

基于混合业务 QoS 的 LTE 跨层调度算法

吴哲夫 金腾飞 朱健军
(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

摘要 在众多资源分配的调度算法中,区别实现混合业务 QoS 要求的调度策略研究不多。针对现有调度算法不能同时满足多用户实时和非实时业务性能需求,提出了一种保证混合业务 QoS 的 LTE 系统下行资源分配算法。新算法采用跨层设计思想下的资源块分配机制,在 EXP 算法的基础上引入权重因子。仿真表明新算法能够大幅度降低 LTE 系统用户丢包率,改善用户公平性和吞吐量性能。

关键词 长期演进项目,服务质量,混合业务,调度

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Multi-service QoS-based Cross-layer Scheduling Algorithm in LTE System

WU Zhe-fu JIN Teng-fei ZHU Jian-jun

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract Among the numerous scheduling algorithm of resource allocation, few studies of scheduling strategies are focused on the distinction of multi-service's QoS requirements. This paper proposed a new downlink scheduling algorithm to satisfy the Quality of Service (QoS) needs of multi-users' real-time services and non real-times services in the Long Term Evolution (LTE). From a cross-layer perspective, the algorithm introduced a weight factor on the basis of EXP algorithm. Simulation results show that the proposed algorithm reduces the users data drop rate and improves the system throughput considerably, while ensures the users' fairness.

Keywords Long term evolution, QoS, Multi-service, Scheduling

1 引言

随着无线通信技术的发展,目前 LTE 系统已经逐渐进入网络建设运营阶段。随着 Internet 应用业务的广度深入和日益复杂的多样性^[1],实时多媒体业务、混合多媒体业务广泛的接入需求和无线通信技术的快速发展,使得下一代移动通信系统 3GPP LTE 除了高宽带需求,同时也要满足各种新型多媒体业务服务质量的要求。其中 LTE 中资源分配调度的目的是通过分组调度算法设计,将系统资源合理地分配给用户的不同业务需求,解决有限的无线资源与快速增长的用户数以及用户更高的服务质量需求之间的矛盾。LTE 系统中的调度功能由位于 eNodeB(evolved Node B)的 MAC 层调度器来实现,分别通过下行调度器和上行调度器来负责完成对下行和上行共享信道的资源分配。

目前,无线分组调度算法主要可分为两类:一类是考虑物理层(PHY-layer)信道质量的分组调度算法,如最大载干比(Max C/I)调度算法^[2]、轮询(Round Robin, RR)调度算法和比例公平(Proportional Fairness, PF)调度算法^[3];另一类是结合了物理层信道质量以及媒体接入控制层(MAC-layer)缓存队列的调度算法,如 M-LWDF(Modified Largest Weighted Delay First)调度算法^[4]和 EXP 调度算法^[5]。前者没有考虑用户缓存队列中的数据情况,即不具有时延约束条件,不适合

实时业务;而后者虽然适合高速率业务,提高了实时业务的性能,但不适合非实时业务,即对混合业务的调度缺乏随无线资源变化动态调整调度策略的机制。为了兼顾非实时业务和实时业务的混合业务场景,本文提出了一种跨层且基于 QoS (Quality of Service) 的下行调度算法,通过结合 EXP 算法的优点并引入一个权重因子,综合各业务的不同 QoS 要求和信道资源状态,从而满足多用户混合业务对无线资源的需求。

2 LTE 下行调度简介

在 LTE 系统中, eNodeB 负责管理上行和下行链路信息的资源调度。LTE 可以在时域和频域进行资源调度,具备不同的 QoS 要求的业务都可以竞争资源^[6]。

基于有效的测量信息, eNodeB 资源调度器必须管理它所控制的小区内所有的 UE(User Equipment) 的不同需求,在频谱上有效满足不同 QoS 要求且在可接受的时延内确保有足够的无线传输资源分配给每个 UE。由图 1 可知,在分组调度中,不同的业务流从高层经过分类器后,根据用户和业务的类型不同,分别存留在基站侧缓存区内不同位置。不同的业务流有不同的 QoS 约束。位于 eNodeB 侧的调度器在每个传输时间间隔(Transmission Time Interval, TTI)内根据一定的调度算法,以及从 UE 处获得的信道质量指示(Channel Quality Indicator, CQI)反馈值和上行传输业务的负载信息来计

本文受国家 863 计划(2009AA04Z138),国家自然科学基金(61275124),浙江省自然科学基金(LY31F010011)资助。

吴哲夫(1971-),男,博士,副教授,主要研究方向为无线多媒体网络, E-mail: wzf@zjut.edu.cn; 金腾飞(1988-),男,硕士生,主要研究方向为新一代无线通信技术; 朱健军(1974-),男,博士,讲师,主要研究方向为新一代无线通信技术。

