

文章编号: 1672-2892(2012)06-0664-06

一种 3GPP LTE 网络的 TCP 拥塞控制方法

胡子骥, 王 旭, 胡 波, 冯 辉, 杨 涛

(复旦大学 电子工程系, 上海 200433)

摘 要: 现有的传输控制协议(TCP)拥塞控制机制源自有线网络, 未考虑无线基站介质访问控制(MAC)层调度器的特性, 影响了 TCP 协议在长期演进(LTE)系统上的传输性能。提出一种跨层的 TCP 拥塞控制方法, 由 MAC 层和 TCP 共同解决 TCP 虚假超时问题。此方法中, MAC 层提供超时信息, TCP 层识别出虚假超时后调整数据速率, 从而避免系统性能损失, 保证 MAC 层稳定工作。仿真结果表明, 在保证用户公平性的同时, 新方法可以有效解决虚假超时问题, 提高用户实际吞吐量。

关键词: TCP 拥塞控制机制; 3GPP-LTE 网络; 跨层优化; MAC 层调度机制; 虚假超时

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

Cross-Layer Transmission Control Protocol congestion control algorithm over 3GPP Long Term Evolution networks

HU Zi-ji, WANG Xu, HU Bo, FENG Hui, YANG Tao

(Department of Electrical Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Next-generation mobile broadband networks, 3GPP Long Term Evolution(3GPP LTE), relies on Media Access Control(MAC) Layer scheduling techniques to achieve great system throughput. However, scheduling can have adverse effects on the congestion control mechanisms of existing Transmission Control Protocol(TCP) and lead to TCP spurious timeout, which will lower the TCP goodput. A cross-layer TCP congestion control algorithm, named TCP-MAC-CW(MAC-layer Congestion Warning), is proposed to solve problems caused by spurious timeout. The proposed TCP-MAC-CW first detects spurious timeout according to the congestion warning sent by eNodeB MAC Layer, and then adjusts the TCP data rate to improve goodput. Simulation result on LTE simulation platform shows that the proposed TCP-MAC-CW achieves much more goodput gain compared to other existing mechanisms, while maintaining satisfied TCP-level fairness.

Key words: Transmission Control Protocol congestion control; 3GPP Long Term Evolution networks; cross-layer; Media Access Control Layer Scheduling; spurious timeout

目前, 约 90% 的 Internet 数据传输是通过 TCP 协议^[1]完成的。随着新一代移动宽带标准——3GPP LTE^[2]的迅速发展和商用化, TCP 协议在移动通信领域得到更多的应用。拥塞控制机制对 TCP 性能影响很大。而基于有线网络设计的传统 TCP 拥塞控制机制, 如 TCP-Reno^[3], 并不适用于无线网络。有线网络信道通常较为稳定, 因此, TCP 拥塞控制机制认为数据包超时和丢失都是由于网络拥塞引起的。而在移动通信网络中, 无线信道通常不太稳定, 误码率较高, 同时基站 MAC 层调度器会影响传输速率与时延, 这些因素都可能造成数据包超时或者丢失, 网络拥塞不再是超时和丢包的唯一原因。如果在移动通信网络上继续采用传统的 TCP 拥塞控制机制, 可能会将非拥塞引起的数据超时和丢失误认为是网络拥塞引起的, 从而影响网络性能。

因此, 研究适用于无线网络的 TCP 拥塞控制算法可以提高 TCP 协议在移动通信网络上的性能。用 TCP-Veno 方法测量积压的数据量, 据此进行拥塞控制。TCP-New Jersey 通过估计网络可用带宽来调整拥塞控制的相关参数。

收稿日期: 2012-03-06; 修回日期: 2012-04-17

基金项目: 国家重大专项基金资助项目(2011ZX03003-001-02); (2012ZX03001007-003); (2010ZX03002-003-01); 华为合作基金资助项目(YBWL2010190)

TCP-FIT^[4]根据数据包回环时间来调整拥塞窗口的大小。LL-ELSN^[5]会将无线链路丢包的情况通知 TCP 拥塞控制。以上几种方法代表了大多数改进的 TCP 拥塞控制机制,目的都是要检测出无线信道传输失败引起的超时和丢包情况,防止拥塞控制机制误认为发生了网络拥塞。

