

# 一种超高速无线局域网多用户多业务调度算法

刘 杨, 夏玮玮, 宋铁成, 沈连丰

(东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

[摘要] 针对超高速无线局域网的系统性能要求, 提出了一种新的超高速无线局域网多用户多业务 MUMS( Multi-user and Multi-service) 调度算法. 基于对不同业务的服务质量 QoS( Quality of Service) 要求、用户信道状态信息 CSI ( Channel State Information) 及服务队列信息的综合分析, 此算法对业务和用户进行分层调度. 仿真结果表明, 在满足不同业务 QoS 需求且保证用户公平性的同时, 提出的调度算法能有效地降低丢包率, 提高系统吞吐量.

[关键词] 超高速无线局域网, 调度算法, 服务质量( QoS), 分层调度

[中图分类号] TN929 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2012)04-0044-06

## A Multiuser and Multi-Service Scheduling Algorithm in New Ultra-High Throughput Wireless Local Area Network

Liu Yang, Xia Weiwei, Song Tiecheng, Shen Lianfeng

( School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In this paper, a novel multiuser and multi-service( MUMS) scheduling algorithm in the new ultra-high throughput ( NUHT) wireless local area network( WLAN) system is proposed to meet the system performance requirements, which conducts a hierarchical scheduling of users and services based on a comprehensive analysis of quality of service( QoS) requirements, queue state information( QSI) and channel state information( CSI). The simulation results show that the proposed MUMS algorithm achieves a higher total throughput, a smaller packet loss rate as well as a good support of the QoS requirements and guarantees the fairness among users compared with the existing scheduling algorithms.

**Key words:** NUHT WLAN, scheduling algorithm, QoS, hierarchical scheduling

超高速无线局域网的目标是在保证业务 QoS( Quality of Service) 要求的同时, 实现系统的高吞吐量性能. 调度算法的研究在其中起着关键性的作用<sup>[1]</sup>. 针对调度算法的研究, 前人已经做了很多工作. PF( Proportional Fair) 算法考虑了用户公平性要求, 但该算法没有考虑多业务的不同 QoS 需求, 不能满足实时业务的要求<sup>[2]</sup>. MAX-WEIGHT 算法在 PF 算法的基础上引入队列状态信息因子, 在公平性和吞吐量上优于 PF 算法<sup>[3]</sup>. 修正的最大加权时延优先( M-LWDF) 算法在 PF 算法的基础上, 考虑了业务的时延参数, 因而可以更好地满足实时业务的要求<sup>[4]</sup>. 为了更有效地支持多业务的 QoS 要求, 研究者提出了 EXP/PF 算法<sup>[5]</sup>. 上述算法在用户公平性和系统吞吐量性能上却没有达到较好的平衡<sup>[6]</sup>.

本文提出了一种超高速无线局域网多用户多业务 MUMS( Multi-user and Multi-service) 调度算法, 此算法考虑了 4 种业务类型, 根据 4 种业务不同的 QoS 要求, 分别赋予不同的权值. 在业务调度的基础上, 再综合 MAC( Media Access Control) 层和 PHY( Physical) 层信息, 进行用户调度.

## 1 系统模型与业务描述

### 1.1 系统模型

本文研究集中控制式的无线局域网系统模型<sup>[1-7]</sup>, 仅考虑单小区下行链路传输情况, 该系统模型的应用场景如图 1 所示. 系统主要包含中心控制点 CAP( Central Access Point) 和终端用户 STA( Station) 两类设

收稿日期: 2012-11-10.

基金项目: 国家重大专项基金( 2010ZX03005-001-01)、国家自然科学基金( 61171081).

通讯联系人: 宋铁成, 教授, 博导, 研究方向: 无线通信领域. E-mail: songtc@seu.edu.cn

备. 小区中心控制节点(CAP)集中控制 $N$ 个用户站(STA),每个STA在CAP中对应一个服务队列,该服务队列缓存STA将要接收的数据. 一个服务队列包含多种业务类型数据包,若数据包在队列中等待发送的时间超过最大允许时延,该数据包将被丢弃. 本文假设CAP中 $N$ 个服务队列均为无限长队列.

该系统采用了集中调度的媒体接入控制(MAC)协议,系统采用时分TDD(Time Division Duplexing)的帧结构,如图2所示. 每个TDD帧分为下行和上行调度周期,每帧开始之前,在MAC层执行调度算法.