算各个数据流的调度优先级,并为优先级最高的数据流分配无线资源。

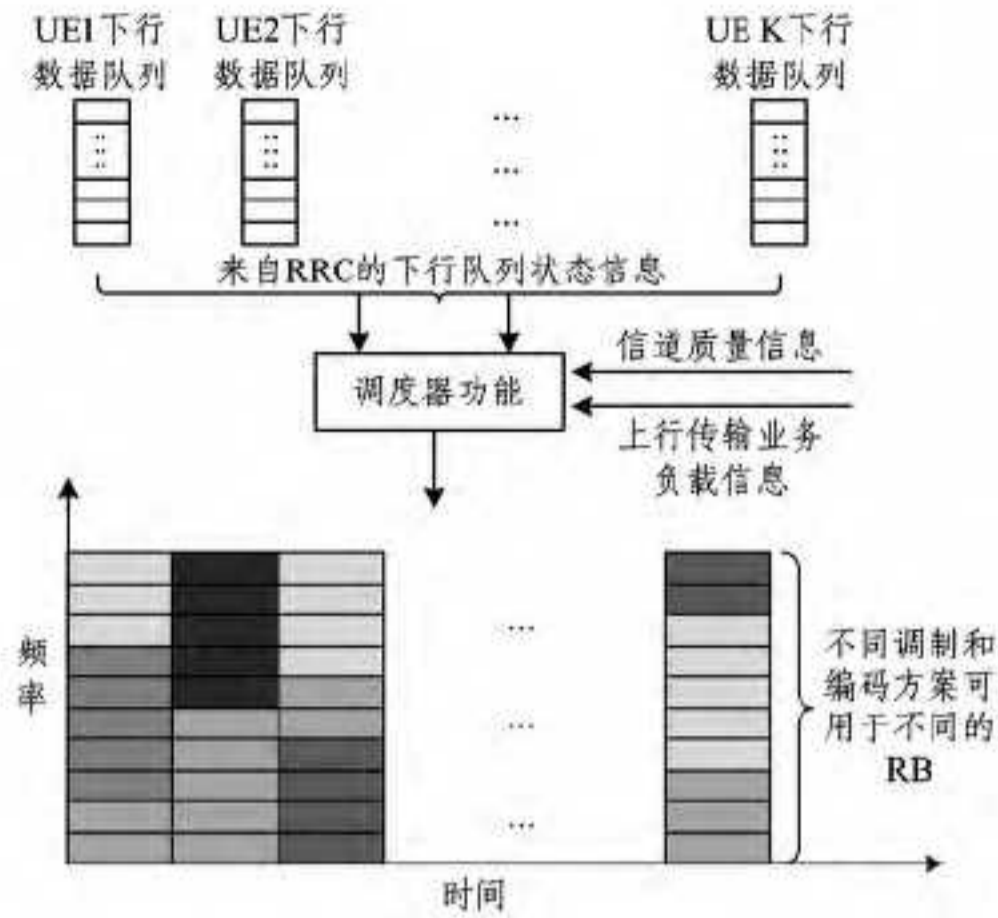


图1 LTE下行调度和资源分配示意图

2.1 调度算法分析

高通公司最早提出了比例公平算法并用于时域的调度。它综合考虑了算法对信道质量的敏感度以及用户之间的公平问题,可以在保证一定公平性的基础上获得相对较高的吞吐量。其调度优先级公式^[7]为:

$$\omega_{i,j} = \frac{r_{i,j}}{R_i} \quad (1)$$

式中, $r_{i,j}$ 代表 UE_i 在时刻 t 信道所支持的瞬间传输速率。 R_i 为信道支持的平均速率。从式(1)中可知,当一个用户在某个资源块上具有较好的信道质量,它的 $r_{i,j}$ 的值就越高,因此该用户获得的调度优先级也就越高。但当一个信道质量较好的用户在一段时间内连续获得多个资源块后,它的平均速率 $R_i(k)$ 就会上升,这样它获得的调度优先级就会下降。由此可见,PF算法实现了系统吞吐量和用户公平性之间的良好折中。但是PF算法只适用于非实时业务,没有考虑不同业务的QoS要求,特别是时延要求,对于实时性要求比较严格的业务无法满足其性能要求。

Bell实验室提出了EXP算法^[8],该算法基于比例公平调度和指数加权的时延平衡机制,其调度优先级公式为:

$$\omega_{i,j} = \exp\left(\frac{\alpha_i \cdot D_{HOL,i} - \chi}{c + \chi^\eta}\right) \cdot \frac{r_{i,j}}{R_i} \quad (2)$$

其中,

$$\chi = \frac{i}{N_n} \sum_{i=1}^{N_n} \alpha_i \cdot D_{HOL,i} \quad (3)$$

式中, N_n 为下行实时活跃信息流的数目, $D_{HOL,i}$ 为 UE_i 在缓冲队列中的HOL分组时延, $\alpha_i = \frac{-\lg \delta_i}{\tau_i}$ 代表 UE_i 的时延阈值, δ_i 是队头数据包的 $D_{HOL,i}$ 超过时延阈值的最大概率, c 和 η 都是固定的控制参数。

