

OFDMA 系统中实时业务的资源分配与调度算法

郁宇,周武旻

(中国科学技术大学个人通信与扩频实验室,安徽合肥 230027)

摘要:提出了一种适合于 OFDMA 系统中实时业务传输的资源分配与调度算法,该算法利用物理层的信道信息和 MAC 层的业务信息,采取分组调度与子载波分配交替进行的资源分配方式,在满足数据包传输时延要求的同时,最大化系统的吞吐量.仿真结果表明,该算法无论是在系统的吞吐量、丢包率,还是数据包等待时延方面,都具有良好的性能.

关键词:正交频分复用接入;分组调度;子载波分配;实时业务

中图分类号: TN929.531 **文献标识码:** A

Resource allocation and scheduling for real-time traffic in OFDMA

YU Yu, ZHOU Wu-yang

(PCN&SS Lab, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A resource allocation and scheduling algorithm for real-time traffic in an OFDMA system was proposed. The proposed algorithm fully considered the physical layer and MAC layer information, in which packet scheduling and subcarrier allocation were performed in an alternate manner. The proposed algorithm aimed at satisfying the stringent packet delay constraints while obtaining a high system throughput. It is demonstrated in the simulation result that the proposed algorithm can improve system performance in terms of throughput, packet loss rate and packet delay.

Key words: OFDMA; packet scheduling; subcarrier allocation; real-time traffic

0 引言

无线接入现已成为一种很重要的接入方式,其上承载有各种高速的实时和非实时业务,并为各种业务,特别是对时延和吞吐量要求都很苛刻的高速实时业务,提供优异的服务(QoS),因此成为无线网络设计中一个具挑战性的研究课题.

正交频分复用接入(OFDMA)是基于 OFDM 调制方式的一种无线接入方式,它具有传输速率高、资源分配灵活、能同时支持多个用户等特点,被认为

是下一代宽带无线接入方式,已经应用于 IEEE802.16d/e 等标准中.在 OFDMA 系统中,由于不同用户在不同子载波上的信道情况不同,通过精巧的子载波分配和调度,把子载波分配给其信道条件好的用户,能有效地提高系统的容量,给系统带来多用户分集增益.相比其他接入系统,OFDMA 系统具有能同时挖掘时域和频域上的多用户分集增益、同时支持多用户等特点,使得它更适用于实时业务的传输.文献[1]把单载波中的 M-LWDF 算法^[2]推广到 OFDMA 多载波系统中,在每个子载波上独

收稿日期:2007-02-09;修回日期:2007-06-12

基金项目:国家自然科学基金(60496314)资助.

作者简介:郁宇,男,1982年生,硕士生.研究方向:无线通信系统中的资源管理. E-mail: yuy3@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:周武旻,博士/教授. E-mail: wyzhou@ustc.edu.cn

立采用 M-LWDF 算法来进行子载波分配;文献[3]在每个子载波上根据当前及以前的业务信息和该子载波上的信道增益来进行子载波分配.这些研究只是把原来单信道中的实时业务调度算法在 OFDMA 系统中进行了简单的扩展,在单个子载波上独立进行资源分配和调度.

本文利用 OFDMA 系统具有多信道、能同时支持多用户等特点,提出一种适合于 OFDMA 系统中实时业务传输的资源分配与调度算法.该算法在进行资源分配和调度时,综合考虑系统中物理层上所有子载波的信道信息、MAC 层用户队列中数据包的等待时延信息以及实时业务的时延要求,采用分组调度与子载波分配交替进行的资源分配方式,在保证实时业务苛刻的时延要求的同时,最大化系统的吞吐量.

