

一种跨层的 OFDMA 系统调度和资源分配算法

郝丹丹¹, 李永华², 张瀚峰², 邹仕洪¹, 程时端¹

(1. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876; 2. 北京邮电大学信息学院, 北京 100876)

摘 要: 针对 OFDMA 系统下行链路资源分配和调度问题, 提出了一种基于跨层设计的时频二维分配算法 (CLSA), 在资源分配同时考虑用户物理信道状态信息以及 MAC 和数据链路层的用户速率要求、延时要求、分组差错率要求等 QoS 需求, 以提高系统吞吐性能以及中断率性能做为算法的设计目标. 通过大量的仿真实验验证算法的性能, 并与现有的经典算法 (OFDMA 系统中的 MPF 算法和 M-LWDF 算法) 性能进行了对比分析. 仿真实验结果表明, CLSA 算法在系统有效吞吐性能和中断率性能方面有较好表现.

关键词: 正交频分多址; 资源分配; 调度算法; 跨层; 性能

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 10-1923-08

A Cross-Layered Scheduling and Resource Allocation Algorithm in OFDMA Systems

HAO Dan dan¹, LI Yong-hua², ZHANG Han-feng², ZOU Shi-hong¹, CHENG Shi-duan¹

(1. State Key Laboratory of Networking and Switching, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. School of Information Engineering, University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: A cross layered time frequency scheduling and resource allocation algorithm, CLSA, is proposed for downlink in OFDMA systems. The CLSA aims at improving system throughput and outage. Besides, some other QoS metrics were considered too, such as physical channel state information as well as users' requirements on throughput, delay and packet error rate (PER). The performance of CLSA and related analysis were evaluated by amounts of simulations. Compared with the classic algorithms, the Modified Proportional Fair (MPF) algorithm and the Modified Largest Weighted Delay First (M-LWDF) algorithm, CLSA shows excellent performance in system effective throughput and outage of OFDMA system in simulations.

Key words: OFDMA; resource allocation; scheduling algorithms; cross-layer; performance

1 引言

OFDM 技术因其高频谱利用率和良好的抗多径干扰能力^[1,2], 被很多新宽带无线通信标准 (如 IEEE 802.16^[3] 和 3GPP LTE^[4]) 选作物理层传输技术. 随之, OFDMA 技术也因能够利用多用户分集技术使得系统容量得到显著增加已经被多种网络选择作为接入技术或主要候选接入技术之一, 如 WMAX^[3]、3GPP LTE、B3G^[11] 等. 有效的 OFDMA 系统资源分配及调度算法可以充分利用频谱资源、改善系统的传输性能, 并能够与自适应调制编码以及多用户分集技术结合来提高系统的频谱利用率, 进而改进系统性能, 因而成为了 OFDMA 技术研究领域的一个重要课题.

OFDMA 系统的调度和资源分配是分不开的两个方面, 无线资源分配在进行子载波分配的同时完成了用户

数据调度, 而分组调度过程实际上也是资源分配的过程, 二者只是侧重点不同^[12]. 从频域、时域、码字和功率等多维的角度对 OFDMA 系统进行资源分配和调度的算法可以获得最优的系统性能, 但这样的算法在实际应用中是 NP 问题, 很难找到最优解, 且算法计算开销大, 难以实现. 因此, 最初的研究都是旨在寻求计算量小且易于实现的次优方案, 或以时隙为调度周期^[1,13-19], 或以帧为调度周期^[5,6,12,14,15,20], 或基于时频二维进行资源分配^[20-22]. 按照时隙调度资源算法计算开销过大; 而按帧调度则可以减少开销, 有效利用多用户分集增益, 获得更好的公平性, 调度周期相对较长, 用户在接到基站端 (BS) 的分配方案后有充足时间准备接收数据帧^[6], 而且还可以提供更多种的传输速率和 QoS. 随后跨层技术因可能大大提高无线网络的性能也被引入到 OFDMA 的资源分配领域中^[5,7,8,16,20], 将用户物理层信道状态信息

与 MAC 和链路层的 QoS 需求相结合,在物理层消除频率选择性衰落,在 MAC 层充分利用分组数据系统的特性来确定各用户的速率需求,进行动态频谱资源分配,在提高频谱利用率的同时为用户提供不同 QoS 等级的传输服务.

但现有算法在性能方面仍有改进空间.文献[20]中算法资源分配单位过度细化,计算复杂度增加,且算法在系统频谱效率性能上损失较大;文献[21,22]中算法未考虑除速率外的其它 QoS 需求,无法支持多种 QoS 要求的业务.而结合跨出技术的算法或在系统容量和频谱利用率性能方面有改进空间,或在系统频谱效率性能损失较大^[20],或计算开销太大^[7].

出于对系统性能增益、算法计算复杂度以及控制开销方面的考虑,本文针对 OFDMA 系统的调度与资源分配问题,采用物理层和 MAC 层相结合的跨层方法,提出了一种基于时频二维分配和跨层自适应技术的 OFDMA 下行链路资源调度和分配算法 CLSA.该算法把用户物理信道状态信息与 MAC 和数据链路层的用户速率要求、延时要求、分组差错率(PER)要求等 QoS 参数结合考虑,同时兼顾系统频谱利用效率以及公平性性能.最后,通过大量的仿真实验,与现有的经典算法——比例公平算法(MPF)^[13]和改进的最大延时加权优先算法(M-LWDF)^[23]的性能进行了对比分析.