EXP算法对时延的敏感程度是时变的,并且实时业务调度优先级与时延是指数关系,EXP算法可以更好地满足实时业务的调度要求。但是,EXP算法缺乏随物理层无线资源变化动态调整调度策略的机制并且不能有效支持混合业务QoS的区分,因而不能为实时和非实时混合业务的调度提供可靠的业务丢包率和系统吞吐量的保障。

2.2 改进算法

EXP算法优先级计算公式主要考虑了业务的时延性^[9]

要求,因此比较适合实时(Real Time, RT)业务,但它没有考虑不同业务的保证比特率(GBR)要求。为解决这个问题,本文尝试修改EXP算法以使得其能够应用于LTE频域分组调度业务,并且满足业务的GBR要求。

修改后的算法命名为EXP-AG,其主要思想是不仅要考虑实时业务的GBR要求,而且还要限制低GBR速率的业务获得过多的资源块,为没有满足GBR要求的业务给以优先级补偿。该算法的优先级计算公式如下:

$$\omega_{i,j} = \begin{cases} \exp\left(\frac{\alpha_i \cdot D_{HOL,i} - \chi}{c + \chi^\eta}\right) \cdot \frac{r_{i,j}}{R_i} \cdot \max\left(1, \frac{GBR_i}{R_i}\right), & \text{实时业务流} \\ \alpha \cdot \frac{r_{i,j}}{R_i}, & \text{非实时业务流} \end{cases} \quad (4)$$

如式(5),改进算法根据不同用户所传输的业务流为实时业务流还是非实时业务流,分别采用不同的调度公式计算优先级。当业务流是实时业务流时(如视频流,VIDEO),采用修改后的EXP算法来计算优先级;如是非实时业务流时(如尽力而为业务流(Best Effort, BE)),按照PF算法来计算优先级。算法的完整流程见图2。