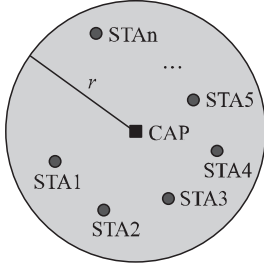


图1 单小区多用户场景  
Fig.1 Single cell scenario

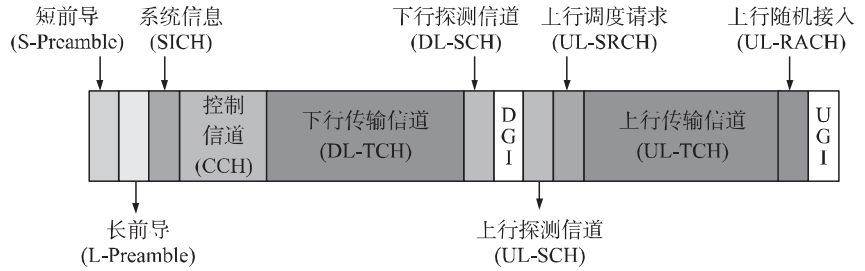


图2 系统帧结构图  
Fig.2 System frame structure

## 1.2 业务描述

本文研究的超高速无线局域网系统中,每个服务队列包含多种类型业务数据,一般而言不同队列的业务集合是不同的. 假设系统有 $N$ 个STA,每个STA的服务队列最多有 $M$ 种业务类型的数据.

在本文中,我们考虑 $M=4$ ,即业务被分为4种类型:主动授权业务UGS(Unsolicited Grant Service)、实时轮询业务rtPS(Real-time Polling Service)、非实时轮询业务nrtPS(Non-real-time Polling Service)和尽力而为业务BE(Best Effort)<sup>[8]</sup>.

UGS业务用于传输固定速率实时数据业务,例如T1/E1以及没有静默压缩的VoIP等. 在本调度算法的设计中,对该业务考虑到的QoS参数有业务优先级、最大连续业务速率、最大时延要求. rtPS业务用于支持可变速率实时业务,是为了满足动态变化的业务需求而设计,例如,MPEG视频业务. 在调度算法的设计中,对该业务考虑到的QoS参数为:业务优先级、最小保证速率、最大保留速率和最大时延要求. nrtPS业务支持非周期变长分组的非实时数据流,例如,有保证最小速率要求的因特网接入. nrtPS业务为非实时业务,对时延没有敏感要求. 在调度算法中,只考虑其业务优先级和最小保证速率两方面的要求. BE业务支持非实时无任何速率和时延抖动要求的分组数据业务,如E-mail和短信等,不要求提高吞吐量和时延保证. BE业务是尽力而为业务,4种业务中,BE业务优先级最低.

## 2 调度算法

本调度算法综合考虑MAC层信息和PHY层信息,对业务和用户进行分层调度. 对业务的调度主要关心不同业务类型的不同QoS要求,针对4种业务,分别对其赋予权值. 对业务赋权后,再分别对各STA的服务队列按权值排序,保证各STA服务队列队首的业务权值最高,权值越高说明该业务待传输的紧迫性越高. 对用户的调度综合考虑了用户信道状态信息和用户服务队列信息,保证业务量大、信道条件好、队首业务权值高的用户能得到优先调度. 调度器流程如图3所示,其中用户队列中不同的阴影表示不同业务类型的数据包.

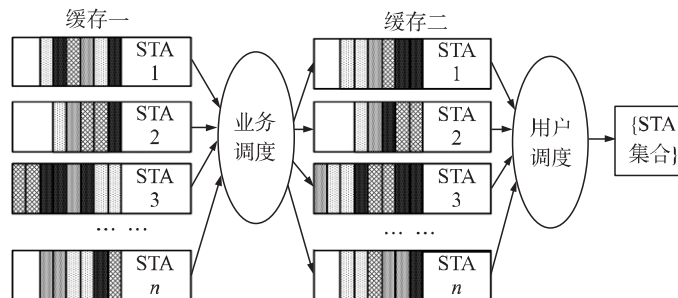


图3 分层调度器总体结构图  
Fig.3 Structure of the hierarchical scheduler

## 2.1 业务调度

业务调度阶段对各 STA 服务队列的业务进行赋权,根据权重值对业务进行排序,使权重值大的业务排在 STA 服务队列的前端.不同业务类型的数据包拥有不同的业务优先级和 QoS 要求,针对不同的业务定义不同的权重值计算方法.定义时刻  $t$  时,第  $i$  种业务类型的数据包权重为  $\Phi_i(t)$ .

