

# 抗时延敏感性跨层自适应资源分配方案\*

彭 丽, 江铭炎

(山东大学 信息科学与工程学院, 济南 250100)

**摘要:** 为了对抗多用户 OFDM 系统中用户实时业务对时延的敏感性, 提出一种利用 Hopfield 神经网络(HNN) 算法的跨层自适应资源分配方案。该方案设置用户调度优先级时同时考虑物理层的信道状态信息, 及媒体接入层的用户队列状态信息和等待时间等; 采用 HNN 算法, 最大化系统容量的同时降低了平均时延和丢包率。仿真结果表明, 相比于传统资源分配方案, 该方案可以有效保障用户的服务质量, 并提高了系统的整体性能。

**关键词:** 跨层; 正交频分复用系统; 多用户调度; Hopfield 神经网络; 时延; 服务质量

**中图分类号:** TN929.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2010)03-1122-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.03.087

## Adaptive cross-layer resource allocation scheme resisting delay sensibility

PENG Li, JIANG Ming-yan

(School of Information Science & Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

**Abstract:** In order to resist delay sensibility of real-time services, this paper proposed an adaptive cross-layer resource allocation scheme employing Hopfield neural networks (HNN) algorithm in multi-user OFDM system. In setting of the user scheduling priority, this paper considered not only the channel state information (CSI) at the physical layer, but also users' queue state information and waiting time at media access control (MAC) layer. By the HNN algorithm, the proposed scheme decreased the average delay and packet loss ratio, and maximizing the system capacity. Numerical results show that the scheme can efficiently guarantee the quality of service (QoS) requirements and improve the system performance compared with traditional schemes.

**Key words:** cross-layer; OFDM system; multi-user scheduling; Hopfield neural networks; delay; QoS

## 0 引言

在后三代(B3G)无线通信系统中, OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)技术由于能够有效对抗多径信道引起的频率选择性衰落而备受关注。近年来, 多用户 OFDM 系统的无线资源管理成为人们研究的一个热点。研究多用户 OFDM 系统中的资源分配问题时, 文献[1,2]简单地将子载波分配给瞬时信道增益最大的用户, 忽略了用户的其他要求; 文献[3]则提出了一种应用拉格朗日算子的迭代搜索算法, 但复杂度较大、实用性较低。后来许多低复杂度的资源分配方案相继出现<sup>[4,5]</sup>。然而随着许多高速无线实时业务如音频、视频流等的出现, 系统要求满足一定数据传输率的同时需保证大部分业务包的传输时延在要求的阈值之内。针对这种情况, 传统的资源分配方案已不能满足要求。因为它们大都只从物理层的角度考虑问题, 而忽略了 MAC 层的业务数据到达特性、队列状态信息、用户时延要求等因素, 这种体系结构的次优性和非灵活性, 使得系统无法灵活地适应无线移动环境的变化, 并导致无线频谱资源无法得到有效利用。

针对这种情况, 人们开始研究多用户 OFDM 系统中的跨层资源分配问题。文献[6]针对多用户 OFDM 系统提出了一种跨层资源分配方案, 但良好性能的取得是以各用户具有相同且较高的接收信噪比为前提。文献[7]也提出了一种跨层方

案, 但其基于注水算法, 复杂度高、实用性不强。文献[8]虽未考虑跨层设计, 但解决动态资源分配问题时采用了 HNN 算法, 与传统算法相比, 降低了计算复杂度, 提高了系统性能。HNN 是一种反馈、二值输出、全连接型网络。连续型神经网络状态的演变过程是一个非线性动力学系统, 可以用一组非线性微分方程来描述, 神经元输出的稳定值即为优化问题的解。在满足一定约束条件下, “能量函数”的能量在网络运行过程中不断减小, 最终趋于稳定的平衡状态。HNN 算法在资源分配中的优良表现, 继其成功解决旅行商问题<sup>[9]</sup>, 又一次证明了 HNN 算法的并行处理方式, 使其计算量不随维数的增加而发生指数性“爆炸”, 因而对解决优化问题时的高速计算特别有效。