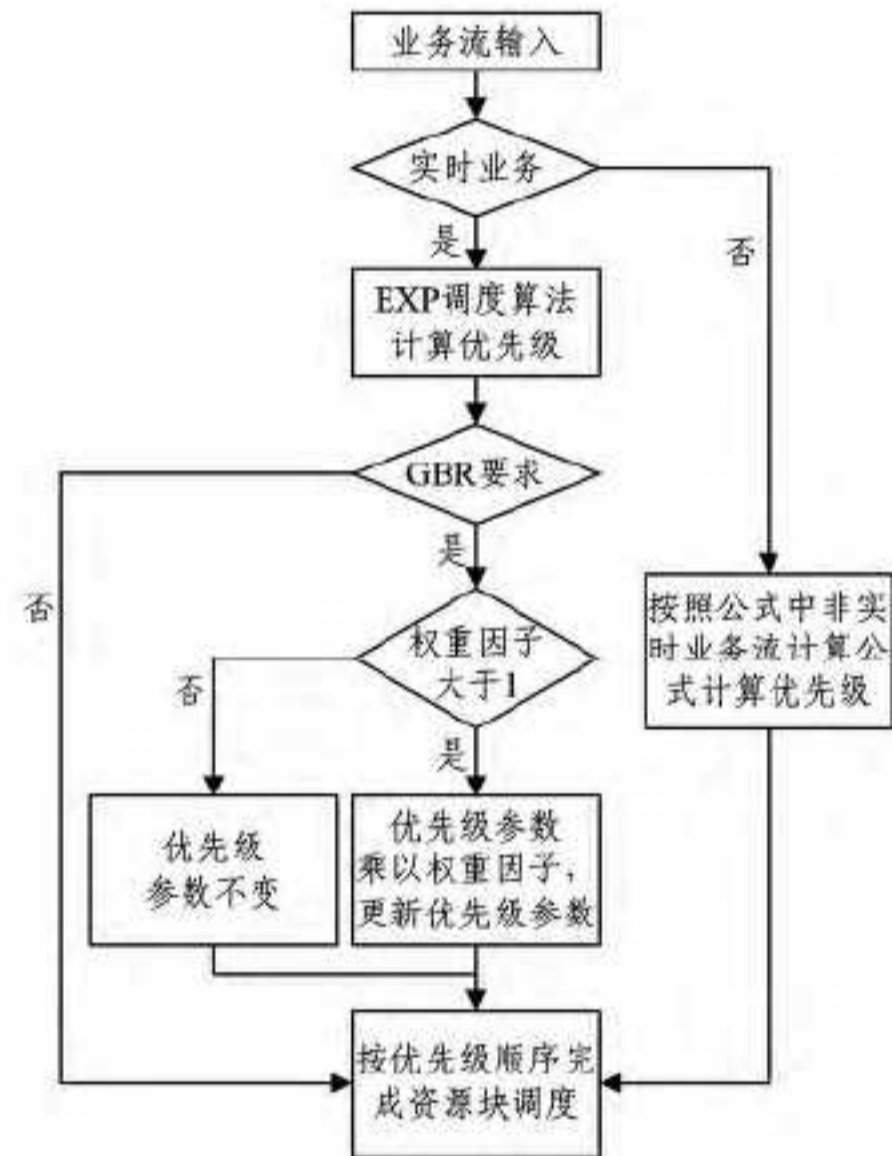


图2 EXP-AG算法流程图

式(5)中 α 是可调优先级因子,它的取值会影响多业务调度下非实时业务的优先级,继而影响该业务的吞吐量。 α 取值越大,相应的非实时业务的吞吐量越大,但是随着 α 的增大,会导致非实时业务平均分组时延增大,从而增加了丢包的可能性,这里我们把 α 设置为 1,以便仿真时与PF算法进行比较。而 $\max\left(1, \frac{GBR_i}{R_i}\right)$ 项就是新添加的权重因子,当一个用户业务平均速率 R_i 满足其速率保证要求的GBR时,该项取值为 1; 当一个用户业务平均速率 R_i 小于其速率保证要求的GBR时,该项的取值 $\frac{GBR_i}{R_i} > 1$ 。因此没有满足最低速率要求的用户业务将优先分配资源块,获得 $\frac{GBR_i}{R_i}$ 的补偿,而且当 R_i 和 GBR_i 的差距越大,权重因子就越大,用户获得的资源块的优先级就越高。对于达到了业务GBR要求和Non-GBR需求的用户,权重因子取值为 1,仍然按照原先的算法公式计算优先级,这样新算法既充分利用了EXP算法的优点,也通过

限制和添加权重因子保证了用户业务的 GBR 要求,可支持 LTE 混合业务场景。

3 仿真分析

3.1 仿真环境

本文主要针对两类业务(实时和非实时业务)进行仿真,业务类型如表 1 所列。

表 1 仿真的业务类型

类型	业务类型	特点	分类	GBR
Type 1	BE 业务 (即 INF-BUF)	假设一直有数据 要发送	非实时	0
Type 2	Video 业务	对时延要求比较严格	实时	512kb/s

本文仿真程序编写语言为 C++, 整个系统采用正六边形的蜂窝,用户在蜂窝中的位置是随机的,用户的移动速度为 3km/h。每个小区的中心位置均设置一个 eNodeB,以控制所有可用的资源块(Resource Block, RB),所有的用户共享这些 RB。设每个 UE 都同时接受一个视频业务流和一个 BE 业务流。系统带宽为 10MHz,即 50 个 RB。表 2 给出了仿真的基本参数设置[10]。

表 2 3GPP LTE 下行系统仿真参数

业务类型	Type 1 和 Type 2
传输带宽	10MHz
子载波间隔	15kHz
每个 RB 的子载波数	12
RB 数量	50
发送时间间隔(TTI)	1ms
小区数量	1
小区半径	1km
用户移动速度	3km/h
用户移动方式	RandomWalk
调制方式	QPSK,16QAM,64QAM
帧结构	FDD
调度类型	PF,EXP/PF,EXP-AG
路径损失	$L=128.1+37.6\lg R$,R 单位 km@2GHz
用户侧的发射功率	23dBm
基站的发射功率	46dBm
基站和用户间的最小距离	35m

注:因为是非实时与实时业务的混合场景,所以本文选择 EXP/PF 算法,而非仅仅是 EXP 算法

4 仿真结果

本文从 LTE 系统的吞吐量、用户公平性、丢包率等方面对 PF 算法、EXP/PF 算法和提出的 EXP-AG 新算法进行了性能仿真。

图 3 是 3 种调度算法在不同业务类型下的吞吐量比较结果。图 3(a)为非实时业务的情况,当用户数由 5 增加到 15 时,3 种优先级调度算法的吞吐量均急速下降。当用户数为 15~25 时,PF 和 EXP-AG 算法的下降幅度比 EXP/PF 算法大,此后随着用户数的继续增加,3 种优先级调度算法的吞吐量变化缓慢。当为 28 个用户时 EXP-AG 算法的吞吐量开始低于 EXP/PF 算法,这是因为实时业务流的增加挤占了信道资源,EXP-AG 算法对实时业务流比 EXP/PF 算法更敏感。图 3(b)为实时业务的情况,当用户数较小(5~15)时,3 种算法 Video 业务的系统吞吐量基本相同。随着用户数逐渐增多,PF 算法的吞吐量迅速降低,这主要是因为 PF 算法为非实时调度算法,当用户数太多时,MAC 层的数据包排队时间过长,导致后续数据包不能发送,影响系统吞吐量。而 EXP/