1 系统模型

本文主要考虑 OFDMA 系统下行链路实时业务的数据传输.基站端的发送如图 1 所示.假设系统中共有 K 个用户,系统带宽被划分成 N 个子载波,每帧由 S 个 OFDM 符号构成.在基站端,每个用户到达的数据包存放在各自的 FIFO(先进先出)队列中,每个数据包都有一个时延期限 T_{\max} ,如果数据包在队列中的等待时延超过了时延期限,那么这个数据包将会被丢弃.假设基站端每个用户的队列长度无限长,数据包长度为 L 个比特.假设基站知道所有子载波上的信道信息(在 FDD 模式下,基站可以通过反馈信道得到信道信息.在 TDD 模式下,基站

可以通过上行信道得到下行信道的信息).在每帧的起始,调度器根据分组调度准则决定发送某个用户队列中的数据包.子载波分配与自适应调制模块根据当前物理层的信道信息来决定这个数据包应该承载在哪些子载波上以及这些子载波的调制方式.在物理层,这些数据包经过调制、IFFT、并串转换、加循环前缀发送出去.链路自适应和子载波分配信息通过专用信道传送给用户端.

如果数据包在传输过程中发生了错误,基站将重传此数据包.一个接收错误的数据包将会不断地被重传,直到它正确地被接收或者其等待时延超过了时延期限为止.

2 实时业务的资源分配与调度算法

现有 OFDMA 系统中,针对实时业务的资源分配算法一般都是在单个子载波上独立进行的.将子载波 n 分配给哪个用户由下式决定^[3]

$$j = \arg \max_k \left[\frac{\bar{a}_k(t)}{\bar{d}_k(t)} \gamma_{k,n}(t) W_k(t) \right], k = 1, 2, \dots, K \quad (1)$$

式中, $\bar{a}_k(t)$ 和 $\bar{d}_k(t)$ 分别为用户 k 在某一段时间内平均的业务速率和物理层吞吐量, $\gamma_{k,n}(t)$ 为用户 k 在子载波 n 上的信道增益, $W_k(t)$ 为用户 k 队首数据包的等待时延.这种基于单个子载波独立进行资源分配的算法有两个缺点:第一,对每个子载波进行资源分配时,没有考虑其他子载波的情况;第二,当子载波数量较多时,这种资源分配算法的运算复杂度较高.