针对用户实时业务对时延有较强的敏感性这一问题, 本文在多用户 OFDM 下行链路中, 提出了一种基于物理层和 MAC 层的跨层自适应资源分配方案, 以有效抵抗实时业务对时延的敏感性。该方案采用 HNN 算法, 分别考虑物理层的信道状态信息和功率限制, 以及 MAC 层的业务数据到达特性、队列状态信息、用户时延要求等。其实现包括以下两部分:

a) MAC 层用户业务调度算法。根据用户业务等待时间和信道质量, 设置并动态调整每个用户针对每个子载波的优先级, 为下一步的资源分配提供调度次序。

b) 物理层自适应子载波、功率联合分配算法。采用 HNN 算法建立并解决一个跨层优化问题, 即在满足系统总功率、用

收稿日期: 2009-07-30; 修回日期: 2009-09-02      基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60672037)

作者简介: 彭丽(1984-), 女, 山东滨州人, 硕士研究生, 主要研究方向为通信理论及人工智能(lanjiguang2003@163.com); 江铭炎(1964-), 男, 江苏苏州人, 教授, 博士后, 主要研究方向为通信理论及信息处理技术。

户传输速率和误比特率要求的前提下,最大化系统容量,降低平均时延和丢包率。这样,使得调度算法和资源分配算法通过跨层设计紧密结合以至融为一体。

### 1 系统模型

图1为跨层自适应资源调度的多用户 OFDM 下行链路基站模型。

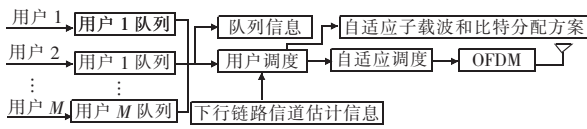


图1 跨层自适应系统基站模型

系统带宽为  $B_w$ , 总功率为  $P_{total}$ , 子载波总数为  $K$ , 系统内处于激活期的用户数为  $M$ , OFDM 符号周期为  $T_s$ 。假设各移动台能够获得完美的下行链路 CSI, 并能够通过无差错的反馈信道将 CSI 及时地汇报给基站。用户  $m$  在第  $k$  个子信道的瞬时信道增益为  $h_{m,k}$ , 由下式得到:

$$h_{m,k} = \sum_{l=1}^L h_{m,l} \exp(-j2\pi kl/K); k=1,2,\dots,K \quad (1)$$

其中:  $h_{m,l} (l=0,1,\dots,L)$  为用户  $m$  多径信道抽头延迟模型中的第  $l$  条抽头系数。

为了对网络层进行详细刻画和描述,假设每个用户的业务数据到达各自缓存区服从到达率为  $\lambda_m$  的独立泊松过程。考虑第  $n$  个时隙,即时间段  $[nT_s, (n+1)T_s]$ 。用户  $m$  在  $nT_s$  时刻从基站发送出的数据量为  $r_m(n)$ , 即为用户  $m$  所传输业务的服务率。用户  $m$  在第  $(n-1)$  个时隙内到达的数据量为  $a_m(n)$ 。由泊松分布的定义可知:

$$P(\text{时间间隔 } T_s \text{ 内到达 } a_m) = \frac{(\lambda_m T_s)^{a_m} e^{-\lambda_m T_s}}{a_m!} \quad (2)$$

泊松过程具有平稳性,即在时间段  $T_s$  内恰好到达  $a_m$  的概率仅与时间段长度有关,而与时间段的起止时刻无关,故  $a_m(n) = a_m = \lambda_m T_s$ 。令  $Q_m(n)$  为  $nT_s$  时刻用户  $m$  的队列长度,则

$$Q_m(n+1) = Q_m(n) + a_m(n+1) - r_m(n) \quad (3)$$

又由排队论中的 Little 定理<sup>[10]</sup>:

$$N = \lambda T \quad (4)$$

其中:  $N$  为系统中的平均分组数量;  $T$  为一个分组在系统中消耗的平均时间;  $\lambda$  为分组进入系统的到达率(可以服从任意分布)。得到  $nT_s$  时刻用户  $m$  的平均等待时间  $W_m(n)$  为