PF 和 EXP-AG 算法下的系统吞吐量则随着用户数增加而逐渐增多并趋于稳定。当用户数较多时,EXP-AG 算法由于对高 GBR 有补偿,因此其吞吐量高于其他两种算法的业务吞吐量。在用户数为 45 的时候,EXP-AG 算法吞吐量比 EXP/PF 算法提高了 43.23%,也远高于 PF 算法的吞吐量。EXP/PF 算法与 EXP-AG 算法在实时业务流(Video 流)吞吐量上有如此大的差距也说明了 EXP 算法在支持 GBR 要求的业务,尤其是高 GBR 要求的业务时需要做特定的改进。

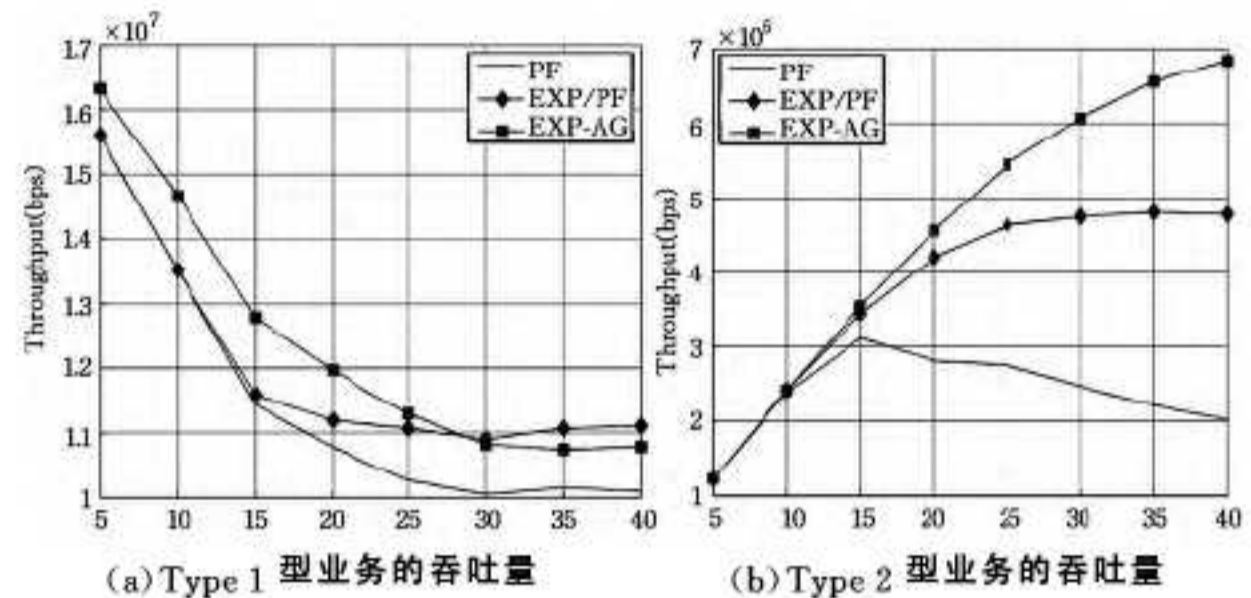


图 3 3 种调度算法下的吞吐量比较

图 4 给出了 3 种优先级调度算法的公平性比较。对于非实时业务如图 4(a)所示,随着用户数的增加,3 种调度算法的公平性基本保持一致,当用户数为 30~40 时,EXP-AG 算法公平性比其他两种算法略高。对于实时业务来说,如图 4(b)所示,可知在用户数较小(5~15)时,3 种算法公平性指数相差不大。随着用户数的增多,PF 算法性能急剧恶化,而 EXP/PF 算法和 EXP-AG 算法性能变化缓慢,其中用户数在 20~40 时,EXP-AG 算法的公平性指数大于 EXP/PF 算法的公平性指数。从整体上看,EXP-AG 算法保证了系统的公平性,并略有提高。