2 系统描述

图 1 为简化的系统配置示意图.假设系统中每个小区有一个基站(BS),该 BS 为 M 个移动终端(用户)提供服务,只有用户到基站一段采用无线链路;基站和移动终端均具有一副单向收发天线,系统通过允许多用户共享一个 OFDM 符号来提供 OFDM 多址接入;系统总带宽为 B .为减少资源分配的控制开销,BS 端以 OFDM 帧为单位进行调度和资源分配.假设用户使用信道检测技术可正确检测到当前帧中各子信道的信道状态,并将其选

取的调制方式信息与检测到的子信道状态信息反馈 BS 端.在 BS 端,调度器根据用户反馈回来的子信道状态和调制方式信息,对用户分组数据进行调度,并将调度信息告知资源分配器;资源分配器根据调度器的调度方案为各用户数据流分配相应的资源,并通过控制信道将资源分配信息通知小区内各用户.

2.1 物理层

从频域角度看,将系统总带宽分为 K 个相邻子信道,每个子信道由 N_c 个相邻子载波构成,带宽为 B_s ,子信道带宽小于相干带宽,故可假设每个子信道是平坦衰落的.在本文的研究中,不考虑来自邻小区的干扰和共道干扰,并假设各子信道的衰落是独立的,系统中各子信道完全正交,不存在相邻信道干扰.从时域角度看,系统中 OFDM 帧长为 T_f ,一个 OFDM 帧包括 L 个子帧,每个子帧长为 T_f ($T_f/T_s = L$),每个子帧中包含 N_t ($N_t \geq 1$) 个时隙,时隙长为 T_{st} ($T_f/T_{st} = N_t$),每个时隙包含 N_s 个 OFDM 符号 ($N_s \geq 1$),因此,每个子帧中包含 $N_s \times N_t$ 个 OFDM 符号.由于各子信道衰落不相关,为减少时频二维资源分配算法的计算复杂度,本文把一个子信道上的一个 OFDM 子帧看作是资源分配的基本单位(RAU),称之为资源分配块(见图 2).

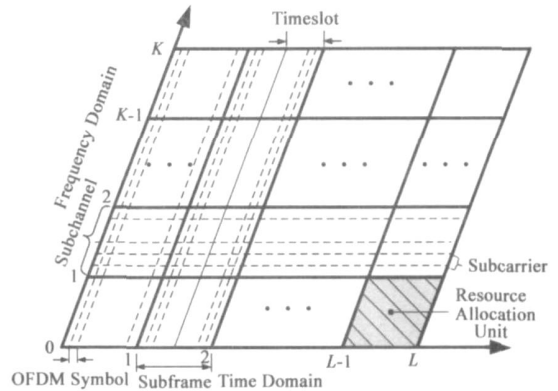


图 2 一个 OFDM 帧资源图示

系统采用 M -QAM 调制,使用速率自适应技术,假设用户可使用信道检测技术正确检测到当前 OFDM 帧中各子信道的信道状态,并采用文献[9]中的跨层自适应方案,根据物理信道状况和用户的 QoS 要求,决定其下一接收帧中各子信道上的调制方式,并将此调制方式信息与各子信道的状态信息通过反馈信道无差错、无丢失地通知 BS 端.各用户在其使用的资源分配块上动态地从系统支持的调制方式集合中选取相应的调制方式.由于对时频资源块分配的优化带来系统性能的增益要大于对时频资源块上功率

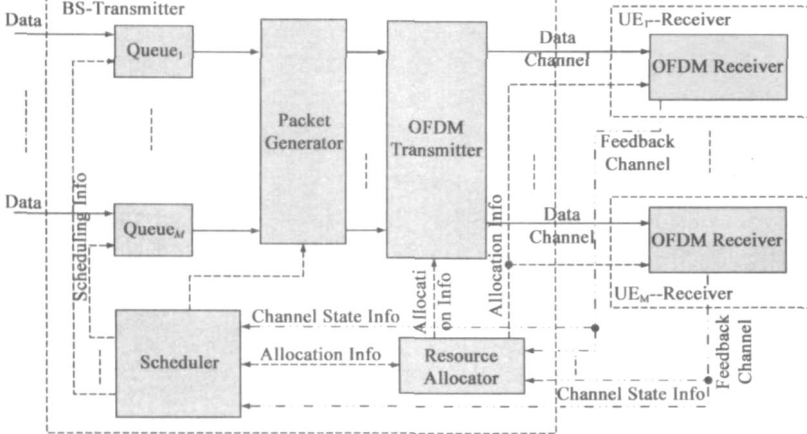


图 1 简化的系统配置示意图

分配优化所带来的系统性能增益^[10], 故 CLSA 采用等功率分配方案. 设 BS 的总传输功率为 P_T , 则各子信道上传输功率为 $P_k (k = 1, \dots, K, \text{且} \sum_{k=1}^K P_k = P_T)$.

2.2 MAC 和数据链路层

在数据链路层上以分组为单位进行数据传输, 假设分组长度固定, 为 N_p 比特. 在 BS 侧, 为每个用户分别建立队列, 各队列均按照先进先出原则发送数据; 并假设系统中各用户的数据按照泊松分布到达^[7]. BS 根据用户反馈的信道状态信息和其所决定的各子信道上传输子帧所采用的调制方式, 遵循调度算法对各用户数据进行调度. 将调度结果通知资源分配器, 资源分配器根据分组调度器的调度方案为各用户分配资源, 并将分配策略告知 OFDM 收发信机, OFDM 收发信机根据分配策略, 从用户队列中取出数据组成 OFDM 子帧. BS 端通过控制信道告知各用户其在当前帧分配到的资源. 因为控制信道可采用较低的调制方式, 所以, 假设控制信道上的信息传输无差错、无丢失. 此外, 系统在 MAC 层上采用选择性自动重传技术 (SR-ARQ), 为避免分组 MAC 层传输错误引起 TCP 层误解而错误地启动 TCP 层拥塞控制, 设 MAC 层分组的最大传输次数为 N_{rs} .

