

LTE系统上行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, 莫笑丽³

(1. 北京理工大学计算机科学技术学院 北京 海淀区 100081; 2. 总装备部炮兵防空兵装备技术研究所 北京 朝阳区 100012;
3. 国家海洋局东海信息中心 上海 浦东新区 200137)

【摘要】为提高资源分配过程中不同速率需求的用户间公平性, 结合正比公平算法, 提出一种应用于第三代合作伙伴计划长期演进系统上行链路的分组调度算法。算法按照不同用户的速率需求分配资源, 并在每次调度过程中使用动态变化的权重因子, 避免出现速率需求高但瞬时信道状况差的用户分配过多的资源。仿真结果表明, 该算法相对于正比公平算法更好地解决了不同用户间的公平性。

关键词 频分双工; 长期演进; 服务质量; 单载波频分多址访问

中图分类号 TN929.5

文献标识码 A

doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2009.02.07

QoS Guaranteed Packet Scheduling Algorithm for LTE Uplink Systems

ZHENG Pei-chao¹, JIA Shao-jun², SONG Han-tao¹, and MO Xiao-li³

(1. School of Computer Science and Technology, Beijing Institute of Technology Haidian Beijing 100081;
2. Equipment and Technologies Research of FA and ADA Chaoyang Beijing 100012;
3. East Sea Information Center, State Oceanic Administration Pudong Shanghai 200137)

Abstract To enhance fairness between users with different data rate requirements in resource allocation process, this paper extends the proportional fair (PF) algorithm and proposes a packet scheduling algorithm for the third generation partnership project (3GPP) long term evolution (LTE) uplink systems. The algorithm allocates resources to users according to their data rate requirements. The weight factor in the algorithm updates in every scheduling process, so that users with high data rate requirement but in bad instantaneous channel state will not be allocated excessive resource. Simulation results show that the proposed algorithm has a better performance in fairness between different users than PF algorithm.

Key words frequency division duplexing; long term evolution; quality of service; single carrier frequency division multiple accessing

为实现无线通信的宽带化, 并应对微波存取全球互通(worldwide interoperability for microwave access, WiMax)技术的挑战, 第三代合作伙伴计划(3GPP)制定了长期演进(LTE)系统方案。LTE系统支持从1.25~20 MHz的可变带宽^[1], 以满足未来移动服务的需求。在20 MHz带宽条件下, 可达到下行100 Mb/s、上行50 Mb/s的峰值速率^[2], 支持高达350 km/h的移动速率。LTE方案按照双工方式不同, 分为频分双工(FDD)和时分双工(time division duplexing, TDD)两类, 本文对FDD LTE进行了研究。

LTE方案中引入了正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)、多入多出(multiple input multiple output, MIMO)等先进技术来

提高系统的频谱效率。OFDM技术把可用的信道带宽划分成若干个独立的平坦慢衰落子信道, 从而更适合与MIMO技术结合^[3]。由于信号在每个子信道上的衰落不同, 可以结合自适应调制编码技术来提高系统的性能^[4]。FDD LTE下行采用正交频分多址接入(orthogonal frequency division multiplexing, OFDMA)技术^[5], 由于发射频域信号, OFDM信号的峰均功率比(peak to average power ratio, PAPR)较高^[6], 出于对手持终端功放成本和电池寿命的考虑, 在上行采用具有较低PAPR的单载波技术, 即单载波频分多址访问(single carrier frequency division multiple accessing, SC-FDMA)技术。

分组调度算法可以在满足用户间公平性的前提

收稿日期: 2007-12-30; 修回日期: 2008-06-10

基金项目: 科技部科技基础性工作专项资金重大项目(2002DEA20018)

作者简介: 郑培超(1978-), 男, 博士生, 主要从事B3G系统无线资源管理方面的研究。

下, 有效提高业务的服务质量(QoS), 进行资源的优化分配^[7]。正比公平(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中。也有些文献将该算法扩展到了多载波系统, 文献[8]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[9-10]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。

结合正比公平算法, 本文提出一种适用于FDD LTE上行链路保证QoS的分组调度算法, 考虑用户的需求速率, 并在扇区吞吐量、用户速率累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)、系统满意率等方面对性能进行仿真和结果分析。

