

## 一种基于平均时延最小化的跨层自适应算法

惠毅 周志杰 张文强

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

**摘要:** 该文研究了 OFDM 系统的跨层自适应问题。针对现有资源分配算法不能有效地兼顾频谱效率、公平性和 QoS 的问题, 提出了一种综合考虑 CSI 和排队信息的基于平均时延最小化的跨层自适应资源分配算法。该算法利用经济学中的“效用理论”, 将平均等待时间作为优化权重, 充分保证了不同业务的 QoS, 通过“效用函数”保证了不同等待时间或者不同 QoS 的公平性。仿真结果显示, 该算法的时延性能略好于 LWDF 算法, 大大好于 PF 算法和 EXP 算法, 并且很好地保证了时延的公平性, 非常适合对时延敏感的通信。

**关键词:** 效用理论; QoS; 跨层自适应; LWDF; PF; EXP

中图分类号: TN915.65

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)10-2476-05

## A Cross-layer Adaptive Algorithm Based on the Minimal Mean Delay Time

Hui Yi Zhou Zhi-jie Zhang Wen-qiang

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** The cross-layer adaptive problem for OFDM systems is researched. In order to overcome the problem that the present resource allocation algorithms do not consider frequency efficiency, impartiality and QoS simultaneously, a cross-layer adaptive algorithm based on the minimal mean delay time is proposed in this paper, which considers Channel State Information(CSI) and queue information simultaneously. The algorithm uses the utility theory in economics, and considers the mean delay time as optimal quantity to ensure QoS for different services. The algorithm also uses utility function to ensure the impartiality of different delay times and QoS. The simulation results show that the delay time of the proposed algorithm is slightly better than that of LWDF, and is very better than these of PF and EXP. Moreover, it can ensure the impartiality of delay time, and is applicable to the communications those are sensitive to delay time.

**Key words:** Utility theory; Quality of Service(QoS); Cross-layer adaptive; Largest Weight Delay First(LWDF); Proportional Fair(PF); Exponential Rule(EXP)

### 1 引言

目前, 大部分网络采用了分层的 OSI 的网络设计思想, 每层独立工作, 支持层间的透明传输, 其中物理层负责原始比特信息的传输, MAC 层控制多个用户对共享资源的接入。从网络的整体角度上看, 这种分层的体系结构不是最优的。这种体系结构的次优性和非灵活性导致无线网络中的频谱资源不能得到有效应用。为优化无线网络性能, 在设计无线网络时必须将各层统一考虑, 进行跨层自适应优化<sup>[1, 2]</sup>。传统的网络设计也包含一些自适应能力, 如利用自适应信号处理调整信道参数等, 但这些调整与网络层次是不相关的。跨层自适应需要在各层之间通过信息交换, 满足网络负载、信道环境和 QoS 可变的要求, 即不仅要考虑信道条件, QoS, 时延, 抖动等因素, 还要考虑所有层间的信息传输, 非常复杂。文献[3]提出了一种跨层自适应算法, 但该算法比较复杂, 且算法时延较大。本文提出了一种跨层自适应算法, 借用经

济学中的“效用理论”研究无线网络中物理层和 MAC 层的跨层设计和优化问题, 降低了复杂度。

### 2 系统模型

跨层自适应系统的下行链路模型如图 1 所示<sup>[4, 5]</sup>。OFDM 的总带宽为  $B$ , 子载波的总数目为  $K$ , 每个子载波的带宽为  $\Delta f = B/K$ , OFDM 的符号周期为  $T_s$ 。所有的子载波由  $M$  个用户共享, 每个用户的数据如果不能立即得到发送, 将形成一个独立的排队队列。假设  $nT_s$  时刻用户  $m$  有  $Q_m(n)$  比特数据等待发送,  $Q_m(0) = 0$ 。并假定每个用户的排队队列长度最大为无限长, 同时  $nT_s$  时刻基站从用户  $m$  取  $r_m(n)$  个数据发送出去, 假设  $a_m(n)$  是用户  $m$  在  $(n-1)T_s$  时刻到  $nT_s$  时刻到达的数据, 即  $nT_s$  时刻用户  $m$  的数据到达率, 那么  $(n+1)T_s$  时刻第  $m$  个用户的排队队列长度存在如下的迭代公式:

$$Q_m(n+1) = Q_m(n) - \min(Q_m(n), r_m(n)T_s) + a_m(n+1) \quad (1)$$

假设用户  $m$  的子载波的集合为  $D_m^{(n)}$ , 在子载波  $k$  上频谱效率

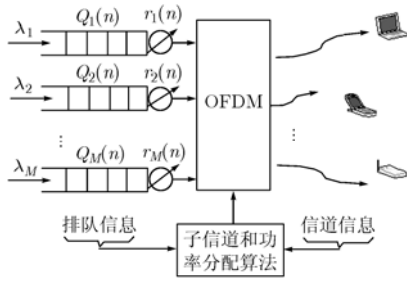


图 1 跨层自适应系统模型

为  $c_m(k, n)$ 。那么用户  $m$  传输速率为  $r_m(n) = \sum_{k \in D_m^{(n)}} c_m(k, n) \Delta f$ 。

### 3 数学描述

本文要研究的问题是：根据每个用户的信道条件和排队队列长度以及用户数据到达的规律，资源分配算法按照某种规则分配子载波和功率，以提高频谱效率，并保证每个用户的 QoS。现有的资源分配方案仅仅考虑了基站知道 CSI 的情况，没有考虑排队的情况的公平性问题。本文在资源分配过程中引入了经济学中的“效用理论”，利用相对于平均等待时间的效用函数合理分配功率、频谱等系统资源。

假定用户  $m$  的平均等待时间为  $W_m$ ，相应的效用函数为  $U_m(W_m)$ 。显然，时延越长，用户的满意度就越低，效用就越小。根据“边际效用递减”规律， $U_m(W_m)$  应满足  $\frac{\partial U_m(W_m)}{\partial W_m} < 0$ ， $\frac{\partial^2 U_m(W_m)}{\partial^2 W_m} < 0$ ，即等待时间较长的用户优先得到服务。假设用户  $m$  在  $(0, nT_s)$  内到达的总的比特数目为  $A_m(n)$ ，那么用户  $m$  的平均到达比特率  $\lambda_m$  可以定义为  $\lambda_m = \frac{1}{T_s} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{A_m(n)}{n}$ 。根据 Little 定理<sup>[6]</sup>， $nT_s$  时刻用户  $m$  的平均等待时间为

$$W_m(n) = \frac{E(Q_m(n))}{\lambda_m} \quad (2)$$

由于排队队列中的数据是否得到“服务”由基站决定，即基站决定数据被发送的速率，因此下式成立：

$$r_m(n)T_s \leq Q_m(n) \quad (3)$$

根据式(3)，式(1)可以改写为

$$Q_m(n+1) = Q_m(n) - r_m(n)T_s + a_m(n+1) \quad (4)$$

由于  $E\{a_m(n+1)\} = \lambda_m T_s$ ，那么由式(2)和式(4)可以得到  $(n+1)T_s$  时刻用户  $m$  的等待时间为

$$W_m(n+1) = W_m(n) + T_s - \frac{T_s}{\lambda_m} r_m(n) \quad (5)$$

资源优化的目标是使基于平均等待时间的总效用最大化，即

$$\max_{r_m(n), m \in \{1, 2, \dots, M\}} \sum_{m=1}^M U_m(W_m(n+1)) \quad (6)$$

利用式(5)，式(6)中的优化函数等效于下式：

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M U_m(W_m(n+1)) &= \sum_{m=1}^M \left. \frac{\partial U_m}{\partial W_m} \right|_{W_m=W_m(n)} (W_m(n+1) - W_m(n)) \\ &+ \sum_{m=1}^M U_m(W_m(n)) = \sum_{m=1}^M \left. -\frac{\partial U_m}{\partial W_m} \right|_{W_m=W_m(n)} T_s \left( \frac{r_m(n)}{\lambda_m} - 1 \right) \\ &+ \sum_{m=1}^M U_m(W_m(n)) = \sum_{m=1}^M \left. \frac{\partial U_m}{\partial W_m} \right|_{W_m=W_m(n)} T_s \left( \frac{r_m(n)}{\lambda_m} - 1 \right) \\ &+ \sum_{m=1}^M U_m(W_m(n)) \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知，优化目标函数是  $nT_s$  时刻的服务速率  $r_m(n)$  的线性函数。令  $U'_m(W_m(n)) = \left. \frac{\partial U_m(W_m)}{\partial W_m} \right|_{W_m=W_m(n)}$ ，那