3 系统建模及问题描述

3.1 系统模型

因系统中子信道是平坦衰落, 且其衰落不相关, 因此, 对于小区内的所有用户来说, 假设子信道上的信号包络服从瑞利分布, 接收信噪比服从指数分布, 其概率密度函数为:

$$f_{m,k}(\gamma_{m,k}) = \left[\frac{1}{\gamma_{m,k}} \right] \exp \left(-\frac{\gamma_{m,k}}{\gamma_{m,k}} \right) \quad (1)$$

where, $\gamma_{m,k} \geq 0, m = 1, \dots, M, k = 1, \dots, K$

其中, m 和 k 分别为用户编号和子信道编号, $\gamma_{m,k}$ 是用户 m 在子信道 k 上的即时信噪比, $\overline{\gamma_{m,k}} = E\{\gamma_{m,k}\}$ 是用户 m 在子信道 k 上的平均信噪比. 因上节中已假设使用等功率分配方式, 故 $\overline{\gamma_{m,1}} = \overline{\gamma_{m,2}} = \dots = \overline{\gamma_{m,K-1}} = \overline{\gamma_{m,K}}$ ($m = 1, \dots, M$).

本文采用文献[9]中提出的跨层方案和信道模型, 用以保证用户的 PER 要求. 每个用户根据其在 MAC 层上的 PER 要求把各子信道分别划分为 $N_{\text{mod}} + 1$ 个连续、不重叠的区间段 $\{\Gamma_i^{(m,k)}\}_{i=0}^{N_{\text{mod}}+1}$, N_{mod} 为系统支持的调制方式数目. 当用户 m 在资源分配块 $\text{RAU}(k, l)$ 上检测到的信噪比在 $[0, \Gamma_1^{(m,k)})$ 时, 为避免深度衰落, BS 不为用户 m 分配 $\text{RAU}(k, l)$. 如果用户 m 在 $\text{RAU}(k, l)$ 上检测到的信噪比在 $[\Gamma_i^{(m,k)}, \Gamma_{i+1}^{(m,k)})$ 区间内时, 则用户 m 将在 $\text{RAU}(k, l)$ 采用调制方式集合中的第 i 种调制方式*, 记为 $\beta_i\text{-QAM}$.

则此时用户 m 在 $\text{RAU}(k, l)$ 上可传输的比特数为:

$$c_{m,k,l} = B_s \cdot T_f \cdot \log_2 \beta_i \quad (2)$$

设 $S = \{s_{m,k,l} | \sum_{m=1}^M s_{m,k,l} \leq 1, m = 1, \dots, M, k = 1, \dots, K, l = 1, \dots, L\}$ 为一次有效的资源分配方案, 一个 $\text{RAU}(k, l)$ 在一次分配中只能分给一个用户使用, 若资源分配块 $\text{RAU}(k, l)$ 分配给了用户 m , 则 $s_{m,k,l} = 1$, 否则 $s_{m,k,l} = 0$. 所以, 用户 m 在一个 OFDM 帧上可实现的传输速率为:

$$\eta_m = \frac{1}{T_f} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L s_{m,k,l} \cdot c_{m,k,l} \quad (3)$$

且式(3)满足:

$$\sum_{m=1}^M s_{m,k,l} \leq 1, \forall (k, l) \quad (4)$$

$$\eta_m - r_m \geq 0 \quad (5)$$

其中, r_m 为用户 m 的速率需求, 根据用户 QoS 要求, η_m 应满足式(5), 进而可得一个 OFDM 帧上的系统总吞吐率:

$$\eta_{ys} = \frac{1}{T_f} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L s_{m,k,l} \cdot c_{m,k,l} \quad (6)$$

3.2 问题描述

设 OFDMA 系统中有实时和非实时的多种类型应用, 算法设计以确保用户的 QoS 要求为第一目标, 设 $R_m(\text{PER}_0^m, r_m, \Psi_0^m)$ 为用户 m 的 QoS 要求, 其中, PER_0^m 为用户 m 的 PER 要求, 即:

$$\text{PER}_i^m(\beta_i) \leq \text{PER}_0^m, m = 1, \dots, M, i = 1, \dots, N_{\text{mod}} \quad (7)$$

这里, PER_i^m 为用户 m 在调制方式 $\beta_i\text{-QAM}$ 下的平均 PER; Ψ_0^m 为用户 m 的延时限, 表示用户 m 可容忍的最大端到端分组传输延时, 是用户端到端延时约束条件. 若缓存中用户队列中分组超时(即不满足式(8)的分组), 则将被直接丢弃:

$$\Psi_{ud}^m + \Psi_{wq}^m + \Psi_{tr}^m \leq \Psi_0^m \quad (8)$$

其中: Ψ_{ud}^m 为用户 m 的分组在有线链路段的传输延时, Ψ_{wq}^m 为用户分组在 BS 端缓存中排队的等待延时, Ψ_{tr}^m 为用户分组在无线链路段的传输延时.

本文旨在利用跨层设计方案, 在保证用户 QoS 要求的前提下, 寻求一种开销小、易实现的调度和资源分配算法, 以有效利用系统频谱资源、保证用户 QoS、降低系统中断率为算法设计目标.

4 跨层调度和资源分配算法

4.1 参数说明

假设各用户数据达到分别服从参数为 $\lambda_m (m = 1, \dots, M)$ 的泊松分布, 且相互独立. 设 $A_m(t)$ 为 t 时刻基

* 在调制方式集合中, 根据调制速率升序排列调制方式.

