

OFDMA 系统保证服务质量的分组调度算法

郑培超^① 贾韶军^② 宋瀚涛^①

^①(北京理工大学计算机科学技术学院 北京 100081)

^②(总装备部炮兵防空兵装备技术研究所 北京 100012)

摘要: 在正交频分多址接入系统中采用正比公平算法可以兼顾吞吐量和公平性,有效地提高系统性能。结合正比公平算法,该文提出一种应用于正交频分多址接入系统保证服务质量的分组调度算法。为防止需求速率高但瞬时信道状况差的用户分配过多的子载波,算法使用了动态变化的权重因子。在一次调度过程中,剩余子载波的权重因子可以随着子载波的分配而更新。仿真结果证明,在满足实时业务服务质量的前提下,该算法比正比公平算法具有更好的公平性。

关键词: 正交频分多址接入; 服务质量; 比特加载

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)08-1779-04

A QoS Guaranteed Packet Scheduling Algorithm for OFDMA Systems

Zheng Pei-chao^① Jia Shao-jun^② Song Han-tao^①

^①(School of Computer Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

^②(Equipment and Technologies Research of FA and ADA, General Armament Department, Beijing 100012, China)

Abstract: In Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) systems, utilizing Proportional Fair (PF) algorithm can enhance system capacity, fairness, and performance. PF algorithm is extended, and a quality of service guaranteed packet scheduling algorithm is proposed for OFDMA systems. Users with high data rate requirements but in poor instantaneous channel state may be allocated excessive subcarriers. To prevent that situation, the algorithm uses dynamic weight factor. In a scheduling process, the weight factors of remaining subcarriers update as a subcarrier is allocated. Simulation results show that the proposed algorithm has a better performance in maintaining fairness than PF algorithm for real time services.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiple Access(OFDMA); Quality of Service(QoS); Bit loading

1 引言

正交频分复用(OFDM)技术具有高速传输数据的能力,高效的频谱利用率和抗多径能力^[1]。在所有的超三代移动通信系统(Beyond third Generation mobile communication system, B3G)候选方案中,正交频分多址接入(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)系统最具有竞争力。除了有效对抗符号间干扰,增加频率分集增益外,还具有实现简单和多用户分集的优点^[2]。在OFDMA系统中,利用多用户和频率分集,分组调度算法可以有效的实现容量增益^[3]。

服务质量(Quality of Service, QoS)是指服务性能的聚集效应,它决定用户对特定服务的满意程度。分组调度必须实现用户公平性和吞吐量的折衷^[4],以保证业务的QoS为前提,进行资源的最优化利用^[5]。正比公平(Proportional Fair, PF)

算法能够维持用户长期数据传输吞吐量的大致公平,同时利用短期信道变化情况增大传输效率,在单载波系统中,较好地实现了系统吞吐量和公平性的折衷。有些文献将该算法扩展到了多载波系统,文献[6]提出在子载波分配过程中使用正比公平算法,并结合比特加载,降低了算法的复杂度,但未考虑用户的QoS需求。文献[7, 8]考虑了用户的需求速率和误比特率(Bit Error Rate, BER),对用户采用不同的权重因子,提高了平均满意度。但是在每次子载波分配过程中权重因子固定不变,导致需求速率高但瞬时信道状况差的用户在一次调度过程中分配过多的子载波。

本文研究OFDMA系统下行链路保证QoS的分组调度算法,针对上述文献中存在的不足,提出一种考虑用户QoS业务需求,保证长期及短期公平性的实时业务正比公平(Real Time Proportional Fair, RT-PF)算法。本文在第2节提出系统模型;第3节首先介绍正比公平算法,然后提出RT-PF算法,并分别进行理论分析;最后在小区吞吐量、用户数据速率、用户满意度等方面对两种算法的性能进行仿真和结果分析。

2007-09-18 收到, 2008-01-25 改回

科技部科技基础性工作专项资金重大项目(2002DEA20018)资助课题

2 系统模型

考虑一个多小区的 OFDMA 系统, 每个小区包含 K 个用户, M 个子载波, 每个子载波带宽远小于频率选择性衰落信道的相干带宽, 各子载波在频域上都可以看作是平坦衰落信道。假设用户均匀分布在各个小区中, 用户 k 要求的数据速率为 V_k 。噪声功率谱密度为 N_0 , 并且基站可实时获得每个子载波的信道状态信息(Channel State Information, CSI)。系统要求的误比特率上限为 BER_{\max} , 扇区发射功率上限为 P_{\max} 。在时间片 t , 用户 k 在子载波 m 上能够发送的比特数 $r_{k,m}$ 为

$$r_{k,m} = f(h_{k,m}, P_{k,m}, \text{BER}_{\max}) \quad (1)$$

式中 $h_{k,m}$ 为用户 k 在子载波 m 上的信道增益, $P_{k,m}$ 为用户 k 在子载波 m 上的发射功率:

$$P_{k,m} = \frac{g_k(r_{k,m}, \text{BER}_{\max})}{h_{k,m}^2} \quad (2)$$

式中 $g_k(r_{k,m}, \text{BER}_{\max})$ 是在误比特率上限为 BER_{\max} , 并且信道增益为 1 时, 用户 k 在加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道上接收一个包含 $r_{k,m}$ 比特数据的 OFDM 符号所需的功率。