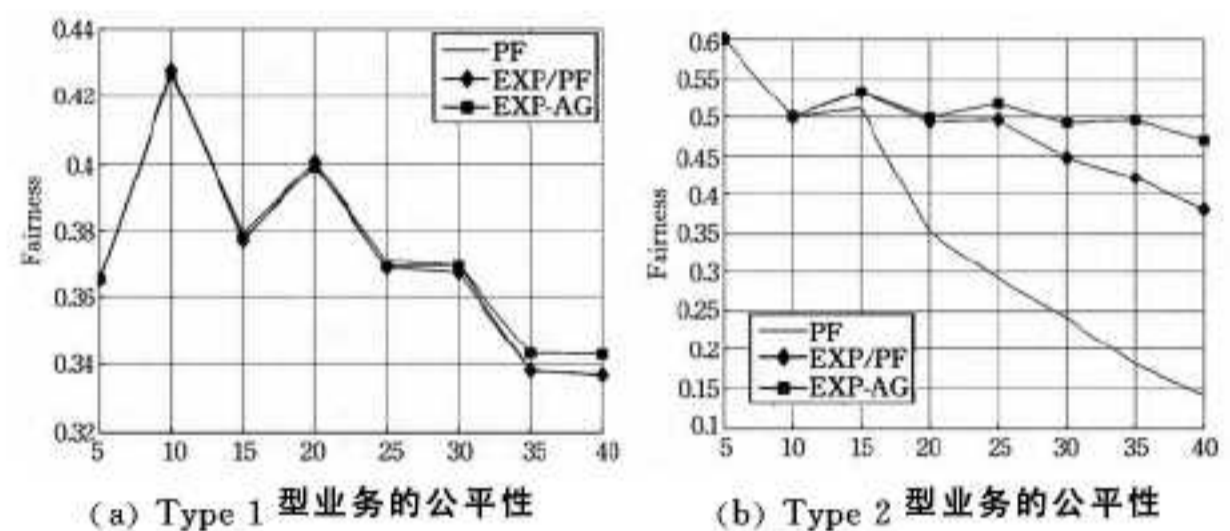


图 4 3 种调度算法下的公平性比较

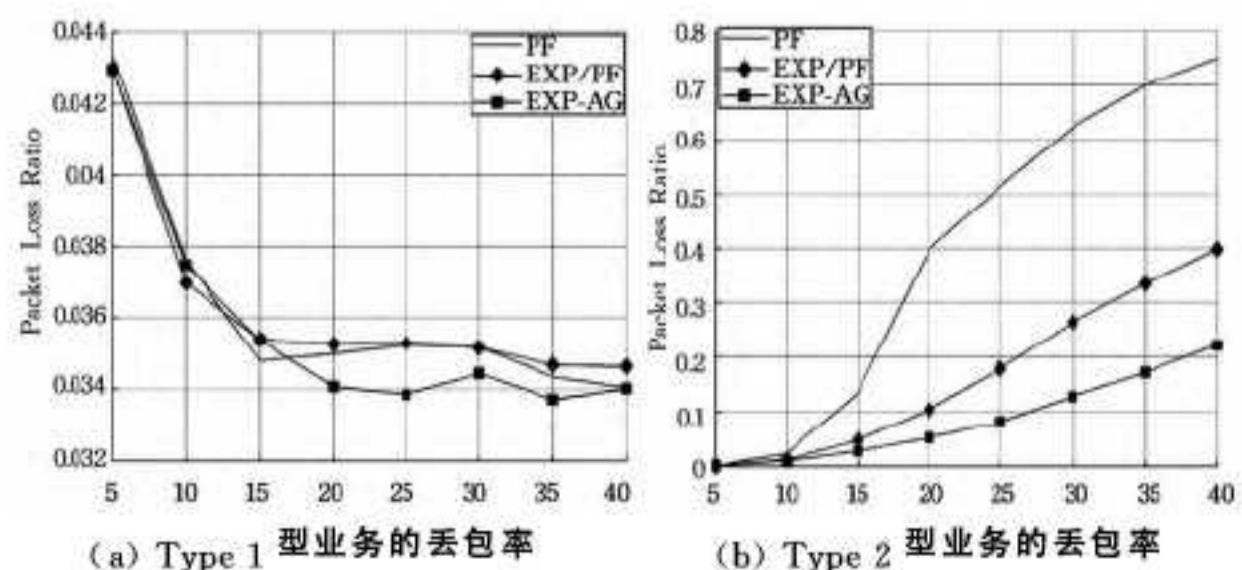


图 5 3 种调度算法的丢包率比较

图 5 为 3 种优先级调度算法的丢包率情况。图 5(a)中,对于非实时业务,用户数较小(5~15)时,3 种算法丢包率性能差不多。当用户数为 17 时 EXP-AG 算法丢包率低于另外两种调度算法,并且维持在一个比较稳定的水平。对于实时业务来说,如图 5(b)所示,用户数较小(5~10)时,三者的性能基本相同。随着用户数的增多,PF 算法的丢包率迅速恶化,远高于另外两种算法。虽然 EXP/PF 和 EXP-AG 算法的丢包率也缓慢增加,但是 EXP-AG 算法的丢包率一直低于其

他两种算法。EXP-AG 算法的丢包率比 EXP/PF 算法平均小 48.6%，这是因为 EXP/PF 和 EXP-AG 算法考虑到了非实时业务和实时业务的优先级，而且 EXP-AG 算法给予了实时业务更高的优先级，从整体上来说 EXP-AG 算法降低了业务丢包率。

结束语 本文提出了一种新的基于 QoS 的下行调度算法，通过仿真表明该算法应用于 LTE 混合业务中可以在保证业务调度公平性的前提下，有效降低业务丢包率，并提高系统的整体吞吐量。