站端用户 m 的分组到达数, $A_m(t)$ 服从参数为 λ_m ($m=1, \dots, M$) 的泊松分布:

$$P_m(A_m(t) = n) = \frac{\lambda_m^n}{n!} \exp(-\lambda_m), n \geq 0 \quad (9)$$

其中, $\lambda_m = E\{A_m(t)\}$ 是 $A_m(t)$ 的数学期望. 设 Q_m ($m=1, \dots, M$) 为 BS 端数据链路层上用户 m 的缓存队列, 队列中分组遵守先进先出(FIFO) 规则进行数据传输; $\zeta_{pid}^m(t)$ 表示队列 Q_m 中第 pid 个分组在时刻 t 的等待时长^{*}; $Len(Q_m, t)$ 表示队列 Q_m 在时刻 t 的队列长度. 为简单起见, 假设一个 IP 分组只封装一个 TCP 分段, 而一个数据链路层分组也只封装一个 IP 分组. 因已假设数据从 TCP 层到数据链路层无时延, 且有线链路段分组超时或传输错误可以忽略, 因此, 可通过计算数据链路层上分组超时率获得端到端的 TCP 分段超时率. 设 Ψ_{ee}^m 为用户 m 的端到端时延, 则:

$$\Psi_{ee}^m = \Psi_{wd}^m + \Psi_{wg}^m + \Psi_r^m \quad (10)$$

4.2 调度及资源分配算法

CLSA 算法虽然以提供频谱利用率和改进中断性能为目标, 但考虑到公平性, 算法在设计上借鉴了比例公平算法思想. 同时, 为避免重传分组因信道状况不好而长时间分配不到资源导致分组超时, 算法给重传分组赋予了较高的加权因子. 因为对用户来说, 各子信道是平坦衰落, 故假设信道质量在一帧内保持不变.

在本文的系统配置中, 用户分组调度和资源分配均是由基站端负责实现. 在各 OFDM 帧开始前, 由调度器根据小区中用户反馈回来的调制方式信息和子信道信息按下面描述的算法进行调度, 并将调度结果告知资源分配器和小区中各用户, 而资源分配器只是根据调度信息给用户实际分配资源. CLSA 算法步骤描述如下(算法流程图见图 3):

(1) 初始化. 首先初始化用户获得资源块数 $\delta_m = 0$; 然后, 初始化各用户在每个 RAU 上的调度加权因子 $\alpha_w^{m(k,l)}(t)$ ($\alpha_{rt}^{m(k,l)}(t)$, $\alpha_v^{m(k,l)}(t)$, $\alpha_r^{m(k,l)}(t)$), 其中, $\alpha_{rt}^{m(k,l)}(t)$ 为重传加权因子, $\alpha_v^{m(k,l)}(t)$ 为信道增益加权因子, $\alpha_r^{m(k,l)}(t)$ 为速率要求加权因子, 分别定义如下:

$$\alpha_{rt}^{m(k,l)}(t) = \log(\zeta_{pid}^m(t) + 1),$$

$$\alpha_v^{m(k,l)}(t) = \begin{cases} \frac{\zeta_{pid}^m(t) \leq N_{rts}}{c_{m,k,l}(t) + 1}, & \bar{\eta}_m(t) \neq 0 \\ c_{m,k,l}(t) + 1, & \bar{\eta}_m(t) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\alpha_r^{m(k,l)}(t) = \frac{r_m}{\delta_m + 1} \quad (13)$$

$$\alpha_w^{m(k,l)}(t) = \alpha_{rt}^{m(k,l)}(t) \cdot \alpha_v^{m(k,l)}(t) \cdot \alpha_r^{m(k,l)}(t) \quad (14)$$

其中, $\zeta_{pid}^m(t)$ 为用户队列 Q_m 中第 pid 个分组在时刻 t 的分组传输次数, $m=1, \dots, M$, $k=1, \dots, K$, $l=1, \dots, L$, $pid=1, \dots, Len(Q_m, t)$.

(2) 丢弃超时和重传失败分组. 逐一检查用户缓存队列 Q_m , 如有分组满足式(15)或(16), 则丢弃之:

$$\zeta_{pid}^m(t) \geq N_{rts} \quad (15)$$

或 $\Psi_{wd}^m + \zeta_{pid}^m(t) \geq \Psi_r^m$ (16)
并更新 $Len(Q_m, t)$.

