 WLAN 提出了一种基于多包接收的分布式 MAC 协议, 并利用两维 Markov 链模型分析了利用该协议的 WLAN 系统吞吐量.

文献[9]为 WLAN 提出了一个跨层资源分配方案, 但是该方案具有计算复杂度高的特点. 本文在物理层采

用基于波束成形的 MIMO-OFDM 传输技术,在 MAC 层采用的基于多包接收的 DCF 协议,并在此基础上提出了一个低复杂度跨层资源分配方案.仿真结果表明:相比其它文献的方案,本文提出方案不仅能有效提高系统吞吐量,而且能降低平均包延时.

## 2 系统模型和用户共享子信道条件

### 2.1 物理层 MIMO-OFDM 系统模型

物理层上,我们采用基于波束成形的 MIMO-OFDM 技术. OFDM 符号中有  $K$  个子载波, WLAN 系统中有  $M_t$  个用户,其中有  $M$  个用户接入到 AP. 每个用户有  $N_t$  根发射天线, AP 有  $N_r$  根接收天线. 在每个子载波上,配置自适应调制器和波束成形器. 我们对每个子载波上的信道矩阵做奇异值分解,可以得到  $N_s$  个空间子信道,其中,  $N_s = \min(N_t, N_r)$ . 多用户可以使用相同的空间子信道,叠加的信号通过多天线技术在接收端被分离. 在系统中,我们采用最大似然多用户检测器,该检测器是能够最大化后验概率的最优接收机结构.

假设 AP 在接收到 RTS 帧之后获得完善的信道状态信息,由于用户发射数据包是在 AP 接收 RTS 帧之后,所以 AP 在执行资源分配方案时使用“过期”的信道状态信息.  $H^f[m; k]$  表示用户  $m$  在子载波  $k$  上的反馈信道状态信息矩阵,  $H[m; k]$  表示用户  $m$  在子载波  $k$  上的  $\Delta t$  时间后信道状态信息矩阵.  $H^f[m; k]$  与  $H[m; k]$  之间的相关系数  $\rho = J_0(2\pi f_d \Delta t)$ . 其中,  $J_0(\cdot)$  表示第一类零阶贝塞尔函数,  $f_d$  是多普勒频移. 根据 MMSE 预测器,我们用  $H^f[m; k]$  来估计  $H[m; k]$

$$\overline{H[m; k]} = E[H[m; k] | H^f[m; k]] = \rho H^f[m; k] \quad (1)$$

式(1)中  $\overline{H[m; k]}$  是均值信道状态信息矩阵. 用户发射数据包时的估计信道状态信息矩阵  $H[\hat{m}; k]$  为

$$H[\hat{m}; k] = \overline{H[m; k]} + \Psi[m; k] \quad (2)$$

式(2)中  $\Psi[m; k] \sim CN(0_{N_t \times N_t}, N_t \sigma_e^2[m; k] I_{N_t})$  表示 MMSE 预测器的估计误差矩阵,  $\sigma_e^2[m; k] = (1 - |\rho|^2) \sigma_h^2, \sigma_h^2$  是信道链路平均功率<sup>[11]</sup>.

对均值信道状态信息矩阵  $\overline{H[m; k]}$  做奇异值分解

$$\begin{aligned} \overline{H[m; k]} &= U[m; k] \Lambda[m; k] V^H[m; k] \\ &= \sum_{j=1}^{N_s} u_j[m; k] \bar{\lambda}_j[m; k] v_j^H[m; k] \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $\bar{\lambda}_j[m; k]$  是用户  $m$  在子载波  $k$  上的第  $j$  个子信道奇异值,  $v_j^H[m; k]$  是对应的发射天线权重向量,  $u_j[m; k]$  是对应的接收天线权重向量.