么优化目标转化为  $\max \sum_{m=1}^M \frac{|U'_m(W_m(n))|}{\lambda_m} r_m(n)$ 。

由于到达速率  $\lambda_m$  是一个随机变量，基站不知道实际的到达速率，因此常常采用其估计值  $\hat{\lambda}_m$  代替。 $\hat{\lambda}_m$  可以采用时域加窗的方式进行估计。因此 OFDM 系统中资源分配问题用数学语言可以描述为

$$\max_{D_m^{(n)}, m \in A^n} \sum_{m \in A^n} \frac{|U'_m(W_m(n))|}{\hat{\lambda}_m} r_m(n) \quad (8)$$

限制条件：

- (1)  $\bigcup_{m \in A^n} D_m^{(n)} \subseteq K$ ；
- (2)  $D_m^{(n)} \cap D_j^{(n)} = \emptyset, m \neq j \forall m, j \in \{1, 2, \dots, M\}$ ；
- (3)  $r_m(n) \leq \frac{Q_m(n)}{T_s}, m \in A^n$ ；
- (4)  $r_m(n) = \sum_{k \in D_m^{(n)}} c_m(k, n) \Delta f$ ；
- (5)  $c_m(k, n) \in \{0, 1, 2, 4, 6, 8\}$ ；
- (6)  $c_m(k, n) = \log_2 \left( 1 - \frac{1.6p(k, n)\gamma_m(k, n)}{\ln(5P_{em})} \right)$ ；
- (7)  $\sum_{k=1}^K p(k, n) \leq \bar{P}$ 。

其中  $A^n = \{m : Q_m(n) > 0\}$  表示  $nT_s$  时刻排队队列非空的集合； $P_{em}$  是用户  $m$  要求的比特误码率。限制条件(2)表明每个子载波最多只能被一个用户占用，不能被多个用户共享；限制条件(5)说明本系统采用的调制方式包括 BPSK, QPSK, 16QAM, 32QAM, 64QAM 五种调制方式；限制条件(6)表明采用了 MQAM 调制方式的近似表达式，限制条件(7)表明所有子载波上的功率和应不超过总功率  $\bar{P}$ 。

### 4 基于平均等待时间最小化的自适应算法

资源优化目标式(8)涉及到子载波、功率和比特的联合分配，求最优解的过程非常复杂，计算量非常大。为降低问题的复杂度，可以利用已有的自适应分配算法<sup>[7]</sup>，将子载波、功率和比特分配分开考虑。然而限制条件(3)使得次优分配过程复杂化。本文提出了一种资源分配算法，首先假定功率在子载波间均匀分配，不考虑限制条件(3)，在所有用户中分配

子载波；然后对每个用户在其占用的子载波中进行单用户的功率和比特分配。再利用限制条件(3)对分配结果进行调整，并进一步优化用户间的功率分配。最后每个用户在其分配的子载波上利用分配的功率进行功率和比特的重新分配。

#### 4.1 子载波的初始分配

文献[3]的研究表明，最优的子载波分配应满足：

$$m(k, n) = \arg \max_{m \in A^n} \left\{ \frac{|U'_m(W_m(n))|}{\lambda_m} c_m(k, n) \right\} \quad (9)$$

其中  $m(k, n)$  表示子载波  $k$  在  $nT_s$  时刻分配给用户  $m$ 。将式(8)中的限制条件(6)代入式(9)，得到最优的子载波分配应满足：

$$m(k, n) = \arg \max_{m \in A^n} \left\{ \log_2 \left( 1 - \frac{1.6p(k, n)\gamma_m(k, n)}{\ln(5P_m)} \right)^{\frac{|U'_m(W_m(n))|}{\lambda_m}} \right\}。$$

利用函数  $\log_2(\bullet)$  的单调递增性，其等同于下式：

$$m(k, n) = \arg \max_{m \in A^n} \left( 1 - \frac{1.6p(k, n)\gamma_m(k, n)}{\ln(5P_m)} \right)^{\frac{|U'_m(W_m(n))|}{\lambda_m}} \quad (10)$$

从式(10)可知，若功率  $p(k, n)$  已知，就可以分配子载波。因此，基站在得到每个用户下行链路的 CSI 和平均信息到达率时，假定所有子载波都具有相同的发射功率，即  $p(k, n) = \bar{P}/K$ ，利用式(10)进行子载波的分配。为防止出现某些用户独占所有子载波的极端情况，可以假定每个用户占用的子载波数目和其最大传输速率成正比，即用户  $m$  分配的子载波数目为

$$N_m = \text{ceil} \left( \frac{Q_m K}{\sum_{m \in A^n} Q_m} \right), \quad m \in A^n \quad (11)$$