1 系统模型

考虑一个多小区的FDD LTE系统, 所有小区具有相同半径, 基站被放置在每个小区的中心位置, 采用一发两收天线。每个小区包含K个用户, M个物理资源块(physical resource block, PRB)。每个PRB占用带宽B kHz, 包含N个子载波。每个用户k的需求速率为 V_k , 目标误比特率为 ε 。系统采用自适应调制编码(adaptive modulation and coding, AMC)技术, 根据瞬时信道状态信息, 在共享信道上应用不同的调制编码方案(modulation and coding scheme, MCS), 以获得最大的传输效率。调制编码方案采用BPSK、QPSK、16QAM三种, 在物理层的差错控制采用混合自动重传请求(hybrid automatic repeat request, HARQ)技术, 资源调度的延迟为N个传输时间间隔(transmission time interval, TTI)。

设在时间片t用户k在子载波m上的信道功率增益为 $h_{k,m}^2$, 在该子载波上加载的功率为 $p_{k,m}$, 则用户k在该子载波m上能够获得的瞬时速率为:

$$r_{k,m}(t) = f(h_{k,m}^2, p_{k,m}, \varepsilon) \quad (1)$$

对于不同的调制编码方式, $f(\cdot)$ 的形式也不同, 以MQAM调制方式为例, 并考虑整数比特限制, $r_{k,m}(t)$ 可表示为^[11]:

$$r_{k,m}(t) = \left\lfloor \log_2 \left(1 - \frac{1.5h_{k,m}^2 p_{k,m}}{\ln(5\varepsilon) \cdot \sigma^2} \right) \right\rfloor \quad (2)$$

式中 σ^2 为信道中加性高斯白噪声的方差。

2 算法分析

LTE系统的上行吞吐量受来自相邻小区的同频干扰影响较为严重, 而每个基站各自独立进行资源调度, 建立目标方程时无法预知和控制来自相邻小区的干扰。因此求解上行资源分配问题不适合采用最优化理论, 只能采用次优算法。

在基于正比公平算法进行资源分配的多载波系统中, 基站根据每个用户k反馈的信道功率增益来估计其在每个子载波m上所能支持的最大数据速率 $r_{k,m}(t)$ 。在每次调度过程中, 基站调度器将子载波m分配给权重因子最高的用户 k^* ^[12]:

$$k^* = \arg \max_{k=1,2,\dots,K} \left\{ \frac{r_{k,m}(t)}{R_k(t)} \right\} \quad (3)$$

式中 $R_k(t)$ 为用户k当前所获得的平均速率, 每次调度过程结束后进行更新。

本文将正比公平算法引入LTE系统上行链路, 考虑每个用户k的需求速率 V_k , 提出一种保证用户满意度的公平算法(user satisfaction guaranteed fair, USGF)。传输业务类型为流媒体业务, 分组调度在各个扇区中分别进行, 资源的分配以PRB为单位。首先采用小区间慢速开环功率控制方案为用户分配功率, 然后根据式(2)估计在时间片t每个用户k在每个物理资源块m上能够获得的瞬时速率为 $r_{k,m}(t)$, $r_{k,m}(t)$ 是在该物理资源块中所有子载波上的速率之和。算法调度的权重因子为:

$$w_{k,m} = \frac{r_{k,m}(t)(V_k - R'_k(t))}{R_k(t)} \exp\left(\frac{V_k - R_k(t)}{V_k}\right) \quad (4)$$

式中 $R'_k(t)$ 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。 $R_k(t)$ 在每个时间片结束之后进行更新, 计算公式为:

$$R_k(t+1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)R_k(t) + \frac{1}{t_c} \sum_{m=1}^M r'_{k,m}(t) \quad (5)$$

式中 t_c 为计算平均数据速率的时间片长度; $r'_{k,m}(t)$ 为时间片t用户k在物理资源块m上实际获得的瞬时数据速率。当用户k分配到物理资源块m时, $r'_{k,m}(t) = r_{k,m}(t)$; 否则 $r'_{k,m}(t) = 0$ 。

物理资源块的分配步骤如下:

- (1) 初始化待分配物理资源块集合 $S = \{1, 2, \dots, M\}$ 。
- (2) 初始化每个用户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 $w_{k,m}$ 、分配物理资源块 m^* 给用户 k^* 。

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

(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速率:

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

(6) 将 $R'_k(t)$ 代入式(4), 更新用户 k^* 在剩余物理资源块上的权重因子。

(7) S 为空则分配过程完毕, 结束算法; 否则转到步骤(3)。

式(4)中的第1项因子 $r_{k,m}(t)$ 和第2项因子 $(V_k - R'_k(t))$ 为短时调节量。 $r_{k,m}(t)$ 保证了优先选择瞬时信道状况好的用户进行分配。由于考虑了用户的需求速率, 如果使用固定不变的权重因子, 则瞬时信道状况差同时需求速率高的用户会分配过多的物理资源块, 从而引起系统整体吞吐量下降。针对上述问题, 使用动态变化的因子 $(V_k - R'_k(t))$, 保证了短期内资源分配的合理性和公平性。