### 2.2 用户共享子信道的条件

假设有两个用户  $m_1$  和  $m_2$  接入到 AP. 我们对用户  $m_1$  和  $m_2$  的信道均值矩阵  $\overline{H[m_1; k]}$  和  $\overline{H[m_2; k]}$  做奇异

值分解

$$\overline{H[m_1; k]} = U[m_1; k] \bar{\Lambda}[m_1; k] V^H[m_1; k] \quad (4)$$

$$\overline{H[m_2; k]} = U[m_2; k] \bar{\Lambda}[m_2; k] V^H[m_2; k]$$

$u_j[m_1; k]$  和  $u_j[m_2; k]$  分别为矩阵  $U[m_1; k]$  和  $U[m_2; k]$  的第  $j$  列, 则用户  $m_1$  和  $m_2$  在子载波  $k$  上第  $j$  个空间子信道的相关系数为

$$\delta_{m_1, m_2}^j[k] = |(u_j^H[m_1; k])^H u_j[m_2; k]| \quad (5)$$

$\delta_{m_1, m_2}^j[k]$  的值越小表示用户  $m_1$  和  $m_2$  的相关性越低. 当  $\delta_{m_1, m_2}^j[k] < \delta_{threshold}$  时, 用户  $m_1$  和  $m_2$  可以共享子载波  $k$  上的第  $j$  个子信道,  $\delta_{threshold}$  是相关系数门限值<sup>[9]</sup>.

MAC 层上, 我们采用的是基于多包接收的 IEEE802.11 RTS/CTS 传输模式<sup>[9]</sup>. AP 能够成功接收多个数据包的条件是同时传输的用户数目小于等于接收机天线数目  $N_r$ . 系统中有  $M$  个用户成功传输,  $M \leq N_r$ .

## 3 跨层资源优化问题描述

优化目标是在给定误比特率 BER 和总发射功率  $P_{total}$  的限制条件下最小化传输时间. 在多包接收情况下, 系统需要总的传输时间是由需要传输时间最多的用户决定的, 因此用户的资源分配问题不仅要考虑物理层上信道衰落等因素, 而且要考虑用户数据包长度. 跨层资源优化问题描述如下:

Min:  $T_{max}$

$$S. T: C1. \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{2^M} \alpha_{j, i, k} c_{j, i, k} p_{m, j, i, k} \leq P_{total}$$

$$C2. \overline{BER}_{m, j, k} \leq \overline{BER}_{target}, \forall m, k, j$$

$$C3. \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{2^M} \alpha_{j, i, k} c_{j, i, k} b_{m, j, i, k}}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{2^M} \alpha_{j, i, k} c_{j, i, k} b_{m+1, j, i, k}} = \frac{R_m}{R_{m+1}},$$

$$\forall m = 1, \dots, M-1$$

$$C4. T_{max} = \max_{m \in \{1, 2, \dots, M\}} \left( \frac{R_m}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{2^M} \alpha_{j, i, k} c_{j, i, k} b_{m, j, i, k}} \right)$$

$$C5. \sum_{i=1}^{2^M} \alpha_{j, i, k} c_{j, i, k} \leq 1, \forall k, j$$

$$C6. \alpha_{j, i, k} \in \{0, 1\}, c_{j, i, k} \in \{0, 1\},$$

$$p_{m, j, i, k} \geq 0, b_{m, j, i, k} \geq 0, \forall i, k, m, j$$

(6)

由于多个用户共享相同的空间子信道, 我们定义指示变量  $\alpha_{j, i, k}$  表示子载波  $k$  空间子信道  $j$  上的第  $i$  个用户集合是否可行,  $\alpha_{j, i, k} = 1$  表示可行.  $i$  的取值范围  $[0, 2^M - 1]$ , 把  $i$  的值转化为  $M$  位二进制序列; 其中, 0 和 1 分别代表相应用户是否是第  $i$  个用户集合中的元

素. 例, 当  $M=3$  和  $i=6$  时,  $i$  对应的二进制序列(1, 1, 0), 该序列表示用户 2 和用户 3 在第  $i=6$  用户集合中. 多个用户共享子信道的条件是用户集合中每对用户的信道相关系数都小于  $\delta_{\text{threshold}}$ . 式(6)中,  $c_{j,i,k}$  代表子载波  $k$  上的空间子信道  $j$  分配给第  $i$  个用户集合.  $b_{m,j,i,k}$  和  $p_{m,j,i,k}$  分别对应子载波  $k$  上第  $j$  个空间子信道第  $i$  个用户集合中的第  $m$  个用户加载的比特和功率.  $P_{\text{total}}$  是系统的总功率限制.  $\overline{BER}_{\text{target}}$  是保证用户 QoS 的平均 BER 要求.  $\overline{BER}_{m,j,k}$  表示用户  $m$  在子载波  $k$  上第  $j$  个空间子信道的误比特率.  $R_m$  是用户  $m$  的数据包长度.  $T_{\text{max}}$  表示  $M$  个接入用户需要的最大传输时间.