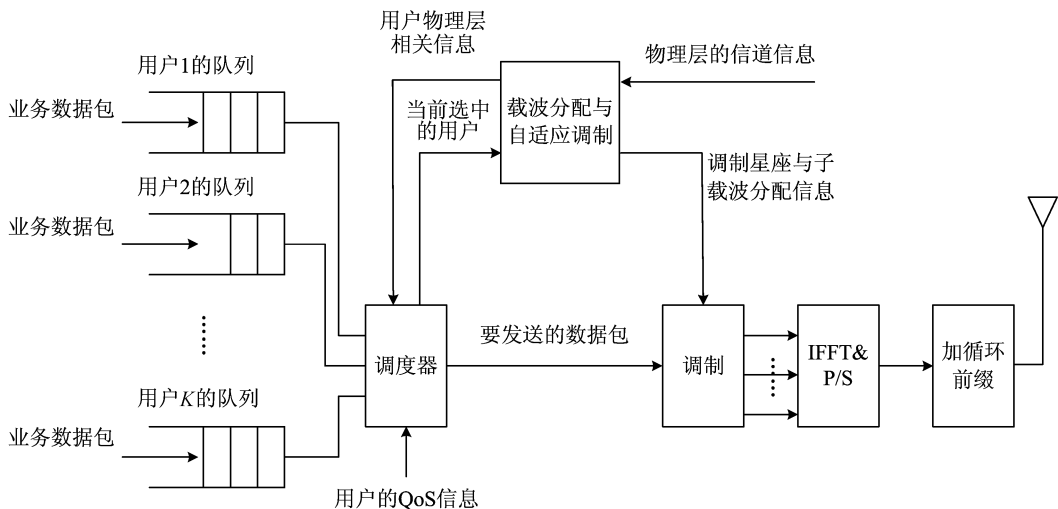


图 1 基站端发送模块的系统框图

Fig. 1 Transmitter structure at base station

本文提出的改进算法由分组调度和子载波分配两部分交替完成. 首先根据当前物理层所有子载波的信道信息和 MAC 层队列中所有用户的数据包等待时延信息, 由分组调度算法决定应该发送哪个用户的队首数据包; 然后子载波分配算法决定该用户的队首数据包承载在哪些子载波上. 子载波分配结束后, 根据当前剩余的子载波更新物理层的整体信道信息, 再用分组调度算法决定下一个要发送数据包的用户, 依此类推, 直到所有用户队列内的数据包都分配到了子载波, 或者系统剩余的子载波不足以发送一个数据包为止. 这种资源分配算法考虑了物理层上所有子载波和 MAC 层中所有用户的信息.

在介绍具体算法之前, 先简单解释一些符号的概念和意义: A 表示当前未分配的子载波集合; $r_k(t)$ 表示用户 k 当前物理层的速率, 这个速率是指用户 k 在 A 中所有子载波上能承载的比特数的总和(因为一帧的时间间隔是固定的, 为了表述方便, 本文统一使用子载波上能承载的比特数来表示这个子载波上能承载的物理层速率), 每一次分组调度和子载波分配完成以后, 集合 A 发生变化, $r_k(t)$ 也需要进行相应的更新; \hat{K} 表示激活用户集合, 如果用户 k 队列中还有数据包未发送, 并且其当前物理层速率 $r_k(t)$ 足以在一帧内发送一个完整的数据包, 那么用户 k 就在集合 \hat{K} 内.

2.1 子载波分配算法

在 OFDMA 系统中, 由于用户地理位置的不同和频率选择性衰落的影响, 每个用户在同一个人子载波上的信道情况都不一样. 对某些用户信道情况很差的子载波, 对其他用户而言可能是好的. 通过子载波、比特和功率分配, 可以有效地提高系统容量. 对于多用户多载波系统来说, 比特和功率联合分配的复杂度很大, 并且由于子载波分配和多用户分集的存在, 每个用户可以保证得到信道条件较好的子载波, 自适应功率分配对系统整体性能的提高很有限^[4], 因此本文采用各子载波上功率平均分配的方式, 每个子载波上的功率为 \bar{p} .

假设 $h_{k,n}(s)$ 为用户 k 在第 n 个子载波上第 s 个符号内的信道增益系数, 假设信道变化的周期远远大于一帧的时间间隔, 那么对于 $h_{k,n}(s)$, $\forall s$ 在一帧时间内基本不变, 为 $h_{k,n}$; 子载波 k 在一帧内所有的 S 个符号上都采用相同的调制方式. 假设自适应调

制采用 QAM 调制方式, 根据 QAM 误比特率的公式, 在某一帧内, 用户 k 在第 n 个子载波上承载的总比特数可以表示为^[5]

$$r_{k,n} = S \left\lfloor \log_2 \left[1 - \frac{1.6 \frac{|h_{k,n}|^2 \bar{p}}{\sigma^2}}{\ln\left(\frac{\text{BER}}{0.2}\right)} \right] \right\rfloor_2 \quad (2)$$

符号 $\lfloor x \rfloor_2$ 表示把 x 值取整到比 x 小并且是 2 的整数倍的最近的那个整数上, BER 为自适应调制预定的目标误比特率, σ^2 为信道噪声方差.

一般的子载波分配算法都是根据用户在子载波上的信道增益, 尽量把子载波分配给其信道增益最大的那个用户^[4,6]. 本文提出一种基于相对信道速率的子载波分配算法, 该算法不是根据子载波上的速率 $r_{k,n}$ 来决定是否把子载波 n 分配给用户 k , 而是根据用户 k 在子载波 n 上的相对速率 $r'_{k,n}$ 来决定

$$r'_{k,n} = \left(\frac{r_{k,n}}{\sum_{i \in \hat{K}} (r_{i,n})} \right) r_{k,n} \quad (3)$$