(3) 优先调度即将超时分组. 设 $E(t)$ 为系统在时刻

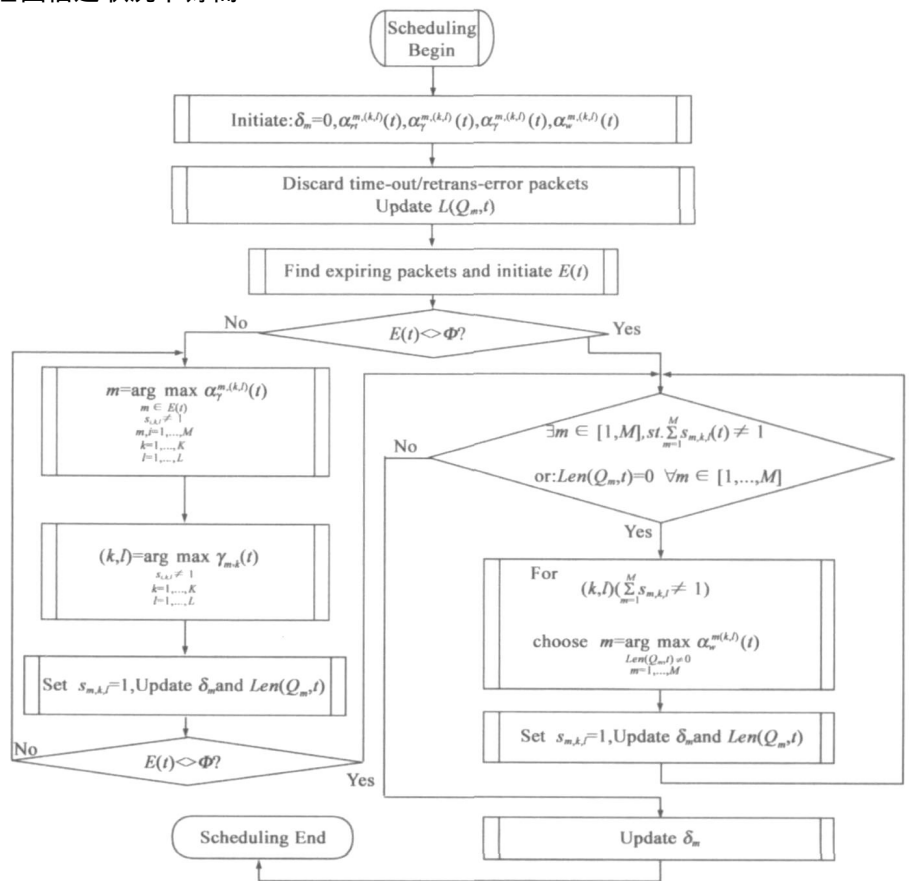


图 3 算法一次调度过程流程图

* 队头分组的 pid 为 1, 其余分组按照加一递增顺序依此类推.

t 的活动用户子集, 该集合中的用户均有即将到期的分组 ($\Psi_{ed}^m + 2 \Psi_r^m \leq \Psi_0^m$):

(i) 按照式(17)选取用户:

$$m = \arg \max_{\substack{m \in E(t) \\ s_{m,k,l} \neq 1}} \alpha_Y^m(k, l)(t)$$

$$m, i = 1, \dots, M; k = 1, \dots, K; l = 1, \dots, L \quad (17)$$

若选中多个用户, 则为有更佳子信道状况的用户优先分配资源。

(ii) 按式(18)为(i)中选择的用户 m 分配对其来说状态最佳的可用的 RAU(k, l):

$$(k, l) = \arg \max_{\substack{k, l \\ s_{m,k,l} \neq 1}} Y_{m,k}(t), k = 1, \dots, K; l = 1, \dots, L \quad (18)$$

(iii) 将该用户从 $E(t)$ 中删去, 并更新 δ_m , $Len(Q_m, t)$, 置 $s_{m,k,l} = 1$; 若 $E(t)$ 为空则转(4), 否则转本步骤中的(i)。

(4) 分配其他资源。对于剩余资源分配块, 依次根据式(19)选择用户, 为其分配资源:

$$m = \arg \max_{Len(Q_m, t) \neq 0} \alpha_w^m(k, l)(t), m = 1, \dots, M \quad (19)$$

若选中多个用户, 则为子信道状况较佳的用户优先分配资源, 并更新 δ_m , $Len(Q_m, t)$ 和 $\alpha_w^m(k, l)(t)$ 。依此类推, 直到所有 RAU 全部分配完毕, 或无用户有数据待发。

(5) 更新参数 $\alpha_w^m(k, l)(t)$ ($\alpha_{rt}^m(k, l)(t)$, $\alpha_Y^m(k, l)(t)$, $\alpha_r^m(k, l)(t)$), $\bar{\eta}_m(t)$, $Len(Q_m, t)$, 并设 $\delta_m = 0$ 。本次调度过程结束。

由于上行链路和下行链路相似, 只是功率分配的约束条件不同(下行链路的功率约束条件是所有用户可获得的功率之和不能超出基站允许的发射功率总和; 上行链路的功率约束条件是各用户所使用的发射功率不能超过其允许的功率), 故本文算法亦适用于上行链路。

4.3 算法分析

4.3.1 系统 MAC 层有效吞吐量

若系统中数据链路层分组传输失败过多, 导致重传次数增加, 无疑是增加系统负载。因此, 为了更真实地反映系统频谱使用效率, 本文采用有效的数据链路层吞吐率来刻画算法的资源利用率, 即系统在数据链路层上有效传输的净载荷作为衡量系统吞吐性能指标。

用户 m 在 MAC 层上的有效吞吐率为:

$$\eta_{\text{eff}}^m = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L s_{m,k,l} \cdot c_{m,k,l} \cdot (1 - \zeta_{\text{PHY}}^m) \cdot (1 - \zeta_{\text{MAC}}^m) \cdot \text{PER}_i^m(k, l)(\beta_i, \gamma_{m,k}) \cdot P_{\text{time out}}^m \quad (20)$$

其中, ζ_{PHY}^m 为用户 m 在物理层上的帧开销, ζ_{MAC}^m 为用户 m 在 MAC 层上的分组开销, $\text{PER}_i^m(k, l)(\beta_i, \gamma_{m,k}(t))$ 为用户 m 在 RAU(k, l) 上传输时的 PER, $P_{\text{time out}}^m$ 为用户的

分组超时丢弃率。 $P_{\text{time out}}^m$ 的计算如下:

$$P_{\text{time out}}^m = \frac{\text{用户 } m \text{ 总超时分组数}}{\text{用户 } m \text{ 总传输分组数}} \quad (21)$$

为简单起见, 本文未考虑前向纠错编码(FEC)*, 所以用户 m 在资源分配块 RAU(k, l) 上传输分组 D 的 PER 为:

$$\text{PER}^{m,(k,l)}(\beta_i, \gamma_{m,k}) = 1 - (1 - \text{BER}^{m,(k,l)}(\beta_i, \gamma_{m,k}))^{N_P} \quad (22)$$

其中, $\text{BER}^{m,(k,l)}(\beta_i, \gamma_{m,k})$ 为误比特率(BER), $\gamma_{m,k}$ 为接收时的即时信噪比 SNR, N_P 为用户 m 的 MAC 层分组长度; 则可根据下式计算 $\text{BER}^{m,(k,l)}(\beta_i, \gamma_{m,k})^{1/24}$:

$$\text{BER}^{m,(k,l)}(\beta_i, \gamma_{m,k}) \approx 0.2 \exp \left[-\frac{3 \gamma_{m,k}}{2(\beta_i - 1)} \right] \quad (23)$$