式(4)第3项因子 $R_k(t)$ 和第4项因子 $\exp\left(\frac{V_k - R_k(t)}{V_k}\right)$ 属于长时调节量, 分别保证长期处于低速率和低满意度的用户优先获得资源。

综上所述, 权重因子 $w_{k,m}$ 实现了瞬时信道状况、业务需求速率和用户实际速率的折中。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。

正比公平算法以用户的瞬时信道状况作为算法优化的约束条件, 同时兼顾公平性, 这对于没有数据速率要求的业务是适用的。USGF算法考虑了不同用户的需求速率, 相对于正比公平算法能够更好地解决这类场景下的用户间公平性。

3 仿真与结果分析

按照需求速率不同, 将用户等分为两类, 分别为40、80, 单位为kb/s。用户满意度定义为:

$$s_k = \varphi\left(\frac{R_k(t)}{V_k}\right) \quad (8)$$

式中 函数 $\varphi(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 1 \\ x & x < 1 \end{cases}$ 。

当用户的满意度达到 ρ 时, 可认为用户对服务质量满意, 系统满意率是系统中满意的用户数占总用户数的比例, ρ 取95%。

本文对USGF算法、PF算法和文献[9]提出的WPF算法进行仿真, 其中, WPF算法调度的权重因子为 $V_k r_{k,m}(t) / R_k(t)$ 。仿真参数如表1所示。

由仿真结果可知:

(1) 图1给出了分别采用3种算法获得的扇区平均吞吐量。其中, USGF算法的谱效率低于PF算法4.4%, 这是因为前者在资源分配过程中考虑了用户的需求速率, 部分需求速率高但瞬时信道状况差的用户引起了系统吞吐量的下降。USGF算法又比WPF算法高出7%的谱效率, 原因在于虽然两种算法都考虑了用户的需求速率从而引起谱效率的下降, 但是USGF算法在物理资源块的分配过程中随着用户需求的满足逐渐降低其权重因子, 防止需求高的用户占用过多的子载波。而WPF算法在资源分配过程中使用的是固定不变的权重因子, 需求速率高但信道状况较差的用户会占用过多的资源, 但只能获得较低的速率, 因此最终导致过多的系统吞吐量损失。

表1 仿真参数

参数	数值
小区结构	六边形小区, 19小区/57扇区
小区半径/km	1
小区内用户分布	均匀分布
用户与基站最短距离/m	35
用户移动速率/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	3
阴影衰落方差/dB	8
阴影衰落相关距离/m	50
阴影衰落相关系数	小区间 0.5 扇区间 1.0
每扇区带宽/MHz	1.25
PRB带宽/kHz	180
调制编码方案	BPSK:1/5,1/3 QPSK:1/5,1/3,1/2,3/4 16QAM:1/2,2/3,3/4,5/6
每TTI中符号数	5
多普勒频移/Hz	5.55
控制延迟(调度、AMC)/ms	2.0(2TTI)

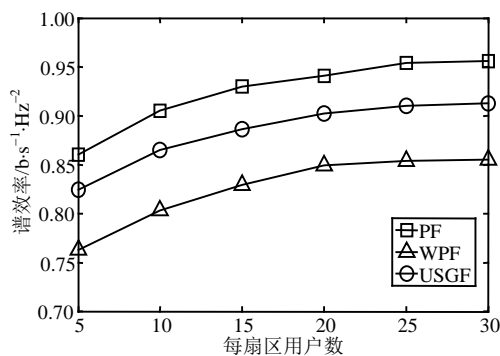


图1 扇区平均吞吐量

(2) 图2给出了分别采用三种算法获得的用户数

据速率累积分布函数, 根据用户的需求速率对曲线做了归一化, 每扇区用户数为10。可以看出, 采用USGF算法和WPF算法的两类用户曲线都较为接近, 而采用PF算法的两类用户满意度差别较大。这说明USGF算法和WPF算法均可按照用户的不同需求速率进行资源分配, 相对于PF算法更好地实现了不同用户间的公平性。由于USGF算法能够防止需求速率高但瞬时信道状况差的用户占用过多的资源, 因此采用USGF算法获得的用户速率要高于WPF算法。