相对速率 $r'_{k,n}$ 是 $r_{k,n}$ 的一个加权值, 其加权系数为 $r_{k,n}$ 与所有用户在子载波 n 上速率总和的比值. $r'_{k,n}$ 不仅反映了用户 k 在子载波 n 上的速率, 还反映了其他用户在这个子载波上的情况. 这种基于相对速率的子载波分配算法的基本思想是, 尽量把用户 k 在此子载波上速率较高并且其他用户在此子载波上速率较低子载波分配给用户 k . 该子载波分配算法在给用户 k 分配子载波时, 同时考虑了所有用户在此子载波上的速率信息. 这样不仅能有效地给用户 k 分配子载波, 而且还可以防止用户 k 占用过多其他用户好的子载波. 子载波分配算法见图 2.

2.2 分组调度算法

实时业务中的调度算法主要有两个目的: 一是保证分组数据包的时延要求, 二是最大化系统容量. 为了达到以上两个目的, 本文采用三个因子来决定分组调度的策略.

第一个因子为用户队列首个数据包的等待时延 $W_k(t)$. 这个因子用来指示用户队列中数据包需要发送的紧急程度. $W_k(t)$ 越大, 其数据包越接近时延期限, 所以该用户被调度的优先级越大.

第二个因子为当前用户物理层速率 $r_k(t)$ 和物理层平均速率 $\bar{r}_k(t)$ 的比值 $r_k(t)/\bar{r}_k(t)$. 这个因子用来指示用户在时域上的速率信息, 利用该因子可以

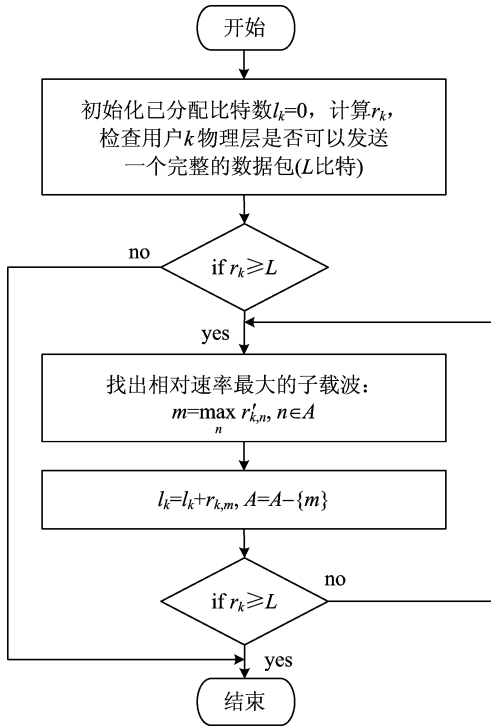


图 2 子载波分配流程图

Fig. 2 Flow chart of subcarrier allocation

挖掘时域上的多用户分集. 其基本思想是利用信道的时变特性, 让用户仅在其信道情况较好时发送数据. 平均速率 $\bar{r}_k(t)$ 通过一个滑动窗口平滑得到

$$\bar{r}_k(t) = \left(1 - \frac{1}{P_w}\right) \bar{r}_k(t-1) + \left(\frac{1}{P_w} r_k(t)\right) \quad (4)$$

式中, P_w 为滑动窗口的大小. $r_k(t)/\bar{r}_k(t)$ 比值越大说明该用户正处在信道情况较好的时候, 该用户被调度的优先级越大.

第三个因子为用户在不同子载波上速率的方差

$$\text{var}_k(t) = \frac{\sum_{n \in A} (r_{k,n}(t))^2}{N_A} - \left(\frac{\sum_{n \in A} r_{k,n}(t)}{N_A}\right)^2 \quad (5)$$

式中, N_A 为未分配的子载波集合 A 中子载波的个数. 这个因子用来指示用户当前各子载波上的速率情况, 用户 k 在不同子载波上速率的方差 $\text{var}_k(t)$ 越大, 表明该用户各子载波上的速率差异很大, 即该用户好子载波与坏子载波的区别很明显. 为了防止其好子载波被其他用户占用, 该用户先被调度的优先级应比那些子载波速率方差值小的用户高.