$$W_m(n) = \frac{E(Q_m(n))}{\lambda_m} \quad (5)$$

进而得到  $(n+1)T_s$  时刻用户  $m$  的等待时间为

$$W_m(n+1) = W_m(n) + T_s - \frac{r_m(n)}{\lambda_m} \quad (6)$$

用户等待时间  $W_m$  是本文所提方案中一个保证用户时延要求的重要指标。

### 2 跨层自适应资源分配方案

#### 2.1 MAC 层用户业务调度

对于时延敏感性较高,即具有较强时延约束的用户数据包,用户 QoS 不仅仅包括传统 QoS 中的传输率、误比特率等因素,还时常以时延、丢包率等来衡量。调度用户时,如果可以保证尽量减小用户数据的等待时延,则可以达到降低用户丢包率的目的,进而提高用户的整体满意度。

本文在调度时综合考虑两方面:一是 MAC 层的业务时延特性,即用户数据业务的等待时间越长,其被调度的优先级越高;二是物理层的信道质量,即用户的信道质量越好,该用户的数据业务将越先被发送。引入调度因子  $I_{m,k}$  来表征针对子载波  $k$  各用户的调度优先级,如下式所示:

$$I_{m,k} = \alpha |\tilde{h}_{m,k}|^2 + \beta \tilde{W}_m \quad (7)$$

其中:  $\tilde{h}_{m,k}$  和  $\tilde{W}_m$  均在  $[0,1]$  内取值,分别为用户  $m$  归一化后的信道增益  $h_{m,k}$  和等待时间  $W_m$ ;  $\alpha$  和  $\beta$  表示信道信息和时延在用户调度中起作用的大小程度,分别称为信道因子和时延因子,在  $[0,1]$  内取值且满足  $\alpha + \beta = 1$ 。本文所提方案中,取  $\alpha = \beta = 1/2$ , 用户信道质量与等待时延同等程度动态地决定用户的调度优先级,这样在业务数据对时延非常敏感的情况下仍然能确保较高的系统吞吐量。如果为了达到某个系统的特定目的,在系统吞吐量和时延敏感度两者之间有所偏向,则可以适当将偏向方的因子设置得高一些。而传统的调度方案往往仅考虑信道和时延中的一方,通过将  $\alpha$  和  $\beta$  其中之一置零即可:当  $\alpha = 0, \beta = 1$  时,只根据用户业务的等待时间来分配子载波,即等待时间长的用户将先得到调度;当  $\alpha = 1, \beta = 0$  时,用户优先级只取决于各用户的信道质量,即传统的最大容量调度方案,以牺牲公平性为代价达到系统最大吞吐量。

#### 2.2 物理层动态自适应资源分配目标的确定

MAC 层的用户调度次序最大限度地满足了各用户的时延要求。物理层根据 MAC 层产生的用户调度次序,采用一定的分配方案进行动态自适应资源分配。当系统性能优化的准则不同时,采用的分配方案也将不同。这里以系统吞吐量最大化为优化目标,资源分配的目标函数为

$$R = \max \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K x_{m,k} c_{m,k} \quad (8)$$

其中:  $c_{m,k}$  为用户  $m$  分配到子载波  $k$  上的比特数,  $c_{max}$  为一个 M-QAM 符号所携带的最大比特数,  $c_{m,k} \in \{1, 2, \dots, c_{max}\}$ 。因为在每个 OFDM 符号期间,一个子载波只能被一个用户占用,所以若  $c_{m,k} \neq 0$ , 则对任意  $m' \neq m, m' \in \{1, 2, \dots, M\}$ , 有  $c_{m',k} = 0$ 。  $x_{m,k}$  表示用户  $m$  分得子载波  $k$ , 即

$$x_{m,k} = \begin{cases} 0 & \text{若 } c_{m,k} = 0 \\ 1 & \text{若 } c_{m,k} \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

由香农公式得到:

$$c_{m,k} = \frac{B_w}{K} \log_2 \left( 1 + \frac{|h_{m,k}|^2 P_{m,k}}{\Gamma N_0 B_w / K} \right) \quad (10)$$