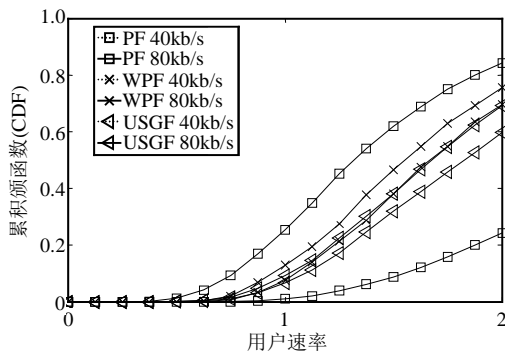


图2 以需求速率归一化的用户数据速率累积分布函数

(3) 从图2还可以看出, 在系统满意率方面, USGF算法也优于其他两种算法。在本文仿真过程中, USGF算法获得了比PF算法高出约7%的系统满意率, 比WPF算法高出约2.5%。

用户满意度代表了系统对用户QoS的满足程度, 而用户的QoS又是移动通信系统必须要保证的重要目标, 因此目前移动通信的标准化组织和厂商普遍认为系统满意率相对于系统吞吐量更为重要。由此可见, USGF算法相对于PF算法以4.4%的吞吐量损失换来7%系统满意率的提升是可以接受的。

4 结 论

本文研究了FDD LTE系统上行链路保证QoS的分组调度算法, 传统的正比公平算法解决了相同速率需求的用户间公平性, 而对于具有不同速率需求的用户则无法较好地满足。本文的算法对正比公平算法进行改进, 考虑用户的需求速率, 并使用了动态变化的权重因子。仿真结果表明, 在FDD LTE系统上行链路中, 该算法相对于正比公平算法以较低的吞吐量损失换来了较高系统满意率的提升, 并在提高具有不同速率需求的用户间公平性方面具有较好的优势。

参 考 文 献

[1] ANCORA A, BONA C, SLOCK D T M, et al. Down-

sampling impulse response least-squares channel estimation for LTE OFDMA[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing-Proceedings. Honolulu, HI, United States: IEEE, 2007: 293-296.

- [2] TSUTSUI M, SEKI H. Throughput performance of downlink MIMO transmission with multi-beam selection using a novel codebook[C]//2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference—VTC2007-Spring. Dublin, Ireland: IEEE, 2007: 476-480.
- [3] JUNG Y, KIM J, LEE S, et al. Design and implementation of MIMO-OFDM baseband processor for high-speed wireless LANs[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2007, 54(7): 631-635.
- [4] ELBAAMRANI K, OUAHMAN A A, ALLAKI S. Rate adaptive resource allocation for OFDM downlink transmission[J]. AEU—International Journal of Electronics and Communications, 2007, 61(1): 30-34.
- [5] POKHARIYAL A, PEDERSEN K I, MONGHAL G, et al. HARQ aware frequency domain packet scheduler with different degrees of fairness for the UTRAN long term evolution[C]//2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference—VTC2007-Spring. Dublin, Ireland: IEEE, 2007: 2761-2765.
- [6] SEZGINER S, SARI H. Metric-based symbol predistortion techniques for peak power reduction in OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(7): 2622-2629.
- [7] ERGEN M, COLERI S, VARAIYA P. Qos aware adaptive resource allocation techniques for fair scheduling in OFDMA based broadband wireless access systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2003, 49(4): 362-370.
- [8] CHANGHO S, SEUNGHOOON P, YOUNGKWON C. Efficient algorithm for proportional fairness scheduling in multicast OFDM systems[C]//2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference—VTC2005-Spring Stockholm: Paving the Path for a Wireless Future. Dallas, Texas, USA: IEEE, 2005: 1880-1884.
- [9] MORRIS P D, ATHAUDAGE C R N. Fairness based resource allocation for multi-user MIMO-OFDM systems[C]//2006 IEEE 63rd Vehicular Technology Conference, VTC 2006-Spring-Proceedings. Melbourne, Australia: IEEE, 2006: 314-318.
- [10] SVEDMAN P, WILSON S K, CIMINI J, et al. Opportunistic beamforming and scheduling for OFDMA systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(5): 941-952.
- [11] YU G D, ZHANG Z Y, CHEN Y, et al. A novel resource allocation algorithm for real-time services in multiuser OFDM systems[C]//2006 IEEE 63rd Vehicular Technology Conference—VTC 2006-Spring-Proceedings. Melbourne, Australia: IEEE, 2006: 1156-1160.
- [12] ZHU H J, Hafez R H M. Scheduling schemes for multimedia service in wireless OFDM systems[J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14(5): 99-105.

编辑 漆 蓉