与 M-LWDF 等调度算法不同, 本文并不是简单地把影响调度策略的各因子直接相乘得出最后调度的判决. 为了有效地控制各因子在调度策略中的权重值, 我们通过一个线性函数把与调度策略有关

的各个因子转换成其对应的优先级. 每次进行分组调度时, 调度模块选出优先级最高的那个用户. 用户 k 在 t 时刻对应的优先级表示为

$$P_k(t) = P_{\text{rate}}(k, t) P_{\text{delay}}(k, t) P_{\text{var}}(k, t) \quad (6)$$

式中, $P_{\text{rate}}(k, t)$ 为 $r_k(t)/\bar{r}_k(t)$ 因子对应的优先级, $P_{\text{delay}}(k, t)$ 为 $W_k(t)$ 因子对应的优先级, $P_{\text{var}}(k, t)$ 为 $\text{var}_k(t)$ 因子对应的优先级.

假设 f 为因子数值, P 为其对应的优先级, 通过一个线性函数 $P = a \cdot f + b$ 把各个因子转换成其对应的优先级. 这个线性函数中 a 和 b 的系数是通过每个因子最小值 f_{\min} 、最大值 f_{\max} 及其优先级设置的最小值 P_{\min} 、最大值 P_{\max} 决定的. 对于 $r_k(t)/\bar{r}_k(t)$ 和 $\text{var}_k(t)$ 因子, 其 f_{\min} 和 f_{\max} 分别为激活用户集合 \hat{K} 中所有用户这两个因子的最小值和最大值; 对于时延因子 $W_k(t)$, 其 f_{\min} 为 0, f_{\max} 为时延期限 T_{\max} . 得到各个因子的 f_{\min} 和 f_{\max} 以后, 我们把各因子的 f_{\min} 和 f_{\max} 分别映射到其对应优先级的 P_{\min} 和 P_{\max}

$$\left. \begin{aligned} P_{\min} &= a \cdot f_{\min} + b \\ P_{\max} &= a \cdot f_{\max} + b \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据式(7)可以求出各因子对应的 a 和 b 的值, 这样每个因子与其优先级之间就建立了一一对应关系, 如图 3 所示.

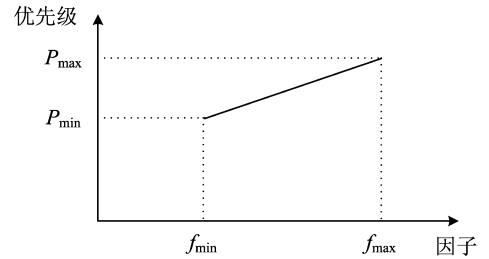


图 3 优先级函数

Fig. 3 Priority function

2.3 分组调度与子载波分配相结合的资源分配与调度算法

根据上述讨论, 资源分配与调度算法具体的实现过程如下:

(I) 初始化: 未分配的子载波集合 $A = \{1, 2, 3, \dots, N\}$, 激活用户集合 $\hat{K} = \{\text{所有队列中有数据包的用户}\}$.

(II) 计算用户在每个子载波的速率 $r_{k,n}$, $k \in \hat{K}$, $n \in A$.

(III) 计算用户物理层的总速率: $r_k = \sum_{n \in A} r_{k,n}$,

$k \in \hat{K}$, 用户物理层的平均速率 $\bar{r}_k, k \in \hat{K}$ 以及用户在 A 中各子载波上速率的方差 $\text{var}_k, k \in \hat{K}$.

(IV) 如果 $r_k < L, k \in \hat{K}$, 则把用户 k 从激活用户集合中删除掉: $\hat{K} = \hat{K} - \{k\}$. 如果 $\hat{K} = \emptyset$, 则分配结束.