C1 表示系统的总功率限制; C2 表示每个用户的 QoS 要求; C3 表示一个 OFDM 符号中用户的数据速率与用户的数据包长度成比例; C4 表示  $M$  个接入用户需要的最大传输时间; C5 和 C6 表示资源分配解的可行性. 文献[9]研究 WLAN 中跨层资源分配方案, 虽然研究的是上行链路, 但是为了和其它文献进行比较, 文献[9]用系统总功率限制来代替接入用户的各自功率限制. 本文为了和文献[9]以及其它文献进行比较, 也采用系统总功率限制, 如限制条件 C1.

## 4 跨层资源分配方案

### 4.1 空间子信道分配方案

首先, 给出“共享”空间子信道分配方案.

**步骤 1** 找到各空间子信道上的可行用户集合

$\alpha_{j,i,k}$ .

**步骤 2** 找到每个接入用户可行的空间子信道集合. 如果  $\alpha_{j,i,k} = 1$ ,  $m \in \Phi_{j,i,k}$ ; 那么,  $S_m^{\text{mp}} = S_m^{\text{mp}} + (k, j)$ ,  $N_m^{\text{mp}} = N_m^{\text{mp}} + 1$ .

**步骤 3** 计算用户  $m$  在子载波  $k$  上第  $j$  个空间子信道的星座距离  $d_j^2[m; k]$ [11]; 计算每个用户分配功率

$P_m^{\text{mp}} = R_m \times P_{\text{total}} / \sum_{m=1}^M R_m$ ; 假设各用户的功率在空间子信道上均匀分配, 用户  $m$  在子载波  $k$  上第  $j$  个空间子信道上加载的比特  $b_{m,j,k}^{\text{mp}}$

$$b_{m,j,k}^{\text{mp}} = \log_2 \left( 1 + \frac{1.5 P_m^{\text{mp}}}{N_m^{\text{mp}} d_j^2[m; k]} \right) \quad (7)$$

**步骤 4** 初始化  $N_m = 0$ ,  $S_m = \phi$ ,  $\forall m$ . 设  $c_{j,i,k} = 0$ ,  $\forall i, j, k$ . 设  $S = \{(1, 1); \dots; (1, N_s); \dots; (K, 1); \dots; (K, N_s)\}$ ,  $\omega_m = N_m / R_m$ .

**步骤 5** While ( $S \neq \phi$ )

(1) 找到归一化空间子信道分配最小的用户  $m^* = \arg \min \{\omega_m\}$ ;

(2) 找到用户  $m^*$  空间子信道集合中, 传输速率最大的空间子信道

$$(k^*, j^*) = \arg \max_{(k,j) \in S_m^{\text{mp}}} b_{m^*,j,k}^{\text{mp}} \quad (8)$$

(3) 选择空间子信道  $(k^*, j^*)$  上, 使吞吐量最大的用户集合  $i^*$ . 如果超过一个用户集合满足条件, 则选择用户数目最大的用户集合; 如果有多个用户集合即满足条件又有相同用户数目, 则随机选择一个用户集合.

(4) 如果  $m \in \Phi_{j^*, i^*, k^*}$ ; 那么  $N_m = N_m + 1$ ,  $S_m = S_m + \{(k^*, j^*)\}$ ,  $S_m^{\text{mp}} = S_m^{\text{mp}} - \{(k^*, j^*)\}$ ,  $\forall m$ ;

(5) 设  $c_{j^*, i^*, k^*} = 1$ ,  $S = S - \{(j^*, k^*)\}$ ,  $\omega_m = N_m / R_m$ .