UGS 业务用于传输固定速率实时数据业务,其业务优先级因子为  $\beta_{UGS}$ .其权重计算如下:

$$\Phi_i(t) = \begin{cases} 0 & \eta_i(t) = 0, \\ \beta_{UGS} & \eta_i(t) \neq 0, \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\eta_i(t)$  是在截止时间  $t$  时,业务的实际平均传输速率,平均传输速率根据下式进行更新:

$$\eta_i(t+1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) \eta_i(t) + \frac{1}{t_c} R_i(t) \mid_{i=i(t)}, \quad (2)$$

其中  $R_i(t)$  为  $t$  时刻当该业务被调度时获得的速率;  $t_c$  为一阶 IIR 滑动窗口宽度.

rtPS 业务权重定义如下:

$$\Phi_i(t) = \begin{cases} \beta_{rtPS}, & F_i \leq 1, F'_i \leq 1, F''_i \leq 1, \eta_i(t) \neq 0 \\ \beta_{rtPS} \exp(F''_i), & F_i \leq 1, F'_i \leq 1, F''_i > 1, \eta_i(t) \neq 0 \\ \beta_{rtPS} F_i, & F_i > 1, F'_i > 1, F''_i \leq 1, \eta_i(t) \neq 0 \\ \beta_{rtPS} F_i \exp(F''_i), & F_i > 1, F'_i > 1, F''_i > 1, \eta_i(t) \neq 0 \\ 0, & \eta_i(t) = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

其中,

$$F_i = \exp\left(\frac{\eta_{\min} - \eta_i(t)}{\eta_{\min}}\right), \quad (4)$$

$$F'_i = \exp\left(\frac{\eta_i(t) - \eta_{\max}}{\eta_{\max}}\right), \quad (5)$$

$$F''_i = \frac{T_g}{T_i - W_i(t)}. \quad (6)$$

rtPS 业务优先级因子为  $\beta_{rtPS}$ ,有最小、最大速率要求与时延 QoS 要求.其中  $\eta_{\min}$  和  $\eta_{\max}$  分别代表最小和最大速率要求;  $T_i$  表示 rtPS 业务允许的最大时延;  $T_g$  为时延保护间隔;  $W_i(t)$  为数据包等待时间.  $F_i > 1$  说明业务的平均速率小于最小速率要求,此时应该提高该业务的权重值,增大业务被调度的概率.  $F'_i > 1$  说明业务的平均速率大于最大速率要求,此时应该降低该业务的权重值,减小业务被调度的概率.  $F''_i > 1$  说明该业务数据包可以继续等待的时间已经小于时延保护间隔,若再不被调度,该数据包将会因为等待时间超过最大允许时延而被丢弃,所以应该加大其权重值,增大其被调度的概率.

对于 nrtPS 业务,其 QoS 只有最小、最大速率要求,而没有时延要求,其权重计算如下:

$$\Phi_i(t) = \begin{cases} \beta_{nrtPS}, & F_i \leq 1, F'_i \leq 1, \eta_i(t) \neq 0, \\ \beta_{nrtPS} F_i, & F_i > 1, F'_i > 1, \eta_i(t) \neq 0, \\ 0, & \eta_i(t) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

其中,参数定义如同 rtPS 业务,在 QoS 要求得不到保证时,要改变业务权重,增大或降低其被调度的概率.

BE 业务是尽力而为业务,其业务优先级最低.只有其他业务权重降低时,BE 业务才能得到调度机会.其权重定义如下:

$$\Phi_i(t) = \begin{cases} 0, & \eta_i(t) = 0, \\ \beta_{BE}, & \eta_i(t) \neq 0. \end{cases} \quad (8)$$

4 种业务优先级因子大小遵循如下顺序:

$$\beta_{UGS} > \beta_{rtPS} > \beta_{nrtPS} > \beta_{BE}. \quad (9)$$

## 2.2 用户调度

根据上述业务调度,各 STA 的服务队列排序完成后,就对用户进行分组调度,确定下一帧向哪些用户传输数据.通过综合考虑各 STA 当前被调度时可获得的传输速率、统计平均速率、业务类型以及服务队列大小等信息,计算效用函数  $U_k$ .具有最大效用函数的用户最先被选择,然后通过块正交化准则,选出本次