其中  $\text{ceil}(x)$  表示不小于变量的最小整数。“取整”是为了保证分配的子载波数目为整数。按照式(11)分配的子载波数目可保证所有用户都至少分配一个子载波，但“取整”处理可能导致所有用户需要的子载波数目之和大于子载波总数  $K$ 。可以对  $N_m$  进行排序， $N_m$  越小的用户优先挑选子载波， $N_m$  最大的用户使用剩余的子载波。由于用户的  $N_m$  最大，“牺牲”该用户选择子载波的优先权对系统资源的合理利用是最合理的。如果  $N_m$  最大的用户实际分配的子载波数目比  $N_m$  最小的用户分配的子载波数目还少，那么这时需要增大子载波数目  $K$ ，重新按照上述过程进行分配。

#### 4.2 功率和比特分配

每个用户在其分配的子载波上进行功率和比特分配的目标是使单位功率上获得的效用最大。令  $f_m(r_m(n)) = \frac{|U'_m(W_m(n))|}{\lambda_m} r_m(n)$ ，由式(8)中的限制条件(6)，用户在同一子载波上采用相邻的调制方式需要增加或减小的功率为

$$\Delta p(k, n) = \frac{\ln(5P_{em}) \times 2^{c_m(k, n)} \times (2^{\Delta c_m(k, n)} - 1)}{1.6\gamma_m(k, n)} \quad (12)$$

其中  $\Delta c_m(k, n)$  是用户  $m$  采用相邻调制方式传输的比特数目

差值。如果仅考虑低阶调制方式到高阶调制方式的转移，当  $c_m(k, n)=0$ 或 $1$  时， $\Delta c_m(k, n)=1$ ， $\Delta p(k, n) = \frac{\ln(5P_{em}) \times 2^{c_m(k, n)}}{1.6\gamma_m(k, n)}$ ；

当  $c_m(k, n) = 2, 4$ 或 $6$  时， $\Delta c_m(k, n) = 2$ ， $\Delta p(k, n) = \frac{\ln(5P_{em}) \times 2^{c_m(k, n)} \times 3}{1.6\gamma_m(k, n)}$ 。设用户  $m \in A^n$  分配的总功率为  $P_m$ ，

详细的功率和比特分配算法如下：

(1)初始化参数：对所有的用户  $m \in A^n$ ， $r_m(n) = 0$ ， $P_m = (\bar{P}/K) \cdot \text{len}(D_m^{(n)})$ ， $c_m(k, n) = 0$ ， $p(k, n) = 0$ ， $P_m^{\text{all}} = 0$ ；其中  $k \in D_m^{(n)}$ ， $\text{len}(D_m^{(n)})$  表示用户  $m$  得到的子载波数目，即集合  $D_m^{(n)}$  包含的子载波的数目。

(2)对于每一个用户  $m \in A^n$ ，对于其分配的子载波  $k \in D_m^{(n)}$ ，执行如下过程：

(a)根据式(12)计算  $\Delta p(k, n)$ ；如果  $P_m^{\text{all}} + \Delta p(k, n) > P_m$ ，那么  $\Delta p(k, n) = \infty$ ；

(b)计算  $\Delta f_m(k, n) = f_m(r_m(n) + \Delta c_m(k, n)) - f_m(r_m(n))$ ； $k' = \arg \max_{k \in D_m^{(n)}} \left( \frac{\Delta f_m(k, n)}{\Delta P(k, n)} \right)$ ；

(c)如果  $P_m^{\text{all}} + \Delta p(k', n) \leq P_m$ ，并且  $r_m(n) + \Delta c(k', n) \leq \frac{Q_m(n)}{T_s}$ ，那么更新用户  $m$  的比特和功率分配，即  $c(k', n) = c(k', n) + \Delta c(k', n)$ ， $r_m(n) = r_m(n) + \Delta c(k', n)$ ， $p(k', n) = p(k', n) + \Delta p(k', n)$ ；否则，用户  $m$  的比特和功率分配已经完成，退出循环。这时存在3种情况：第1种是如果  $P_m^{\text{all}} + \Delta p(k', n) > P_m$ ，而  $r_m(n) + \Delta c(k', n) \leq \frac{Q_m(n)}{T_s}$ ，那么用户还