参考文献

[1] 周建存, 郝夏斐. LTE 中基于协作 AODV 协议的拥塞控制机制研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(8): 122-125
 [2] Ericsson N S. Adaptive modulation and scheduling of IP traffic over fading channels[C]// VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th. IEEE, 1999, 2: 849-853
 [3] 曾木飞. LTE 下行分组调度算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012

[4] Kim K, Koo I, Sung S, et al. Multiple QoS support using M-LWDF in OFDMA adaptive resource allocation[C] // The 13th IEEE Workshop on. IEEE, 2004: 217-222
 [5] Shakkottai S, Stolyar A L. Scheduling algorithms for a mixture of real-time and non-real-time data in HDR[C]// Proceedings of 17th International Teletraffic Congress ITC-17. 2000: 793-804
 [6] Sesia S, Toufik I, Baker M. LTE: the UMTS long term evolution [M]. New York: John Wiley & Sons, 2009
 [7] Capozzi F, Piro G, Grieco L, et al. Downlink packet scheduling in lte cellular networks: Key design issues and a survey[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2013, 15(2): 678-700
 [8] Shakkottai S, Stolyar A L. Scheduling for multiple flows sharing a time-varying channel: The exponential rule[J]. Translations of the American Mathematical Society-Series 2, 2002, 207: 185-202
 [9] 刘伟. LTE 系统中基于混合业务的分组调度算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012
 [10] Piro G, Grieco L A, Boggia G, et al. Two-level downlink scheduling for real-time multimedia services in LTE networks[J]. Multimedia, IEEE Transactions on, 2011, 13(5): 1052-1065

(上接第 305 页)

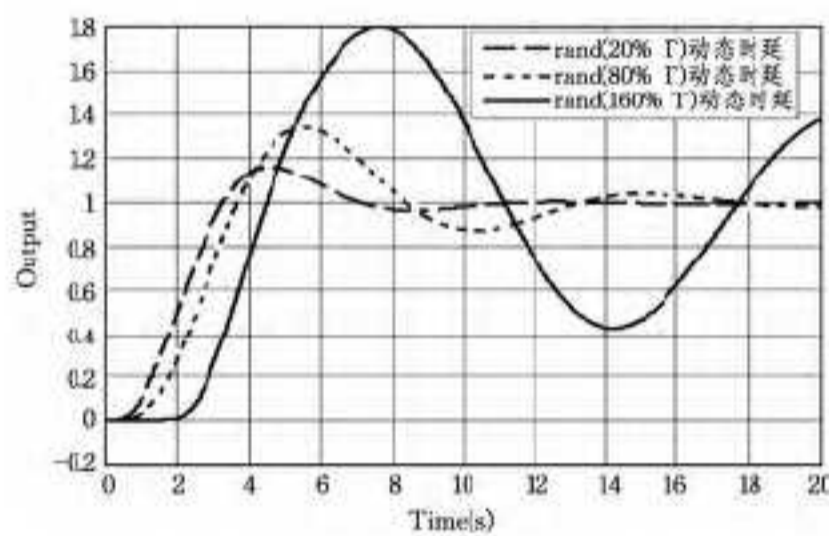


图 10 可变时延仿真结果

从图 10 中可以看出，随着网络时延的增大，系统上升时间变长，超调量变大，振荡加剧，系统趋于不稳定。由此可知，随机时延对网络化运动控制系统性能的影响比固定时延更加严重。而实际系统中，时延往往是随机出现的，且随负载条件的变化而改变。图 11 仿真结果显示了不同负载条件下的随机时延分布情况，可以看出高负载条件下时延波动的频率和幅度比低负载条件下明显增大，对系统性能更加不利。