调度的剩余 STA 分组,从而最大化系统容量,并保证系统中各 STA 的公平性.

$$U_k = \arg\max_i \frac{R_i(t) * K_i(t) * \Phi_i(t)}{r_i(t)}, \quad (10)$$

其中  $K_i(t)$  表示第  $i$  个用户的服务队列大小. 引入服务队列信息  $K_i(t)$ , 使得业务量多的用户能够得到优先调度.  $\Phi_i(t)$  表示第  $i$  个用户的服务队列队首数据包的权重值. 引入  $\Phi_i(t)$ , 充分考虑了队首数据包的调度权重值. 权重值越大需要被调度的紧迫性越高, 从而使得拥有高紧迫性业务的用户得到优先调度.

用户调度的算法步骤如下:

第一步: 初始化用户备选集合  $\Omega = \{1, 2, \dots, N\}$ , 已选集合  $\Lambda = \emptyset$ .

第二步: 计算  $s_1 = \arg\max_k U_k$ . 令  $\Omega = \Omega - \{s_1\}$ ,  $\Lambda = \Lambda + \{s_1\}$ . 计算  $s_1$  的速率  $R_1$ , 并取  $R_{\text{tmp}} = R_1$ . 该步骤计算备选集合中各用户的效用函数, 选择具有最大效用函数的用户  $s_1$  加入已选集合, 同时更新备选集合与已选集合, 并计算  $s_1$  的吞吐量标记为  $R_{\text{tmp}}$ .

第三步:

[1] 对于每个  $k \in \Omega$ , 使  $\Lambda_k = \Lambda + \{s_k\}$ ; 计算系统吞吐量  $R_k$ . 该步骤从备选集合中依次选择一个用户加入已选集合, 同时计算加入该用户后已选集合的系统吞吐量, 标记为  $R_k$ .

[2] 令  $s_i = \arg\max_k R_k$ , 其中  $k \in \Omega$ . 该步骤选择使得系统吞吐量最大的用户为新增用户.

[3] 如果  $\max_k R_k < R_{\text{tmp}}$ ,  $k \in \Omega$ , 选择结束, 选出用户集合为  $\Lambda$ ; 否则, 令  $\Omega = \Omega - \{s_i\}$ ,  $\Lambda = \Lambda + \{s_i\}$ ,  $R_{\text{tmp}} = \max_k R_k$ ,  $k \in \Omega$ . 转到第三步. 该步骤比较新加入一个用户后的系统吞吐量与原已选集合的吞吐量, 若加入用户后, 系统吞吐量上升, 则该新增用户加入已选集合. 同时更新备选集合与已选集合, 将此时的系统吞吐量标记为  $R_{\text{tmp}}$ , 并转到第三步继续执行选择过程. 若加入用户后, 系统吞吐量下降, 则选择过程结束, 已选集合中的用户即最终被选择的用户.

### 3 仿真结果

本文对 PF 调度算法、M-LWDF 调度算法和提出的 MUMS 调度算法 3 种算法分别进行了系统仿真, 并比较了这 3 种算法的性能. 系统仿真参数见表 1. 本文根据 on-off 模型对 4 种业务进行建模, 各业务仿真设置参数如表 2 所示.

表 1 系统仿真参数表

Table 1 System simulation parameters

假设与参数	说明
仿真场景	圆形小区, 终端用户随机分布在半径为 100 m 的圆周内.
载频	5.8 GHz
最大多普勒	6 Hz
CAP 带宽	20 MHz
CAP 天线配置	8 根
STA 天线配置	2 根
信道模型	IEEE 802.11ac D

表 2 业务建模参数设置表

Table 2 Service model parameters

业务	On time/s	Off time/s	到达时间间隔/s	持续时间/s
UGS	always	0	0.03	1
rtPS	$\exp(0.1)$	$\exp(0.01)$	$\exp(0.005)$	2
ntPS	$\exp(0.1)$	$\exp(0.01)$	$\exp(0.0005)$	2
BE	$\exp(0.1)$	$\exp(0.01)$	$\exp(0.0005)$	2

图 4 给出了不同算法的吞吐量性能比较, MUMS 调度算法吞吐量性能介于 PF 算法和 M-LWDF 算法之间. PF 算法总是选择具有相对最高速率的业务进行传输, 从而吞吐量最高, 而 MUMS 调度算法和 M-LWDF 调度算法还综合考虑了业务 QoS 要求, 故吞吐量略低.