End

**步骤 6**  $c_{j,i,k}$  是最终的空间子信道分配结果.

$\Phi_{j,i,k}$  表示子载波  $k$  上第  $j$  个空间子信道上的第  $i$  个用户集合.  $S_m^{\text{mp}}$  表示用户  $m$  可行的空间子信道集合.  $N_m^{\text{mp}}$  表示用户  $m$  可行的空间子信道数目.  $b_{m,j,k}^{\text{mp}}$  表示用户  $m$  在子载波  $k$  上第  $j$  个空间子信道的临时加载比特数.  $N_m$  是已经分配给用户  $m$  的空间子信道数目.  $\omega_m$  是用户  $m$  归一化空间子信道数目.  $S_m$  是分配给用户  $m$  的空间子信道集合.  $S$  是未分配的空间子信道集合.

下面给出“共享”空间子信道分配方案的特例:  $M=1$ , 即每个空间子信道只分配给一个用户, “独占”空间子信道分配方案.

### 4.2 功率和比特加载

由式(6)的限制条件 C3 和文献[6]的推导方法, 可以得到

$$\frac{1}{R_1} \left[ \sum_{(k,j) \in S_1} \log_2(1 + r_{1,j,k} p_{1,j,k}) \right] = \frac{1}{R_m} \left[ \sum_{(k,j) \in S_m} \log_2(1 + r_{m,j,k} p_{m,j,k}) \right], \quad m=2, 3, \dots, M \quad (9)$$

式(9)中,  $r_{m,j,k} = 1.5 / d_j^2[m; k]$  是用户  $m$  在子载波  $k$  上第  $j$  个空间子信道的等效信道增益,  $p_{m,j,k}$  是用户  $m$  在子载波  $k$  上的第  $j$  个空间子信道加载功率. 根据注水原理,

$$\begin{cases} p_{m,j,k} = (\lambda_m - \frac{1}{r_{m,j,k}})^+, & \forall (k,j) \in S_m \\ \lambda_m = \frac{P_m + \sum_{(k,j) \in S_m} \frac{1}{r_{m,j,k}}}{N_m}, & \forall m \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中,  $\lambda_m$  是用户  $m$  的注水线,  $P_m$  是用户  $m$  的总功率. 我们对用户  $m$  空间子信道集合  $S_m$  中的等效信道增益  $r_{m,j,k}$  进行排序,  $\forall (j,k) \in S_m$ ; 并用  $r_m^n$  重新表示用户  $m$  的等效信道增益,  $n \in [1, N_m]$ ; 得到  $r_m^N \geq r_m^{N-1} \geq \dots \geq r_m^1 > 0$ ;  $p_m^n$  是与  $r_m^n$  相对应的加载功率. 根据式(10), 可以得到.

由于在前面的空间子信道分配过程中, 根据各用户数据包的长度成比例的分配空间子信道, 所以

$$\frac{N_1}{R_1} \approx \frac{N_m}{R_m},$$

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{P_{total} + \sum_{m=1}^M \sum_{n \in S_m} \frac{1}{r_m^n}}{\sum_{m=1}^M N_m \frac{r_1^1}{r_m^1} \frac{A_1}{A_m}} \\ \lambda_m &= \frac{P_{total} + \sum_{m=1}^M \sum_{n \in S_m} \frac{1}{r_m^n}}{\sum_{m=1}^M N_m \frac{r_1^1}{r_m^1} \frac{A_1}{A_m}} \times \frac{r_1^1 A_1}{r_m^1 A_m}, m=2, 3, \dots, M \\ A_1 &= \prod_{n=2}^{N_1} \left( \frac{r_1^n}{r_1^1} \right)^{\frac{1}{N_1}} \\ A_m &= \prod_{n=2}^{N_m} \left( \frac{r_m^n}{r_m^1} \right)^{\frac{1}{N_m}} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

由于求得各用户的注水线  $\lambda_m$ , 我们可以根据注水算法求得用户在空间子信道上加载的比特和功率, 如式(12).