3 算法分析

3.1 正比公平算法

在基于正比公平算法进行资源分配的系统中, 用户 k 将当前在每个子载波 m 上的信道增益 $h_{k,m}$ 反馈给基站。基站将发射功率等分到各个子载波, 设每个子载波分得的功率为 P_{avg} , 误比特率上限 BER_{\max} 已知, 根据式(1)可以计算出在时间片 t 用户 k 在子载波 m 上支持的最大数据速率 $r_{k,m}(t)$ 。

用户 k 在子载波 m 上的权重因子为 $\frac{r_{k,m}(t)}{R_k(t)}$, 其中, $R_k(t)$ 表示在时间片 t 用户 k 获得的实际平均数据速率^[9]。基站调度时选择权重因子最高的用户 k^* 进行传输:

$$k^* = \arg \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \frac{r_{k,m}(t)}{R_k(t)} \right\} \quad (3)$$

每个时间片结束后, 执行平均数据速率更新过程, $R_k(t)$ 按照下式更新:

$$R_k(t+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) R_k(t) + \frac{1}{t_c} r_k(t), & k = k^* \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) R_k(t), & k \neq k^* \end{cases} \quad (4)$$

式中 t_c 为计算平均数据速率的时间片长度。正比公平算法以用户实际数据速率作为算法优化的约束条件, 同时兼顾公平性, 这对没有数据速率和时延约束要求的非实时业务是适用的。但对于有不同数据速率要求的实时业务用户, 正比公平算法则无法很好的保证不同用户之间的公平性。

3.2 OFDMA 系统保证 QoS 的分组调度算法

将正比公平算法引入 OFDMA 系统中, 并考虑每个用户

k 请求的数据速率, 提出一种实时业务正比公平算法。分组调度在各个扇区中分别进行, 每隔数个传输时间间隔(Transmission Time Interval, TTI)调度一次, 算法分为两个步骤: 子载波分配和比特加载。

3.2.1 子载波分配 算法的第 1 部分为子载波分配, 用户反馈每个子载波上的信道状态信息(Channel State Information, CSI), 引入了用户 k 请求的数据速率 V_k , $r_{k,m}(t)$ 的计算方法与 3.1 节相同。 $R'_k(t)$ 表示在时间片 t 开始的调度过程中用户 k 已经获得的数据速率, 在调度过程中可变。算法调度的权重因子为

$$w_{k,m} = \frac{r_{k,m}(t)}{R'_k(t)} \beta \exp\left(\frac{V_k - R'_k(t)}{V_k(1 + \sqrt{\delta})}\right) \quad (5)$$

式中 $\beta = \frac{V_k - R'_k(t)}{V_k}$, $\delta = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K V_k$ 。

子载波分配步骤如下:

(1)初始化待分配子载波集合 $S = \{1, 2, \dots, M\}$ 。

(2)初始化各个用户 k 在本次调度过程中已经获得的数据速率: $R'_k(t) = 0$ 。

(3)选择最大的 $w_{k,m}$, $m \in S$, 分配子载波 m 给用户 k^* :

$$k^* = \arg \max_k (w_{k,m}) \quad (6)$$

(4)将 m 从集合 S 中清除。

(5)更新用户 k^* 在本次调度过程中已经获得的数据速率:

$$R'_{k^*}(t) = R'_k(t) + r_{k^*,m}(t) \quad (7)$$

根据上式重新计算 β 。

(6)将 β 代入式(5)中, 更新用户 k^* 在剩余子载波上的权重因子 $w_{k^*,m}$ 。

(7) S 为空则所有子载波分配完毕, 结束算法; 否则转到(3)。

$w_{k,m}$ 中的第 1 项因子 $\frac{r_{k,m}(t)}{R'_k(t)}$ 沿用了正比公平算法的权重因子, 第 2 项瞬时加权因子 β 是在一次调度过程中用户 k 的速率需求未满足的比例, 第 3 项因子 $\frac{V_k - R'_k(t)}{V_k(1 + \sqrt{\delta})}$ 为用户 k 在较长一段时间内速率需求未满足的比例, 其中 $\frac{1}{1 + \sqrt{\delta}}$ 为归一化因子。