图5给出了不同算法的公平性指数比较. 采用的公平性指数(FI)<sup>[9]</sup> 定义为:

$$FI = \frac{\left( \sum_i \frac{Th_i}{\alpha_i} \right)^2}{N \sum_i \left( \frac{Th_i}{\alpha_i} \right)^2}, \quad (11)$$

其中,  $N$  表示用户数目;  $Th_i$  表示用户  $i$  获得的吞吐量;  $\alpha_i$  表示用户权重(本文取  $\alpha_i=1$ ). 该公平性指数的定义表明, 用户间公平性越好, 该指数的值越大, 也即值越接近1. 从图中可以看出, MUMS 调度算法和 PF 算法的公平性相差无几, 都具有非常好的公平性. 而 M-LWDF 算法追求时延性能的满足, 其公平性较差.

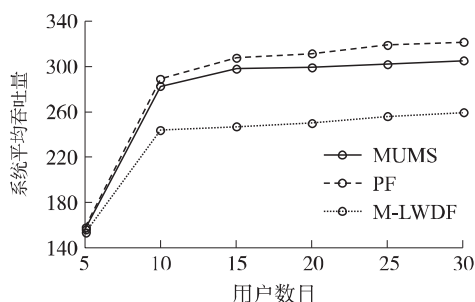


图4 系统吞吐量比较图

Fig. 4 Comparison of system throughput

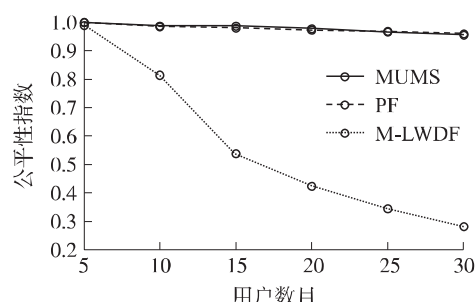


图5 用户公平性比较图

Fig. 5 Comparison of fairness index

图6、图7分别给出了不同算法的UGS时延性能与rtPS时延性能比较. 从图中均可以看出, 在用户数较少情况下, MUMS 调度算法时延性能略优于 M-LWDF 算法, 在用户数较多的情况下, 时延性能略低于 M-LWDF 算法. 总体来说, 二者都具有良好的时延性能. 而 PF 算法没有考虑业务时延要求, 从而具有较差的时延性能.

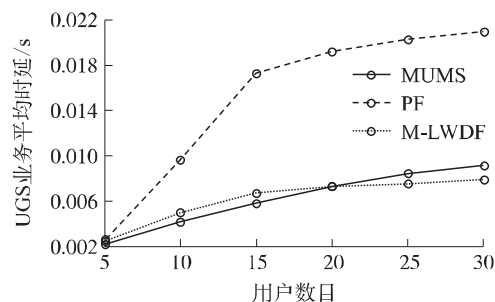


图6 UGS 业务时延比较图

Fig. 6 Comparison of delay of UGS

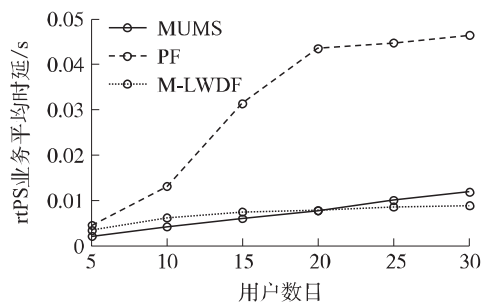


图7 rtPS 业务时延比较图

Fig. 7 Comparison of delay of rtPS

图8、图9分别给出了不同算法的UGS丢包率与rtPS丢包率的比较. MUMS 调度算法丢包率最低, 其次是 M-LWDF 算法, 因为二者都考虑了业务时延要求, 从而具有较小的丢包率. 因为 MUMS 调度算法设计对于时延更为敏感, 所以总体而言, 其丢包率性能优于 M-LWDF 算法, 而 PF 算法丢包率相当高, 因为 PF 算法没有考虑业务的时延要求, 而导致实时业务数据来不及被调度, 等待时间超过最大时延要求而被丢弃.