其中:  $N_0$  为 AWGN 信道的单边功率谱密度,  $\Gamma$  是与业务数据目标误比特率  $p_e$  有关的常数,当系统采用 M-QAM 调制时,  $\Gamma = -\ln(5 \times p_e) / 1.5$ 。

对于给定的用户传输质量 QoS(本文采用误比特率  $p_e$  衡量),在 M-QAM 调制方式下,一个 OFDM 符号内接收端正确解码  $c$  个比特所需要的最小信号功率为<sup>[11]</sup>

$$p(c) = N_0 / 3 [Q^{-1}(p_e/4)]^2 (2^c - 1) \quad (11)$$

其中  $Q$  函数为

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt \quad (12)$$

将式(11)简记为

$$p(c) = \xi(2^c - 1) \quad (13)$$

于是得到本文资源分配优化目标函数的详细表达式为

$$R = \max \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \frac{B_w}{K} \log_2 \left( 1 + \frac{|h_{m,k}|^2 \xi(2^c - 1)}{\Gamma N_0 B_w / K} \right) \quad (14)$$

约束条件如下:

$$1 = \sum_{m=1}^M x_{m,k}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (14a)$$

$$K = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K x_{m,k} \quad (14b)$$

$$P_{total} \geq \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K P_{m,k} \quad (14c)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{m,k} c_{m,k} = (k_m/K)R \quad (14d)$$

其中:式(14a)表示每个子载波只能被一个用户占用;(14b)表示没有空闲子载波;(14c)表示满足系统总功率要求;(14d)说明用户传输速率由时延和信道质量共同决定; $k_m$ 表示每个用户分得的子载波数。

### 2.3 采用 HNN 的跨层方案算法流程

下面采用 HNN 算法来对本文所提跨层方案进行具体实现。

首先对各用户进行子载波分配,即求取子载波分配矩阵  $X_{MK}$ ,其元素  $x_{m,k}$ 表示子载波  $k$  分配给了用户  $m$ 。下面给出具体算法流程:

- a) 初始化,令  $X_{MK} = \emptyset$ ;
- b) 对所有子载波,计算每个用户的调度因子  $I_{m,k} = \alpha |h_{m,k}|^2 + \beta \tilde{W}_m$ ;
- c) 对子载波  $k$ ,计算  $m = \arg \max_{m=1, \dots, M} I_{m,k}$ ;
- d) 令  $x_{m,k} = 1$ ;
- e) 更新  $I_{m,k}$ ;
- f) 重复步骤 b) ~ e),直到所有子载波分配完毕。

求得  $X_{MK}$ 后,再分别对每个用户在各自分得的子载波上进行自适应比特和功率分配,即求取比特加载矩阵  $C_{MK}$ 。这里采用五种 M-QAM 调制方式: {16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM}, 每个子载波在一个 OFDM 符号内发送的比特数为  $\log_2 M$ 。由于神经元的输出只能是二值序列,不能直接输出  $C_{MK}$ ,于是引入两个新的中间矩阵,将  $C_{MK}$ 用三个矩阵联合表示,使神经元输出其中一个二值中间矩阵,进而最终求得  $C_{MK}$ 。下面给出具体算法流程:

a) 构造中间矩阵  $V_{KJ}$ 和  $L_{J \times 1}$ ,其元素  $v_{k,j}$ (神经元的二值输出)和  $l_{j,1}$ 分别表示子载波  $k$  选择第  $j$  种调制方式,第  $j$  种调制方式可传输的最大比特数, $J$ 为调制方式的种类数;

- b) 计算  $A_{1 \times K} = [V_{KJ} \times L_{J \times 1}]^T$ ;
- c) 将矩阵  $A_{1 \times K}$ 扩展为  $M$ 行,得到矩阵  $B_{MK}$ ;
- d) 最终得到  $C_{MK} = X_{MK} \times B_{MK}$ 。

根据上述流程,式(14)变为以下形式:

$$R = \max \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K x_{m,k} \frac{B_W}{K} \log_2 \left( 1 + \frac{|h_{m,k}|^2 \xi (2^{x_{m,k}} - 1)}{\Gamma N_0 B_W / K} \right) \quad (15)$$