(V) 计算每个用户各个因子对应的优先级, 选出总优先级最高的那个用户 i

$$i = \arg \max_k P_{\text{rate}}(k, t) P_{\text{delay}}(k, t) P_{\text{var}}(k, t), k \in \hat{K}$$

(VI) 给用户 i 队列中队首数据包分配子载波, 初始化已分配比特数: $l_i = 0$.

(i) 找出 A 中最大的 $r'_{i,n}, m = \max_n r'_{i,n}, n \in A$;

(ii) $l_i = l_i + r_{i,m}, A = A - \{m\}$;

(iii) 若 $l_i \geq L$, 转步骤 VII, 否则返回步骤 (i).

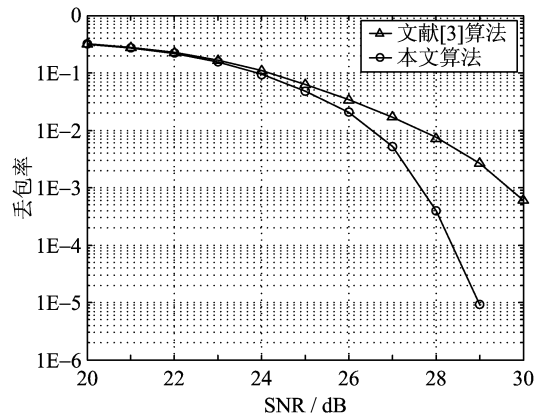
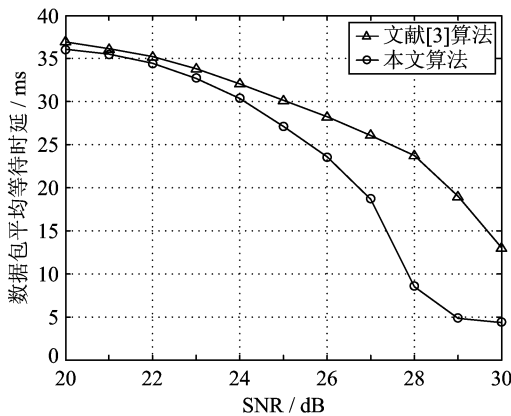
(VII) 若用户 i 队列中没有数据包, 则 $\hat{K} = \hat{K} -$

$\{i\}$. 如果 $A = \emptyset$ 或者 $\hat{K} = \emptyset$, 则分配结束, 否则更新 r_k 和 $\text{var}_k, k \in \hat{K}$, 返回步骤 (IV).

3 仿真结果与分析

仿真中, OFDMA 系统带宽为 10MHz, 划分成 1 024 个子载波, 循环前缀长度为 128. 每 20 个 OFDM 符号组成一帧. 本文仿真采用 COST 207 TU 信道模型, 多径数为 6, 多径间最大时延为 10 μs , 多普勒频移为 20Hz. 物理层采用 QPSK, 16QAM 和 64QAM 三种调制方式, 自适应调制的目标误比特率为 10^{-6} . 假设用户业务数据包的到达服从泊松分布, 每个数据包长度为 2 000 比特, 数据包的时延期限设为 40 ms.