有数据等待传输，但分配的功率资源已经用完，如果给用户  $m$  分配更多的功率，可以进一步提高用户  $m$  的传输速率；第2种是如果  $P_m^{\text{all}} + \Delta p(k', n) \leq P_m$ ，而  $r_m(n) + \Delta c(k', n) > \frac{Q_m(n)}{T_s}$ ，那么用户  $m$  的传输速率已经达到了式(8)中限制条

件(3)的要求，该用户的比特和功率已经达到最优，该用户“节余”的功率可以分配给其它用户使用；第3种是如果  $P_m^{\text{all}} + \Delta p(k', n) > P_m$ ，而且  $r_m(n) + \Delta c(k', n) > \frac{Q_m(n)}{T_s}$ ，那么用户  $m$  的功率和比特分配已经达到最优，但也“节余”少部分功率可供其它用户使用。

(d)重复(a)~(c)，直到所有的用户都完成了比特和功率分配。

#### 4.3 剩余功率的分配

在前面的分配过程中，基站可以将第2，第3种情况的用户“节余”的功率分配给第1种情况的用户，以进一步提高其传输速率。设第1种情况的用户集合为  $A_1$ ，剩余的功率为  $\Delta P = \bar{P} - \sum_{k=1}^K p(k, n)$ ，那么剩余的功率可以按照下面的方式进行分配：

(1)对所有的用户  $m \in A_1$ ，根据式(12)计算  $\Delta p(k, n)$ ，

$k \in D_m^{(n)}$ ; 如果  $\Delta p(k, n) > \Delta P$ , 那么  $\Delta p(k, n) = \infty$ ;

(2) 计算  $\Delta f_m(k, n) = f_m(r_m(n) + \Delta c_m(k, n)) - f_m(r_m(n))$ ;

$$(m', k') = \arg \max_{m \in A_i, k \in D_m^{(n)}} \left\{ \frac{\Delta f_m(k, n)}{\Delta P(k, n)} \right\};$$

(3) 如果  $\Delta p(k', n) \leq \Delta P$ , 并且  $r_{m'}(n) + \Delta c(k', n) \leq \frac{Q_{m'}(n)}{T_s}$ , 那么更新用户  $m'$  的比特和功率分配, 即  $c(k', n)$

$$= c(k', n) + \Delta c(k', n), r_{m'}(n) = r_{m'}(n) + \Delta c(k', n), p(k', n) = p(k', n) + \Delta p(k', n), \Delta P = \Delta P - \Delta p(k', n);$$

如果  $\Delta p(k', n) \leq \Delta P$ , 而  $r_{m'}(n) + \Delta c(k', n) > \frac{Q_{m'}(n)}{T_s}$ , 那么用户  $m'$  的传输

速率限制已经得到满足, 这时执行  $A_1 = A_1 - \{m'\}$  后转入步骤(4); 如果  $\Delta p(k', n) > \Delta P$ , 那么剩余的功率已经分配完毕, 因此所有用户都完成了功率和比特分配, 退出循环。

(4) 重复(1)~(3), 直到  $A_1 = \phi$ 。

### 5 仿真分析

假设系统中共有 20 个用户, 每个用户都经历多径 Rayleigh 衰落, 其时延分布满足 ITU-R M.1225 中信道 B 的要求。每个用户与基站之间的距离不同, 路径损耗也不相同, 因此可以达到的传输速率也不相同。每个用户的最大 Doppler 频移为 10Hz。OFDM 共有 128 个子载波, 总带宽为 1.920MHz, 子载波间隔为 15kHz。每个用户要求的 BER 均为  $10^{-6}$ , 每个用户都采用相同的效用函数  $|U_i'(W)| = W_i$ 。数据流的到达方式服从 Poisson 分布,  $T_s$  取 4ms, 仿真时间长度为 300,000 个时隙。

图 2, 图 3, 图 4 分别显示了基站采用不同资源分配算法的条件下信道条件最差的用户、信道条件最好的用户和所用用户的平均时延性能。作为对比, 图中还仿真了 PF, M-LWDF, EXP 的性能, 这 3 种算法在资源分配过程中都没有考虑信道排队状态, 其中 PF 算法不需要具体的 QoS 保证, 比较适合“尽力而为”的数据通信; M-LWDF 和 EXP 算法只是权重不同, 都是使吞吐量达到最优, 适用于对时延敏感的信息传输。

从图 2~图 4 可以看出: (1) 在相同时延条件下, 对信道条件最差的用户来说, PF 算法的时延性能最差, EXP 算法的时延性能次之, 而本文提出的算法略好于 LWDF 算法。例如, 在时延为 1000ms 时, 采用 PF, EXP 和 LWDF 算法的用户的传输速率分别为 161kbps, 171kbps 和 196kbps, 而采用本文算法后用户的传输速率提高到 200kbps。(2) 当到达