新增约束条件:

$$[\underbrace{11 \dots 1}_{K \text{个}}]^T = \sum_{j=1}^J v_{k,j}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (15a)$$

$$K = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K v_{k,j} \quad (15b)$$

其中:式(15a)表示每个子载波只能选择一种调制方式;(15b)表示每个子载波都参与比特分配。

HNN 能量函数为

$$E = \max -A_1 \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K x_{m,k} c_{m,k} - \frac{A_2}{2} \sum_{k=1}^K (\sum_{j=1}^J v_{k,j} - 1)^2 - \frac{A_3}{2} (\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J v_{k,j} - N)^2 - \frac{A_4}{2} (\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \frac{\xi x_{m,k} (2^{x_{m,k}} - 1)}{|h_{m,k}|^2} - P_{total})^2 - \frac{A_5}{2} (\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \frac{\xi x_{m,k} (2^{x_{m,k}} - 1)}{|h_{m,k}|^2} - \frac{k_m P_{total}}{K})^2 \quad (16)$$

HNN 动态方程为:

$$\begin{cases} \frac{dU_{k,j}}{dt} = A_1 \left( \sum_{m=1}^M x_{m,k} \frac{B_W}{K} \frac{|h_{m,k}|^2 \xi 2^{x_{m,k}}}{\Gamma N_0 \frac{B_W}{K} + |h_{m,k}|^2 \xi (2^{x_{m,k}} - 1)} \right) + \\ A_2 \left( \sum_{j=1}^J v_{k,j} - 1 \right) + A_3 \left( \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J v_{k,j} - N \right) + \\ A_4 \left( \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \frac{\xi (2^{x_{m,k}} - 1) x_{m,k} l_{m,k}}{|h_{m,k}|^2} - P_{total} \right) + \\ A_5 \left( \sum_{k=1}^K \frac{\xi x_{m,k} (2^{x_{m,k}} - 1) x_{m,k} l_{m,k}}{|h_{m,k}|^2} - \frac{k_m P_{total}}{K} \right) \\ V_{k,j} = g(U_{k,j}) = \frac{1}{2} [1 + \tanh(U_{k,j}/U_0)] \end{cases} \quad (17)$$

其中: $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ 均为经验给出值,神经元的激励函数  $g(\cdot)$ 取近似于 S 型的双曲正切函数,其中  $\partial E / \partial U_k = dU_k / dt$ 。式(16)和(17)确定了解决动态自适应比特和功率分配的 HNN,由网络的初始状态  $U_0$  出发,经过网络的运动方程不断进行迭代,得到网络的输出矩阵  $V_{KJ}$ ,进而得到最终的比特加载矩阵  $C_{MK}$ 。

### 3 性能仿真

在仿真中,本文考虑一个带宽为 1 MHz,总功率  $P_{total} = 1$ ,子载波数为 1 024 的多用户 OFDM 下行链路。信道采用六径 Clarke 平坦衰落模型<sup>[12]</sup>。每个用户的业务数据到达率  $\lambda_m$  在 5 ~ 30 kbps 随机取值,  $T_s$  取 2 ms。AWGN 信道的功率谱密度  $N_0 = 10^{-8}$ ,目标误比特率  $p_e = 10^{-6}$ 。神经网络参数设定: $A_1 = 100, A_2 = 500, A_3 = 50, A_4 = 10, A_5 = 10$ ,神经元斜率为 0.02,计算步长为 0.001,迭代次数为 2 000。

为了更好地体现本文所提方案(方案 1)的优越性,本文将方案 1 中的信道因子和时延因子进行重新配置,形成两种传统调度方案(而优化时仍然采用 HNN 算法):