第 1 项因子中的 $R'_k(t)$ 和第 3 项因子属于长时调节量, $R'_k(t)$ 保证长期的公平性, 但对于有不同速率需求的用户则无法满足公平性。本文为解决异类用户的公平性, 引入了第 3 项因子, 使得长期处于低满意度的用户优先获得调度机会。

第 1 项因子中的 $r_{k,m}(t)$ 和第 2 项因子 β 是短时调节量, $r_{k,m}(t)$ 保证了优先选择信道状况好的用户调度。在一次调度过程中, 如果用户 k 分得了一部分子载波, 其需求得到一定程度的满足, 则降低其在本次调度过程中的速率需求, 从而减小了其在剩余子载波上的权重因子, 避免了速率需求较大

同时瞬时信道状况较差的用户分配过多的子载波, 上述第 5 步的作用就是在调度过程中实时更新 β 。因此, 因子 β 保证了子载波分配的优化和在一次调度过程中的短期公平性。

综上所述, 权重因子 $w_{k,m}$ 实现了瞬时信道状况, 用户实际获得的速率和业务需求速率的折衷。既维持了系统长期的吞吐量, 也维持了长期及短期的公平性。

3.2.2 比特加载 在自适应调制算法中, 比特分配比功率分配更有效^[10]。上述子载波分配过程中的 $r_{k,m}$ 是通过等分功率假设获得的预设速率, 而比特加载过程在每个子载波上的功率不再等分, 因此最后得到的比特数, 即实际速率 $r_{k,m}$ 与 3.2.1 节中的不同。

对扇区中每个用户分别采用贪婪算法(greedy)进行比特加载, 实现最大化频谱效率^[11], 步长为 n 个比特。取用户 k 分得的子载波集合为 $\varepsilon_k = \{1, \dots, M'_k\}$, 系统分配给用户 k 的总功率: $P_k = M'_k P_{\text{avg}}$, 在每个子载波 m 上加载的比特数为 $r_{k,m}$ 。对用户 k 执行比特加载的步骤如下:

(1) 设置每个用户 k 在分得的子载波 m 上的比特数 $r_{k,m} = 0$ 。

(2) 根据式(2)计算每个用户 k 在分得的子载波 m 上增加 n 个比特所需要的功率差:

$$\Delta p_{k,m} = \frac{g_k(r_{k,m} + n, \text{BER}_{\text{max}})}{h_{k,m}^2} - \frac{g_k(r_{k,m}, \text{BER}_{\text{max}})}{h_{k,m}^2} \quad (8)$$

(3) 选择最小的 $\Delta p_{k,m}$, 分配 n 个比特给子载波 m^* 。

$$m^* = \arg \min_m (\Delta p_{k,m}) \quad (9)$$

(4) 更新用户 k 在子载波 m 上加载的比特数:

$$r_{k,m} = r_{k,m} + n \quad (10)$$

(5) 当前分配的总功率达到 P_k 时结束算法, 否则转到(2)。

4 仿真与结果分析

仿真参数如表 1 所示。

仿真结果给出了分别采用 PF 和 RT-PF 两种算法获得的扇区平均吞吐量, 和归一化的用户数据速率累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)。

(1) 由图 1 可以看出, RT-PF 算法的谱效率略高于 PF 算法, 这是因为 RT-PF 算法使用了比特加载过程, 瞬时信道状况好的子载波可分配较多的功率, 因此可获得更高的数据速率。而 PF 算法在每个子载波上使用等分功率, 从而使系统吞吐量相对较低。

(2) 图 2 给出了以需求速率归一化的用户数据速率 CDF 曲线, 本曲线的场景为每扇区 10 个用户, 根据需求速率划分为 3 类用户, 分别为 50, 100, 150, 单位为 kbps。

可以看出 PF 算法的 3 类用户的 CDF 曲线未能与需求速率保持一致, 而 RT-PF 的 3 类用户较好的满足了需求速率, 这说明 RT-PF 算法可根据用户的需求速率满足公平性, 提高了用户平均满意度。这是因为 RT-PF 算法充分考虑了用户的需求速率, 需求高的用户获得调度的机会更大, 因此

表 1 仿真参数设置

参数	设置
小区结构	六边形小区, 19 小区/57 扇区
站距	1732m
小区内用户分布	均匀分布
用户与基站间最短距离	35m
用户移动速率	3km/h
每扇区中用户数	5, 10, 15, 20, 25, 30
总发射功率上限 P_{max}	43dBm
载波频率	2GHz
每扇区带宽	5MHz
每扇区中可用子载波数	300
每个子载波带宽	15kHz
调制编码方案	QPSK:1/5,1/3,1/2,3/4 16QAM:1/2,2/3,3/4,7/8
每个 TTI 长度	0.5ms
每个 TTI 中符号数	8
多普勒频移	5.55Hz
控制延迟(调度、自适应编码调制)	2.0ms(4TTI)