至此, 可求得系统 MAC 层上的有效吞吐率为:

$$\eta_{\text{eff-sys}} = \sum_{m=1}^M \eta_{\text{eff}}^m, m = 1, \dots, M \quad (24)$$

4.3.2 系统中断率

对用户来讲, 其感知的服务质量远比统计数字更具有意义。若一个用户的带有 QoS 要求的业务请求被接纳, 且系统为其开始数据传输服务, 尤其是对实时业务来讲, 频繁发生传输中断给用户带来的不满意感要远远高于其业务请求被系统所拒绝所带来的不满。中断率因直接影响用户感受, 所以是衡量系统性能的重要指标之一。

而本文对 OFDMA 系统资源分配和调度算法研究的出发点就是在提高频谱效率的同时, 尽可能的为用户提供有多种 QoS 级别的无线传输服务, 因此, 本文选择系统中断率作为衡量算法性能的一个指标。这里, 定义用户所获得的吞吐量低于其请求的传输速率时, 即式(5)得不到满足时, 将发生传输中断, 并使用 P_{out} 表示系统的平均中断率, P_{out}^m 表示用户 m 的平均中断率。

4.3.3 系统中断率公平性

公平性一向是评价算法性能的一个重要指标, 为了对所提算法给出更全面的性能分析, 本文也给出了公平性指标的定义。正如 4.3.2 小节中所分析, 中断率直接影响用户所感知的 QoS, 因此, 本文中对算法公平性的分析从系统中断率性能角度出发, 采用公平性指数^[25]来评估算法在各用户获得服务的中断率性能方面的公平性, 则该分配方案下系统中用户中断率公平性指数 Θ_{outage} 定义为:

$$\Theta_{\text{outage}} = \left[\sum_{m=1}^M P_{\text{out}}^m \right]^2 \left/ \left(M \cdot \sum_{i=1}^M \left(P_{\text{out}}^m \right)^2 \right) \right. \quad (25)$$

由式(25)可知, 公平性指数 $\Theta_{\text{outage}} \in (0, 1]$, Θ_{outage} 的

* 如果考虑 FEC 的话, 影响的只是用户子信道状态的划分以及 PER 结果的不同, 相同的平均信噪比可能导致信道状态划分的门限值不同, 但是分析的过程还是一样的。

值越接近于 1, 各用户获得服务的中断率越接近, 算法公平性越好. 为防止系统中用户所得到的传输服务均未发生中断的情况, (即 $\sum_{i=1}^M \left(P_{out}^n\right)^2 = 0$ 时), 即防止出现分母为 0 的情况, 定义:

$$\Theta_{outage} = \left\{ 1 \mid \sum_{i=1}^M \left(P_{out}^n\right)^2 = 0 \right\} \quad (26)$$

5 仿真及结果分析

本节给出仿真实验结果, 并对所提算法与现有经典的 MPF 算法和 M-LWDF 算法就系统平均吞吐量以及系统平均中断率和公平性三个方面性能做了比较分析. 为了使得算法实现在相同的平台上, 保证仿真结果的可比性, MPF 算法^[13] 和 M-LWDF 算法^[23] 的速率自适应方案同样选择了文献[9] 中的跨层方案.

5.1 仿真环境和主要仿真参数

本文仿真了 OFDMA 系统的单小区, 总用户数为 M , 无线信道为多径衰落信道, 使用短循环前缀(CP); 基站端, 用户 m 在 MAC 层上的分组到达率为 λ_m ; 其他主要仿真参数见表 1.

表 1 主要仿真参数

参 数	取 值
带宽	10MHz
FFT	1024
可用子载波数目 $K \cdot N_c$	600
子载波带宽 B_s	15kHz
子信道数目 K	50
子帧长 T_f	1ms
OFDM 帧长 T_f	10ms
子帧中时隙数 N_t	2
时隙时长 T_{sl}	0.5ms
一个时隙中 OFDM 符号数(短 CP) N_s	7
MAC 层分组长度 N_p	360bits
目标 PER	0.1, 0.01
MAC 分组最大传输次数 N_{rs}	4

本文仿真了两种场景:

场景一: 假设小区内各活动用户在各子信道上的平均信噪比均相同为 12dB, 各用户在数据链路层上的分组到达服从参数为 2 或者 5 的泊松分布, 这两类用户的比例为 3/7, 用户终端的移动速度为 60km/h.

场景二: 更为一般的情形, 小区内各活动用户在各子信道上的平均信噪比不一定相同, 各用户在子信道上的平均信噪比在仿真中随机产生.