方案 2  $\alpha = 0, \beta = 1$  即  $I_{m,k} = \tilde{W}_m$ ,调度用户时仅考虑用户时延。

方案 3  $\alpha = 1, \beta = 0$ ,即  $I_{m,k} = |h_{m,k}|^2$ ,调度用户时仅考虑信道质量。

为了突出方案 1 中 HNN 解决优化问题的能力,本文还仿真了文献[2]中的资源分配方案,该方案(方案 4)在分配子载波时同方案 2 都仅考虑用户的信道状态信息,而未考虑用户数据队列状态及时延等,但与方案 2 不同的是,方案 4 未使用 HNN 算法。

图 2 比较了四种方案在不同用户数下的归一化系统吞吐量。如图 2 所示,本文提出的方案 1 吞吐量性能要优于方案 2,但劣于方案 3。这是因为方案 3 保证具有最好信道质量的用户获得最高的优先级,用户信道质量越好,其数据越先被发送;方案 2 仅考虑用户业务数据对时延的敏感度,越敏感的用户获得的优先级越高,但却忽略了信道质量;而方案 1 同等程度地考虑信道质量与时延,所以性能介于前两者之间。而方案 4 虽然只考虑信道质量,但它是一种采用循环搜索迭代的优化方法,故性能不及方案 1。

图 3 比较了四种方案在不同用户数下的平均丢包率性能。如图所示,四种方案的丢包率在用户数不大于 20 时均非常低。随着用户数的继续增大,方案 3 和 4 的丢包率急剧上升,这是因为它们以大系统容量为目的而忽略了用户数据对时延的敏感性,使得较多的数据被丢弃;方案 2 仅考虑用户时延,等待时

间越长的数据越先被发送,但由于它未考虑用户信道质量,某些高质量的信道被闲置,使得最终的数据正确接收率不高,从而增大了丢包率;而方案 1 很好地统筹了时延和信道信息之间的关系,在获得较大系统容量的同时,在用户数较大时仍然能够保持较低的平均丢包率。

图 4 比较了四种方案在不同的用户平均数据到达率下的平均时延。如图所示,四种方案下的平均时延均随着数据到达率的升高而增大。本文所提方案 1 随着数据到达率的升高,保持了较为稳定的平均时延;方案 2 之所以能取得较好的时延特性,是因为它以高丢包率和低系统容量为代价;方案 3 和 4 由于未考虑用户时延限制,当数据到达率大于 17 kbps 时,平均时延非常大,这将导致系统稳定性降低。

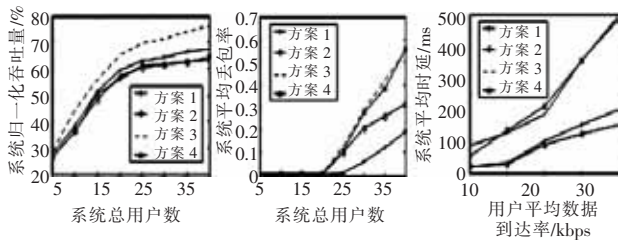


图 2 不同方案下归一化系统吞吐量比较    图 3 不同方案下平均丢包率比较    图 4 不同方案下平均时延比较

由以上仿真实验可以看出,本文提出的方案 1 整体性能优于其他方案。

#### 4 结束语

在现代通信中,随着许多高速无线实时业务的出现,通信系统对用户实时业务的传输时延提出了越来越高的要求。针对实时业务对传输时延的敏感性,本文在多用户 OFDM 下行链路中,提出了一种新的跨层自适应资源分配方案。该方案将用户时延信息作为一个重要的因素,与无线信道信息一并考虑来设置用户的调度优先级,避免了用户业务数据的等待时间过长,从而降低了平均时延。在对无线资源进行自适应分配时,采用了具有并行处理能力强、收敛速度快、易收敛到最优解等优点的 HNN 算法,提高了系统的整体性能。仿真结果显示,本文所提方案充分抵抗了用户实时业务对时延的敏感性,保证系统高容量的同时降低了平均丢包率和时延。这对于研究时