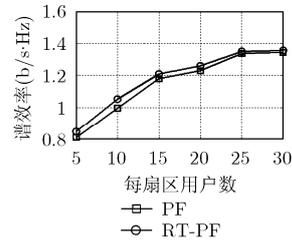


图 1 扇区吞吐量

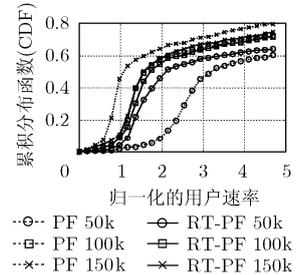


图 2 以需求速率归一化的用户速率累积分布函数(CDF)

能保证系统中总体用户的满意度较为平均。综上所述, 提出的 RT-PF 算法能够较好的按照用户请求的数据速率进行子载波分配, 保证了系统长期的吞吐量, 以及长期和短期的公平性。

5 结束语

本文研究了 OFDMA 系统中保证 QoS 的分组调度算法, 结合正比公平算法, 同时考虑用户对数据速率的要求, 并在子载波分配过程中采用了可动态调整的权重因子。仿真结果表明, 在满足实时业务服务质量的前提下, 提出的算法能够较好的按照用户请求的数据速率进行子载波分配, 既维持了系统长期的吞吐量, 也维持了长期及短期的公平性。式(5)中的因子 β 可以与功率分配问题结合, 将调度算法改造成联合频域、空域、功率的跨层优化算法, 今后将在这方面做进一步的研究。

参考文献

- [1] 刘俊琳, 邓单, 朱近康, 邱玲. 一种基于频域相关实现 OFDM 时频同步的方法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(8): 1354-1359. Liu Jun-lin, Deng Dan, Zhu Jin-kang, and Qiu Ling. OFDM time and frequency synchronization based on frequency domain correlation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(8): 1354-1359.
- [2] Li Guo-qing and Liu Hui. Downlink radio resource allocation for multi-cell OFDMA system[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2006, 5(12): 3451-3459.
- [3] Choi Jung Min, Lee Hyojin, Chung Hyun Kyu, and Lee Jae Hong. Sounding method for proportional fair scheduling in ofdma/fdd uplink[C]. IEEE Vehicular Technology Conference, 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference- VTC2007-Spring, Piscataway, NJ, USA, Apr. 22-25, 2007: 2732-2735.
- [4] Hwang Sungho and Cho Ho-shin. A novel channel allocation and scheduling algorithm in OFDMA system[C]. IEEE Vehicular Technology Conference, 2006 IEEE 64th Vehicular Technology Conference, VTC-2006 Fall, Montreal, QC, Canada, Sep. 25-28, 2006: 1078-1082.
- [5] Mustafa E, Sinem C, and Pravin V. QoS aware adaptive resource allocation techniques for Fair scheduling in OFDMA based broadband wireless access systems[J]. *IEEE Trans. on Broadcasting*, 2003, 49(4): 362-370.
- [6] Suh Changho, Park Seunghoon, and Cho Youngkwon. Efficient algorithm for proportional fairness scheduling in multicast OFDM systems[C]. 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference — VTC 2005-Spring Stockholm: Paving the Path for a Wireless Future, Dallas, Texas, USA, Sep. 25-28, 2005, 61: 1880-1884.
- [7] Morris P D and Athaudage C R N. Fairness based resource allocation for multi-user MIMO-OFDM systems[C]. IEEE Vehicular Technology Conference, V1, 2006 IEEE 63rd Vehicular Technology Conference, VTC 2006-Spring- Proceedings, Melbourne, Australia, May 7-10, 2006, 1: 314-318.
- [8] Patrick S, Sarah K W, Leonard J C J, and Bjorn O. Opportunistic beamforming and scheduling for OFDMA systems[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2007, 55(5): 941-952.
- [9] He Zhi-qiang, Xu Wen-jun, Niu Kai, and Wu Wei-ling. Proportional fairness in OFDMA systems: Upper, lower bounds and reassignment algorithm[C]. World Wireless Congress, Proceedings - 8th World Wireless Congress, WWC 2007, San Francisco, CA, United States, May 21-23, 2007: 190-193.
- [10] 薛金银, 焦秉立. 一种基于最小误码率的 OFDM 自适应比特及功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(7): 1279-1281. Xue Jin-yin and Jiao Bing-li. A minimum bit error rate loading algorithm for OFDM systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(7): 1279-1281.
- [11] Zhang Ying-jun and Letaief Khaled Ben. Multiuser adaptive subcarrier-and-bit allocation with adaptive cell selection for ofdm systems[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2004, 3(5): 1566-1575.
- 郑培超: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为 B3G 系统无线资源管理.
- 贾韶军: 男, 1979 年生, 工程师, 研究方向为下一代移动通信.
- 宋瀚涛: 男, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为数据库、无线网络.