5.2 仿真分析

图 4~ 7 为场景二的仿真结果. 因各算法在场景一的仿真结果中表现出的性能基本与其在场景二的仿真结果中表现相近, 因此, 出于对文章篇幅的考虑, 省略了

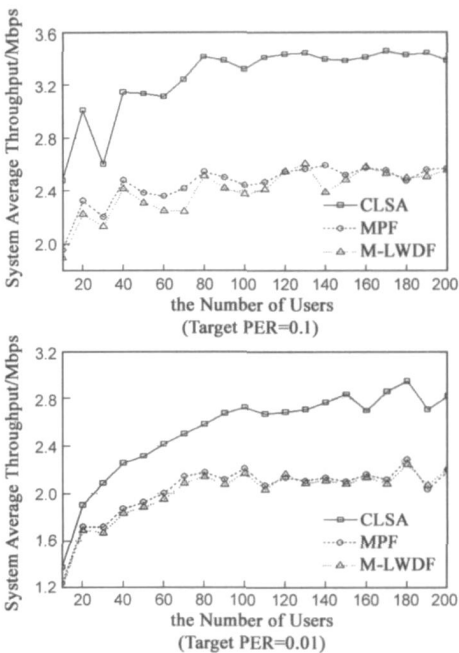


图 4 场景二下的系统平均吞吐量

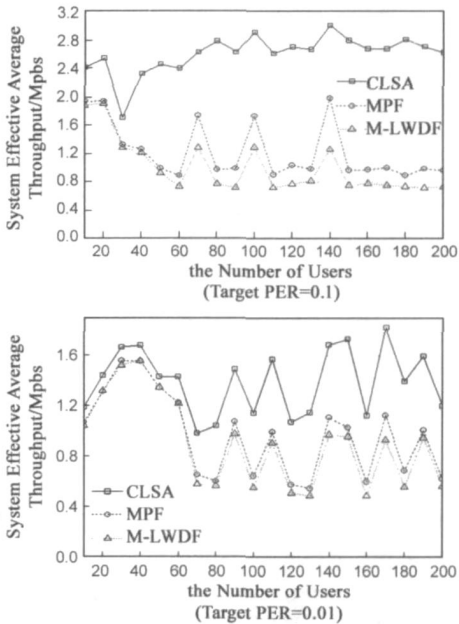


图 5 场景二下的系统有效平均吞吐量

场景一的仿真结果. 从图 4~ 7 中可以看出, CLSA 算法不论在系统吞吐性能方面还是系统平均中断率性能上都有较好的表现, 尤其是在系统吞吐性能方面要远远优于 MPF 算法和 M-LWDF 算法. 而且, 由于考虑了用户分组的延时、重传次数、信道质量以及获得带宽的历史信息, 其在系统平均中断率性能上也优于 MPF 算法和 M-LWDF 算法. 就公平性而言, CLSA 算法为了获得良好的系统吞吐性能, 牺牲了一定的公平性, 算法在系统中断率公平性方面表现不如其他两种算法. 从图 4~ 7 可以看出, 用户数据链路层上 PER 要求的不同, 对算法性能

表现上影响甚微。

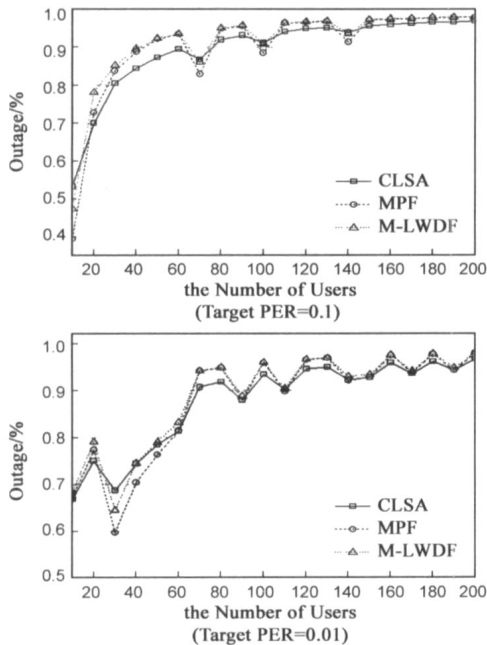


图 6 场景二下的系统中断率

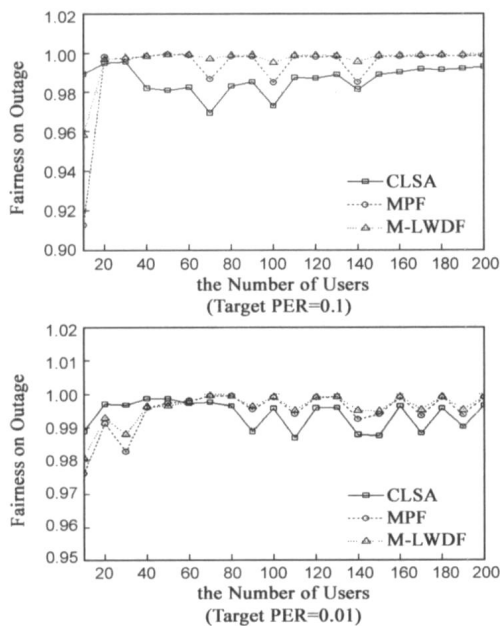


图 7 场景二下的系统中断率公平性

6 结论

本文在回顾了现有的 OFDMA 系统调度和资源分配研究成果后,对 OFDMA 系统的调度和资源分配问题建立了系统模型,提出了一种基于跨层和时频二维分配的 OFDMA 下行链路资源分配和调度算法 CLSA。通过大量的仿真实验以及与经典的 MPF 算法和 M-LWDF 算法的对比分析,验证了 CLSA 算法在系统吞吐量和中断率性能方面有较好表现,并能够为用户提供不同 QoS 要求的服务。

参考文献:

- [1] Kwon H, Lee W I, Lee B G. Low-overhead resource allocation with load balancing in multi cell OFDMA systems[A]. In Proceedings of VTC 2005 Spring, Stockholm[C]. IEEE Press, 2005. 3063- 3067.
- [2] 卢光跃, 邵朝, 一种 OFDMA 系统资源分配方案[J]. 西安邮电学院学报, 2006, 11(1): 5- 8.
Lu Guang yue, Shao. A radio resource allocation scheme for OFDMA systems[J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications, 2006, 11(1): 5- 8. (in Chinese)
- [3] IEEE std. 802. 16e, Air Interface for fixed broadband wireless access systems[S].
- [4] 3GPP TS 36. 211 v1. 0. 0, 3rd Generation Partnership Project; technical specification group radio access network; physical channels and modulation(Release 8)[S].
- [5] Y Ofuji, A Morimoto, H I Atarashi, et al. Sector throughput using frequency- and time domain channel dependent packet scheduling with channel prediction in OFDMA downlink packet radio access[A]. In Proceedings of VTC 2005 Fall[C]. Dallas: IEEE Press, 2005. 1589- 1593.
- [6] Zhang X, Wang W, Liu Y. An efficient multiuser frequency-time grid(FTG) allocation algorithm for ofdm based broadband wireless systems[A]. In Proceedings of PIMRC' 04[C]. Barcelona: IEEE Press, 2004. 2092- 2096.
- [7] Zhang Y J, K B Lataief. Adaptive resource allocation and scheduling for multiuser packet based OFDM networks[A]. In Proceedings of ICC' 04[C]. Paris: IEEE Press, 2004. 2949- 1953.
- [8] Niyato D, Hossan E. Adaptive fair subcarrier/rate allocation in multirate OFDMA networks: radio link level queuing performance analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(6): 1897- 1907.
- [9] Hao D, Xiao J, Zou S, et al. Impact of feedback delay on system performance with AMC/ SR-ARQ over Rayleigh fading channels[A]. In Proceedings of IEEE WiCom[C]. Wuhan: IEEE Press, 2006. 1- 5.
- [10] Song G, Li Y G, L J Cimini, et al. Joint channel aware and queue aware data scheduling in multiple shared wireless channels[A]. In Proceedings of WCNC' 04[C]. Atlanta: IEEE Press, 2004. 1939- 1944.
- [11] 3GPP TS TR 25. 814 v7. 1. 0, 3rd Generation Partnership Project; technical specification group radio access network; physical layer aspects for evolved universal terrestrial radio access (UTRA) (Release 7)[S].
- [12] 路彦辉, 尹长川, 乐光新, 自适应 OFDMA 系统无线资源分配和分组数据调度算法的研究[J]. 电路与系统学报, 2006, 11(5): 70- 74.
Lu Yan hui, Yin Chang chuan, Le Guang xin. Study on joint

- radio resource allocation and downlink packet data scheduling algorithm in adaptive OFDMA systems[J]. Journal of Circuits and Systems, 2006, 11(5): 70–74. (in Chinese)
- [13] Kim H, Kim K, Han Y, et al. A proportional fair scheduling for multicarrier transmission system [A]. In Proceedings of VTC 2004 Fall[C]. Los Angeles: IEEE Press, 2004. 409–413.
- [14] Yu G, Zhang Z, Chen Y, et al. Subcarrier and bit allocation for OFDMA systems with proportional fairness[A]. In Proceedings of WCNC 2006[C]. Las Vegas: IEEE Press, 2006. 1717–1722.
- [15] Kim I, Lee H L, Kim B, et al. On the use of linear programming for dynamic subchannel and bit allocation in multiuser OFDM[A]. In Proceedings of GLOBECOM'01[C]. San Antonio: IEEE Press, 2001. 3648–3652.
- [16] M Einhaus, O Klein. Performance evaluation of a basic OFDMA scheduling algorithm for packet data transmissions[A]. In Proceedings of ISCC'06[C]. Pula Cagliari: IEEE Press, 2006. 695–702.
- [17] V Singh, V Sharma. Efficient and fair scheduling of uplink and downlink in IEEE 802.16 OFDMA networks[A]. In Proceedings of WCNC 2006[C]. Las Vegas: IEEE Press, 2006. 984–990.
- [18] Ryu S, Ryu B, Seo H, et al. Urgency and efficiency based wireless downlink packet scheduling algorithm in OFDMA system[A]. In Proceedings of VTC 2005 Spring[C]. Stockholm: IEEE Press, 2005. 1456–1462.
- [19] M Moretti, M Morelli. A novel dynamic subcarrier assignment scheme for multiuser OFDMA System[A]. In Proceedings of VTC 2006 Spring[C]. Melbourne: IEEE Press, 2006. 2109–2113.
- [20] Jeong S S, Jeong D G, Jeon W S. Cross layer design of packet scheduling and resource allocation in OFDMA wireless multimedia network[A]. In Proceedings of VTC 2006 Spring[C]. Melbourne: IEEE Press, 2006. 309–313.
- [21] Zhang X, Wang Y, Wang W. Capacity analysis of adaptive multiuser frequency time domain radio resource allocation in OFDMA systems[A]. In Proceedings of IEEE ISCAS 2006[C]. Greece: IEEE Press, 2006. 4pp.
- [22] Zhang X, Zhou E, Zhu R, et al. Adaptive multiuser radio resource allocation for OFDMA systems[A]. In Proceedings of IEEE Globecom 2005[C]. St Louis: IEEE Press, 2005. 5pp.
- [23] A J Goldsmith, S Chua. Variable rate variable power MQAM for fading channels[J]. IEEE Transactions on Communication, 1997, 45(10): 1218–1230.
- [24] V Bharghavan, A Demers, S Shenker, et al. MACAW: a media access protocol for wireless LAN's[A]. ACM SIGCOMM[C]. ACM Press, 1994. 212–215.
- [25] M Andrews, K Kumaran, K Ramanan, et al. Providing quality of service over a shared wireless link[J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(2): 150–154.

作者简介:



郝丹丹 女, 1973 年 7 月出生于辽宁省。1993 年、2003 年和 2007 年分别毕业于内蒙古大学计算机学院和北京邮电大学计算机科学与技术学院, 获工学学士、工学硕士和工学博士学位。主要研究领域为无线资源管理, 无线网络跨层设计及性能优化。
E-mail: d.hao@126.com



李永华 男, 工程师。1971 年 11 月出生于内蒙古通辽市。1994 年、2003 年和 2007 年分别在内蒙古大学、吉林大学和北京邮电大学获工学学士、工学硕士和工学博士学位。现为北京邮电大学教师, 主要从事 MMO 技术、跨层优化等方面的研究工作。
E-mail: caachy@yahoo.com.cn