延敏感度高实时通信,具有一定的理论和实际意义。

#### 参考文献:

- [1] BAKHTIARI E, KHALAJ B H. A new joint power and subcarrier allocation scheme for multiuser OFDM systems [C]//Proc of the 14th Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2003: 1959-1963.
- [2] YIN H, LIU H. An efficient multiuser loading algorithm for OFDM-based broadband wireless systems [C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. 2000: 103-107.
- [3] WONG C, CHENG R, LETAIEF K, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [4] JANG J, LEE K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM system [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(2): 171-178.
- [5] KIVANC D, LI G, LIU H. Computationally efficient bandwidth allocation and power control for OFDMA [J]. IEEE Trans on Communications, 2005, 53(1): 107-116.
- [6] JEONG S S, JEONG D G, JEON W S. Cross-layer design of packet scheduling and resource allocation in OFDMA wireless multimedia networks [C]//Proc of IEEE Vehicular Technology Conference. 2006: 309-313.
- [7] KEMAL K, JOSEPH H K, MURALI K, et al. Cross-layer optimization for OFDMA-based wireless mesh backhaul networks [C]//Proc of Wireless Communication and Networking Conference. 2007: 276-281.
- [8] DANIEL C, JOSE F M, DAVID G B, et al. A delay-centric dynamic resource allocation algorithm for wireless communication systems based on HNN [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2008, 57(6): 3653-3665.
- [9] MA R N, CHU P, ZHANG S R. Stability condition for discrete delayed Hopfield neural networks [J]. IEEE Natural Computation, 2007, 1: 468-472.
- [10] TAKAGI H. Queueing analysis: a foundation of performance evaluation vol. 3; discrete-time systems [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1993.
- [11] LOVE D J, HEATH Jr R W. OFDM power loading using limited feedback [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2005, 54(5): 1773-1780.
- [12] SHEN Z K, JEFFREY G A, BRIAN L E. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints [J]. IEEE Trans on Communications, 2005, 4(6): 2726-2737.
- [13] COHEN E, SHENKER S. Replication strategies in unstructured peer-to-peer networks [C]//Proc of ACM SIGCOMM. 2002.
- [14] LAN J, LIU X, SHENOY P, et al. Consistency maintenance in peer-to-peer file sharing networks [C]//Proc of the 3rd IEEE Workshop on Internet Applications. 2003.
- [15] DATTA A, HAUSWIRTH M, ABERER K. Updates in highly unreliable, replicated peer-to-peer systems [C]//Proc of the 23rd IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. 2003.
- [16] WANG Z, DAS S K, KUMAR M, et al. Update propagation through replica chain in decentralized and unstructured P2P systems [C]//Proc of the 4th International Conference on Peer-to-Peer Computing. 2004.
- [17] CHEN X, REN S, WANG H, et al. SCOPE: scalable consistency maintenance in structured P2P systems [C]//Proc of IEEE INFOCOM'05. 2005.
- [18] BIRMAN K P, HAYDEN M, OZKASAP O, et al. Bimodal multicast [J]. ACM Trans on Computer Systems, 1999, 17(2): 41-88.
- [19] ROUSSOPOULOS M, BAKER M. CUP: controlled update propagation in peer-to-peer networks [C]//Proc of USENIX Annual Technical Conference. 2003.
- [20] 李振宇, 谢高岗, 李忠诚. PATCOM: 基于分割树的无结构 P2P 系统一致性维护方法 [J]. 计算机学报, 2007, 30(9): 1500-1510.
- [21] SAROUI S, GUMMADI P K, GRIBBLE S D. A measurement study of peer-to-peer file sharing systems [C]//Proc of Multimedia Computing and Networking. 2002.
- [22] GUMMADI K P, DUNN R J, SAROIU S, et al. Measurement, modeling, and analysis of a peer-to-peer file-sharing workload [C]//Proc of the 19th ACM Symposium on Operating Systems Principles. New York: ACM Press, 2003: 314-329.
- [23] BRITE [EB/OL]. [2008-09-11]. <http://www.cs.bu.edu/brite/>.
- [24] EUGSTER P T, GUERRAOU R. Probabilistic multicast [C]//Proc of International Conference on Dependable Systems and Networks. 2002.
- [25] YU H, VAHDAT A. Consistent and automatic replica regeneration [J]. ACM Trans on Storage, 2004, 1(1): 3-37.

(上接第 1113 页)