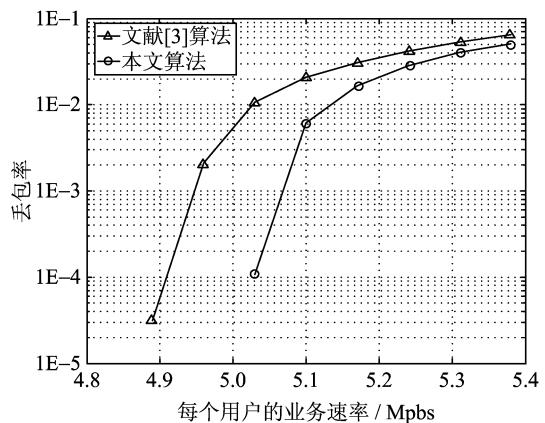
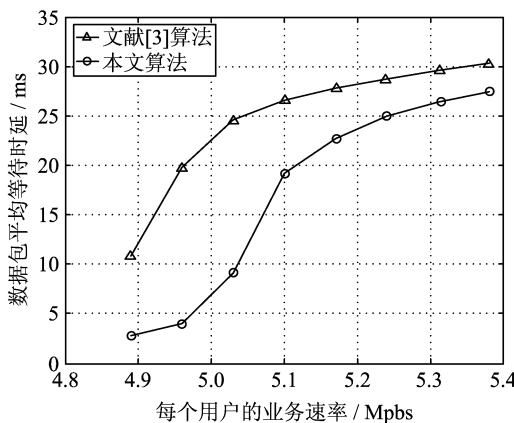
图 4 给出了在 10 个用户下, 每个用户业务速率为 5.17 Mbps 时, 不同信噪比下数据包的平均等待



(a) 数据包的平均等待时延 (b) 系统的丢包率

图 4 不同信噪比下的性能比较

Fig. 4 Comparison of system performance under different SNR



(a) 数据包的平均等待时延 (b) 系统的丢包率

图 5 不同业务速率下的性能比较

Fig. 5 Comparison of system performance under different traffic rate

时延和系统的丢包率. 从图 4 可以看到, 在丢包率较低的时候, 本文算法比文献[3]算法有显著的改善. 例如在图 4(b)中, 丢包率为 10^{-3} 时, 本文算法比文献[3]算法有 2 dB 的功率增益. 比较图 4(a)和图 4(b), 我们还可以看出, 在丢包率一样的情况下, 本文算法的平均等待时延比文献[3]算法有所减少. 例如在丢包率为 10^{-3} 时, 本文的数据包平均等待时延为 12.5 ms 左右, 文献[3]算法为 15 ms 左右.

图 5 给出在 10 个用户下, 信噪比为 26 dB 时, 不同的用户业务速率下数据包的平均等待时延和系统的丢包率. 从图 5 可以看出, 在相同的数据包平均等待时延或者丢包率的条件下, 本文算法能支持更高的用户业务速率. 例如在图 5(b)中, 丢包率为 10^{-3} 时, 与文献[3]的算法相比, 本文算法能使每个用户的业务速率提高 0.1 Mbps.

4 结论

本文提出了一种 OFDMA 系统中实时业务的资源分配与调度算法, 与基于各子载波单独进行资源分配和调度的方式不同, 该算法采用分组调度与子载波分配交替进行的方式来进行资源分配与调度, 这样能从一个整体的角度来进行资源分配及优化. 该资源分配与调度算法分别采用了基于优先级的分组调度和基于相对速率的子载波分配算法, 进一步改善了系统的性能. 仿真结果表明, 该算法无论

是在系统的吞吐量、丢包率还是数据包等待时延方面, 都能获得良好的性能.

参考文献(References)

- [1] Kim K, Koo I, Sung S, et al. Multiple QoS support using M-LWDF in OFDMA adaptive resource [C]// The 13th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks. INSPEC, 2004: 217-222.
- [2] Andrews M, Kumaran K, Ramanan K, et al. Providing quality of service over a shared wireless link [J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(2): 150-154.
- [3] Parag P, Bhashyam S, Aravind R. A subcarrier allocation algorithm for OFDM using buffer and channel state information [C]// IEEE 62nd Vehicular Technology Conference. 2005, 1: 622-625.
- [4] Rhee W, Cioffi J M. Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation [C]//IEEE 51th Vehicular Technology Conference. Tokyo: IEEE Press, 2000, 2: 1 085-1 089.
- [5] Chung S T, Goldsmith A J. Degrees of freedom in adaptive modulation: a unified view [J]. IEEE Transactions on Communications, 2001, 49(9): 1 561-1 571.
- [6] Shen Z, Andrews J G, Evans B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(6): 2 726-2 737.