$$p_m^n = \left( \lambda_m - \frac{1}{r_m^n} \right)^+, n \in S_m, \forall m \quad (12)$$

$$b_m^n = \log_2(1 + r_m^n p_m^n), n \in S_m, \forall m$$

跨层资源分配方案: 当  $SNR \leq SNR_{threshold}$  时, 子信道分配采用“独占”空间子信道分配方案, 当  $SNR > SNR_{threshold}$  时, 子信道分配采用“共享”空间子信道分配方案; 用户在各自分配的空间子信道集合中加载的功率和比特按照式(11)和式(12)计算. 本文提出方案的计算复杂度最多是  $O((2^N(N_r + 2) + 4N_r)kN_s)$ , 文献[9]的 Huang 方案需要搜索  $(M + 1)$  个拉格朗日乘子.

## 5 数值仿真

WLAN 物理层的参数: OFDM 符号中有 64 个子载波, 发射天线和接收天线分别为  $N_t = 2$  和  $N_r = 6$ , 目标误比特率  $BER_{target} = 1 \times 10^{-5}$ , 系统带宽 20MHz; 假设物理层的信道是 Rayleigh 信道, 并且 Rayleigh 信道在每一数据包传输中是准静态的, 在不同数据包传输中可以不同; 高斯白噪声方差  $N_0 = 1$ . 式(1)中相关系数  $\rho = 0.8$ , 多个用户“共享”空间子信道的门限  $\delta_{threshold} = 0.4$ ,  $\rho$  和  $\delta_{threshold}$  的参数选择参考文献[9]中的仿真设计;  $SNR_{threshold} = 15\text{dB}$ . MAC 层的参数为: 用户数据包的长度均匀分布在 200 ~ 1000 字节之间; 控制帧 RTS、CTS、ACK 的格式和 MAC 层参数如文献[9]中描述. 仿真中我们考虑了系统吞吐量和平均包延时的性能指标. 为了公平比较文献[5]、[9]和[12]物理层采用波束形成方案. 我们采用 Matlab 做仿真实验.

图 1 和图 2 分别比较了各方案的数据包到达率与

平均包延时和系统吞吐量的关系. 图 1 和图 2 的仿真条件: 假设所有用户数据包到达率相同, 网络中用户数  $M_t = 40$ ,  $SNR = 20\text{dB}$ . 从图 1 可以看出, 当数据包到达率小于 0.27packets/ms 时, 本文提出方案可以保持系统稳定; Hu 方案[12]、Rhee 方案[5]和 Huang 方案[9]保持系统稳定的数据包到达率的临界值为 0.243packets/ms、0.236packets/ms 和 0.293packets/ms. 图 2 可以看出, 每个方案都有一个数据包到达率门限, 当数据包到达率小于门限时, 系统吞吐量成线性增长; 当数据包到达率大于门限时, 系统吞吐量基本保持不变. 尽管本文提出方案的性能比文献[9]的 Huang 方案稍差, 但是本文提出方案的计算复杂度比文献[9]要小很多.