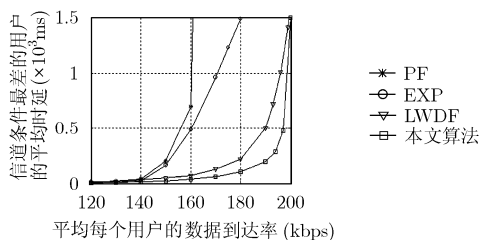


图 2 不同资源分配方式下信道条件最差用户的时延性能

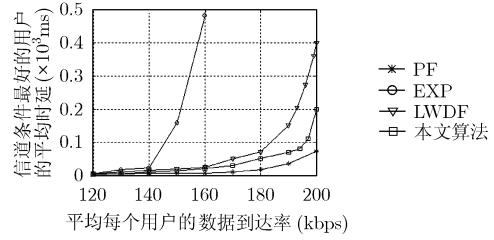


图 3 不同资源分配方式下信道条件最好用户的时延性能

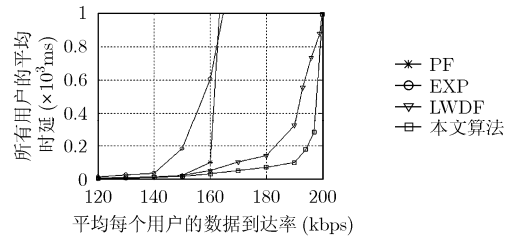


图 4 不同资源分配方式下所有用户的平均时延性能

速率大于 160kbps 时, PF 算法引起的时延非常大, 可能导致系统不稳定, 而本文算法稳定, 适合对时延敏感的通信系统中。(3) 因为对比图 2 和图 3 可以发现, 在系统负载较大时, 信道条件最差的用户平均时延较大, 而信道条件最好的用户平均时延较小。因此 LWDF, EXP 和本文算法都能够保证时延的公平性, 而 PF 算法不能保证时延公平性。

### 6 结束语

跨层自适应问题是当前研究的热点。本文借用“效用理论”来解决 MIMO OFDM 系统中的跨层自适应问题, 提出了一种将平均等待时间作为优化权重的自适应资源调度算法, 而且在子载波分配过程中考虑每个用户的 QoS 要求和传输速率的要求。仿真结果表明该算法能更有效地分配系统资源, 其时延性能远超 PF 算法和 EXP 算法, 非常适合对时延敏感的通信, 具有很强的理论和实际意义。

### 参考文献

- [1] Akyildiz I, Altunbasak Y, Fekri F, and Sivakumar R. AdaptNet: An adaptive protocol suite for the next generation wireless Internet[J]. *IEEE Commun. Magazine*, 2004, 42(3): 128-136.
- [2] Shakkottai S, Rappaport T S, and Karlsson P C. Cross-layer design for wireless networks[J]. *IEEE Commun. Magazine*, 2003, 41(10): 74-80.
- [3] Song G, Li Y G, Cimini L J, and Zheng H. Joint channel-aware and queue-aware data scheduling in multiple shared wireless channels[C]. In Proc., IEEE Wireless Commun. Networking Conf., Atlanta, USA, March 2004: 1939-1944.
- [4] Song G and Li Y G. Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-Part I: Theoretical framework[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005, 4(2): 614-624.

- [5] Song G and Li Y G. Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-Part II: Algorithm development[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005, 4(2): 625-634.
- [6] 唐岚, 王树勋, 梁应敞. 多入多出(MIMO)系统中的可变速率多用户分集技术[J]. *科学技术与工程*, 2004, 4(4): 275-281  
Tang Lan, Wang Shu-xun, and Liang Ying-chang. Variable-rate multiuser diversity in MIMO system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2004, 4(4): 275-281
- [7] 张文强, 周志杰, 郑翔. 一种 MIMO OFDM 系统中的自适应比特和功率分配算法[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(4): 340-343.  
Zhang Wen-qiang, Zhou Zhi-jie, and Zheng Xiang. Adaptive bit and power allocation algorithm for MIMO OFDM System[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(4): 340-343.
- 惠毅: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为通信信号处理.  
周志杰: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 主要研究语音压缩编码、自适应技术、网络管理等.  
张文强: 男, 1977年生, 讲师, 研究方向为 MIMO OFDM、自适应技术、纠错编码等.