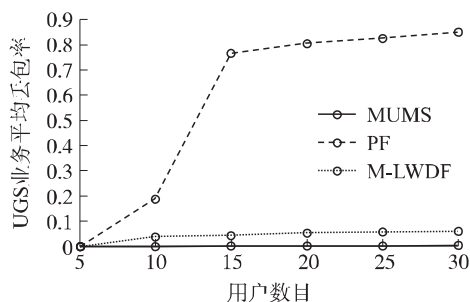


图8 UGS 业务平均丢包率比较图

Fig. 8 Comparison of packet loss rate of UGS

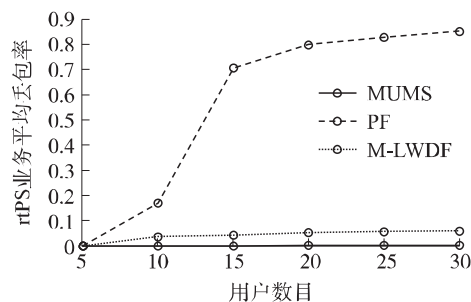


图9 rtPS 业务平均丢包率比较图

Fig. 9 Comparison of packet loss rate of rtPS

从上述仿真结果可以看出,本文提出的 MUMS 调度算法有效地保证了业务的 QoS 要求和用户之间的公平性,同时也获得了较高的系统吞吐量。

## 4 结语

本文充分考虑了不同业务的 QoS 需求,提出了一种新的超高速无线局域网多用户多业务调度算法。该调度算法结合业务 QoS 需求、信道状态信息、用户服务队列信息等,进行业务调度和用户调度的两步分层调度。仿真结果表明,该调度算法能够满足不同业务的 QoS 需求,尤其在时延性能和丢包率方面的优势明显。且该调度算法在保证一定的用户公平性的同时,能获得较高的系统吞吐量。

## [参考文献](References)

- [1] 北京新岸线移动多媒体技术有限公司. YD/T 2394. 2—2012. 高频谱利用率高数据吞吐的无线局域网技术要求 第 2 部分: 增强型高速无线局域网媒体接入控制层( MAC) 和物理层( PHY) [S]. [Online]. <http://ccsa.org.cn/search.php3?source=yd&keyword=&selectkind=all&PageNo=1>.  
Beijing Nufront high tech company. YD/T 2394. 2—2012. High spectrum efficiency and high throughput wireless LAN technical requirements—Part2: Medium access control( MAC) and physical layer( PHY) specification for enhanced ultra high throughput wireless local area network [S]. [Online]. <http://ccsa.org.cn/search.php3?source=yd&keyword=&selectkind=all&PageNo=1>. ( in Chinese)
- [2] 应俊, 刘江, 唐伟文. 无线网络中的资源分配和调度算法综述 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2009, 21( 3): 328–337.  
Ying Jun, Liu Jiang, Tang Weiwen. Resource allocation and transmission scheduling for wireless networks: an overview [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2009, 21( 3): 328–337. ( in Chinese)
- [3] Michael J Neely. Delay analysis for max weight opportunistic scheduling in wireless systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54( 9): 2 137–2 150.
- [4] Oliveira R, Koutsopoulos I. Maximum-throughput access control in wireless LANs through max-weight-inspired policies [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59( 6): 3 036–3 046.
- [5] Basukala R, Mohd Ramli H A, Sandrasegaran K. Performance analysis of EXP/PF and M-LWDF in downlink 3GPP LTE system [C]//First Asian Himalayas International Conference on Internet( AH-ICI-2009). Nepal: Kathmandu, 2009: 1–5.
- [6] Uc-Rios C E, Lara-Rodriguez D. An efficient scheduler for real and non-real time services maximizing satisfied users in wireless networks [C]//Proc. of 20th International Computer Communications and Networks Conference( ICCCN-2011). Maui, HI, 2011: 1–5.
- [7] 罗兴国, 赵海波, 唐晓梅. 一种前向共享信道下多业务的分层混合调度策略 [J]. 计算工程与应用, 2007, 43( 22): 126–128.  
Luo Xingguo, Zhao Haibo, Tang Xiaomei. Layered hybrid scheduling scheme for multi-class services in forward shared channel [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43( 22): 126–128. ( in Chinese)
- [8] Bo Li, Yang Qin, Chor P Low, et al. A survey on mobile WiMAX [J]. IEEE Communications Magazine, 2007, 45( 12): 70–75.
- [9] Stefan Schwarz, Christian M, Markus Rupp. Throughput maximizing multiuser scheduling with adjustable fairness [C]//IEEE International Conference on Communications( ICC). Japan: Kyoto, 2011: 1–5.

[责任编辑: 刘 健]