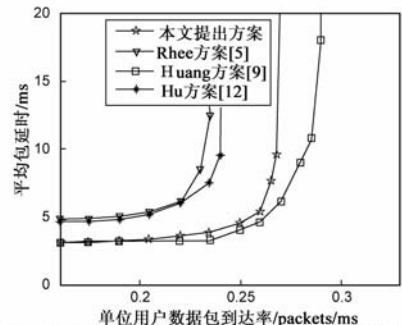


图1 各方案的平均包延时与数据包到达率的关系

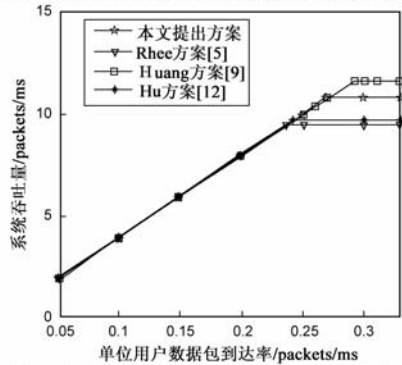


图2 各方案的系统吞吐量与数据包到达率的关系

## 6 结论

本文为 WLAN 提出了一个基于多包接收的跨层资源分配方案. 我们的优化目标是在考虑用户误比特率、系统总功率限制以及用户数据包长度的基础上最小化系统中用户的传输时间. 本文首先根据用户的数据包长度成比例的分配子信道; 然后根据注水原理和用户的比例速率要求推导了各用户注水线、加载的比特和功率表达式; 最后, 提出了基于子信道“共享”和“独占”混合模式的跨层资源分配方案. 理论分析和仿真结果表明: 本文提出方案具有计算复杂度低的特点; 相比其它文献的方案, 本文提出方案不仅能有效提高系统吞吐量, 而且能降低平均包延时.

## 参考文献

- [1] 杨卫东, 马建峰, 庆祺. 有限负载下 802.11DCF 的性能分析及优化[J]. 电子学报, 2008, 36(5): 948 - 652.  
Yang Wei-dong, Ma Jian-feng, Pei Qing-qi. Performance analysis and optimization for IEEE 802.11 DCF in finite load[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(5): 948 - 652. (in Chinese)
- [2] 陈明欣, 刘干, 朱光喜. WLAN 中基于效用的呼叫接纳控制策略[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1429 - 1434.  
Chen Ming-xin, Liu Gan, Zhu Guang-xi. Utility based call admission control in WLAN [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7): 1429 - 1434. (in Chinese)
- [3] 季薇, 郑宝玉. 无线传感器网络中基于 NDMA 的跨层协作多包接收[J]. 电子学报, 2007, 35(5): 1001 - 1004.  
Ji Wei, Zhen Bao-yu. Cross layer cooperative multi-packet reception in WSN based on NDMA[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(5): 1001 - 1004. (in Chinese)
- [4] Y J Zhang, P X Zheng, S C Liew. How does multiple-packet reception capability scale the performance of wireless local area networks? [J]. IEEE Trans. Mobile Computing, 2009, 8(7): 923 - 935.
- [5] W J Rhee, J M Cioffi. Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation[A]. IEEE VTC'00[C]. Tokyo: IEEE, 2000. 1085 - 1089.
- [6] Z K Shen, J G Andrews, B L Evans. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional fairness[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(6): 2726 - 2737.
- [7] P F Xia, S L Zhou, G B Giannakis. Adaptive MIMO-OFDM based on partial channel state information[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004; 52(1): 202 - 213.
- [8] Y J Zhang, S C Liew. 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] W L Huang, K B Letaief, Y J Zhang. Cross-layer multi-packet reception based medium access control and resource allocation for space-time coded MIMO/OFDM[J]. IEEE Transactions on Wireless Commun, 2008, 7(9): 3372 - 3384.
- [10] W L Huang, K B Letaief, Y J Zhang. Joint channel state based random access and adaptive modulation in wireless LANs with multi-packet reception [J]. IEEE Transactions on Wireless Commun Unications, 2008, 7(11): 4185 - 4197.
- [11] M Liu, D Z Xu. A practical bit and power allocation for MIMO-OFDM system in time varying wireless channels[A]. IEEE MAPE'07[C]. Hang Zhou: IEEE, 2007. 61 - 65.
- [12] Y J Hu, L Li. A low-complexity resource allocation algorithm based on proportional fairness for multiuser OFDM systems [A]. IEEE WICOM'08[C]. Wu Han: IEEE, 2008. 1 - 4.

## 作者简介



徐雷 男, 1983 出生于江苏, 南京航空航天大学电子信息工程学院博士研究生, 主要研究方向为 MIMO-OFDM 系统资源分配, WLAN, Beyond 3G 关键技术。  
E-mail: xulei23@nuaa.edu.cn

徐大专 男, 1963 出生于江苏盐城, 南京航空航天大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为编码理论、通信信号处理。

张小飞 男, 1977 年生, 南京航空航天大学电子信息工程学院教授。研究方向: 阵列信号处理。

王俊波 男, 1979 年生, 南京航空航天大学电子信息工程学院讲师。研究方向: 资源管理。

徐淑芳 女, 1981 年生, 南京航空航天大学电子信息工程学院讲师。研究方向: Ad hoc 网络。