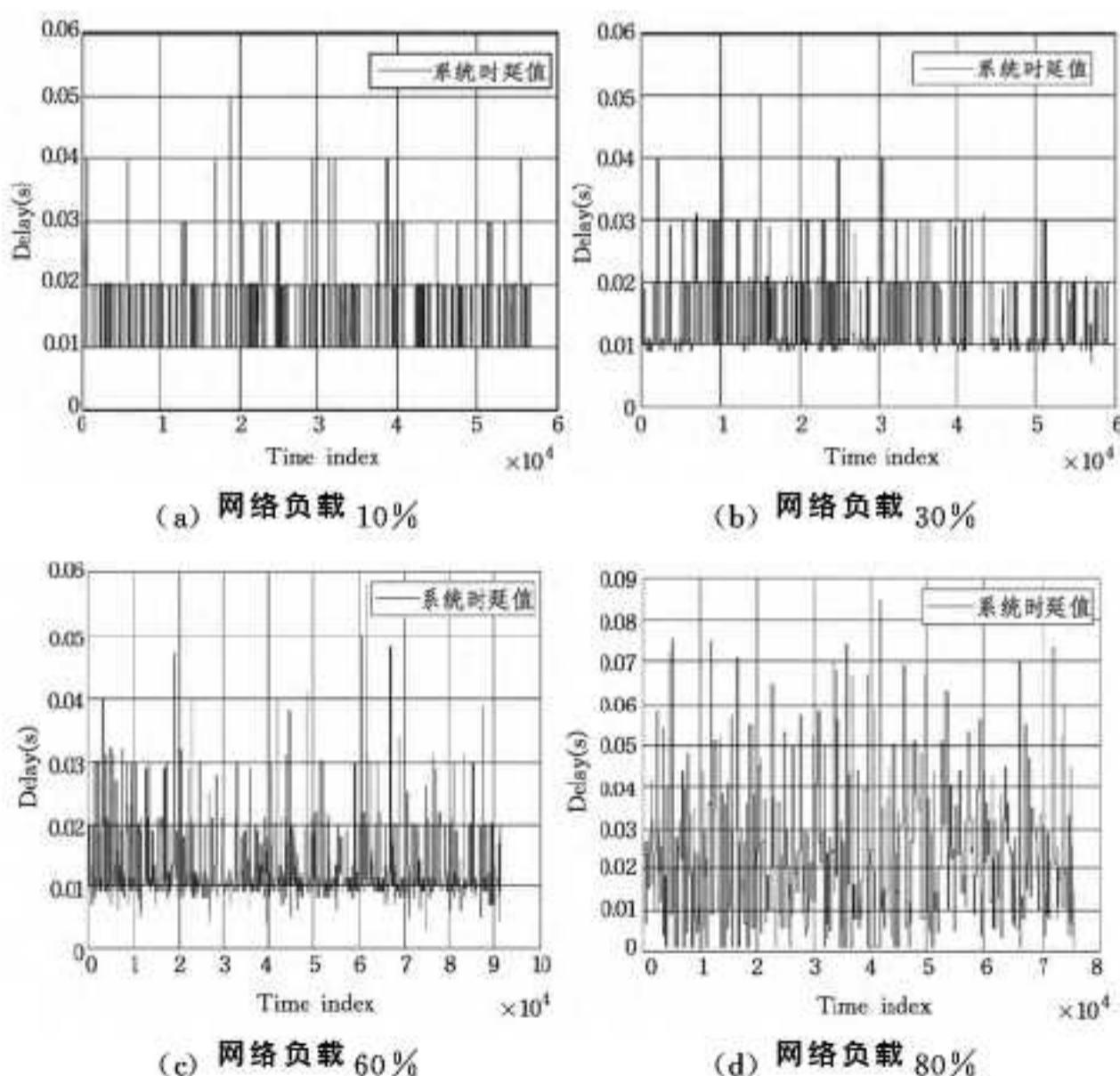


图 11 不同网络负载条件下的随机时延分布

结束语 在分析物联网控制系统的系统结构、采样周期对网络负荷和控制性能影响的基础上，对 IOT CS 的时延问题进行了研究。在 Matlab/Simulink 中搭建不同的仿真模型，就零时延、固定时延 ($\tau = \tau_{ca} + \tau_x = \text{常数}$ ，具体分为 $\tau_{ca} \gg \tau_x$ 和 $\tau_x \gg \tau_{ca}$ 两种情况) 和可变时延 3 种典型的网络时延对 IOT CS 系统性能的影响进行了仿真研究。定量地分析了随机时延对系统性能的影响，同时对不同负载条件下随机时延的分布进行了仿真研究，并得出结论：减少前向通道时延 τ_{ca} 在网络总时延中所占的比重，可以大幅度改善系统性能，随机网络时延比固定网络时延对 IOT CS 的影响严重。

参考文献

[1] Raja P, Noubir G. Static and dynamic polling mechanism for Fieldbus networks [J]. Operating System Overview, 1993, 27(3): 34-43
 [2] 窦连旺. 网络控制系统的建模、稳定性分析及其调度的研究[D]. 天津: 天津大学, 2003
 [3] Ray A, Halevi Y. Integrated communication and control systems: part I—analysis and part II—design consideration [J]. ASME Journal of Dynamic System Measurement & Control, 1988, 110: 367-381
 [4] Zhang W. Stability Analysis of Networked Control Systems [D]. Electrical Engineering and Computer Science, Case Western Reserve U, May 2001
 [5] Zhang W, Branicky M S, Philips S M. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Magazine, 2001, 21(1): 84-99
 [6] Lian F L, Moyne J, Tilbury D. Modeling and optimal controller design of networked control systems with multiple delays [J]. International Journal of Control, Taylor & Francis, 2003, 76(6): 591-606
 [7] Lian Feng-li, Moyne J. Time Delay Modeling and Sample Time Selection for Networked Control Systems [C] // Proceedings of ASME-DSC, 2001 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, 2001: 1-8