然而,现有的这些 TCP 拥塞控制方法都忽略了实际移动通信系统中基站 MAC 层资源调度器对拥塞控制的影响^[6]。MAC 层资源调度器直接影响用户发送速率和传输时间。特别在高带宽、高速率的 LTE 系统中,资源调度会带来较大的用户数据吞吐量的波动和传输时延的抖动,导致数据包的超时。这种超时并不是由网络拥塞引起的,因此被称为 TCP 虚假超时。现有的 TCP 拥塞控制方法会将虚假超时误认为是网络拥塞,不必要地减小 TCP 数据速率;超时数据包还处在网络中,并未丢失,但 TCP 发送端会重发它们,导致网络内冗余数据量的增加;当超时数据包传输完成后, TCP 拥塞控制会误以为重发成功,高估网络状况,导致真正的拥塞。因此,将 TCP 协议应用到移动通信系统中时,必须改进 TCP 拥塞控制机制,解决 MAC 层资源调度带来的虚假超时问题。传统的解决虚假超时问题的算法,如 Eifel^[7],F-RTO^[8]等,在移动通信系统中很难实际应用。RFC3481^[9]改进 TCP 参数设置以减少虚假超时,但不能解决 MAC 层调度引起的虚假超时问题。3GPP LTE 网络的架构不同于 3G 移动通信网络,因此用于解决 UMTS 网络中虚假超时问题的方法^[10-11]很难在 LTE 网络上实现。文献[6]通过改进 MAC 层调度机制来减小虚假超时对系统性能的影响,提出的调度机制并不适用于 LTE 网络的 MAC 层。

本文提出了一种针对 3GPP LTE 移动通信网络的跨层优化 TCP 拥塞控制方法——TCP-MAC-CW,由 MAC 层和 TCP 拥塞控制机制共同解决 TCP 虚假超时问题。

1 TCP-MAC-CW 拥塞控制机制

现有的大量的 TCP 拥塞控制方法是在显式拥塞通知(Explicit Congestion Notification)^[12]方法的基础上提出的,如 LL-ELSN,TCP-New Jersey 等。在 ECN 中,路由器将网络拥塞的信息发送给 TCP 发送端,拥塞控制机制根据拥塞信息,能够避免将无线链路丢包误认为网络拥塞,从而更准确地进行拥塞控制。同理,如果 TCP 拥塞控制机制能够得到虚假超时的相关信息,有助于检测 and 解决虚假超时问题^[13]。

现有很多的移动通信网络的优化方法采用了跨层(Cross-Layer)机制^[14],通过不同协议层之间的相互协助,提高系统性能。如果基站 MAC 层调度器与 TCP 拥塞控制机制相互配合,可以跨层解决 MAC 层资源调度导致的 TCP 虚假超时问题。

因此,本文借鉴了 ECN 发送拥塞信息的做法,采用跨层优化方法,基站 MAC 层发送拥塞警告,协助 TCP 拥塞控制机制解决虚假超时问题。

本文提出的 TCP-MAC-CW 拥塞控制机制在 LTE 下行系统中的工作流程如下:

- 1) 基站 MAC 层统计 MAC 层调度器和各用户的相关信息。当基站 MAC 层发现某一用户积压在 MAC 层的 TCP 数据包可能会超时,基站 MAC 层就会上报给基站上层。
- 2) 基站上层通知网关,由网关向该用户的 TCP 发送端发送拥塞警告,TCP 发送端记录拥塞警告。
- 3) 如果在拥塞警告有效期间发生了超时,TCP-MAC-CW 就认为这是虚假超时,合理调整拥塞窗口。

TCP-MAC-CW 在 LTE 上行系统中的运作方式与下行系统类似。上行系统流程更为简单,用户端 MAC 层可以直接将拥塞警告跨层发送给用户端的 TCP 拥塞控制,不必像下行系统中通过网关来发送。

在 LTE 系统中,MAC 层调度机制引发虚假超时的原因主要有 2 种:1) 用户信道经历一段衰落,信道质量变差,调度器按照调度机制会减少分配给该用户的资源,甚至不为该用户分配资源。如果信道衰落持续时间足够长,虚假超时就会发生。这种由信道质量变化引起的虚假超时是突发、随机的。2) 前一时刻,调度器为某用户分配了大量资源,该用户发送速率很高,TCP 拥塞控制随之增加 TCP 数据速率。但调度器必须遵循公平性原则,一定时间后会减小该用户的发送速率,转而将资源分配给其他用户。用户积压在 MAC 层的 TCP 数据包无法以原有的高速率及时送出,造成超时。这种虚假超时与调度机制直接相关,随着用户发送速率的波动周期性出现。本文的 TCP-MAC-CW 方法针对这 2 种原因采取相应的拥塞控制策略,根据 MAC 层资源调度结果合理调整 TCP 数据发送速率。

1.1 MAC 层超时检测

基站 MAC 层统计 MAC 层上调度器和各用户的信息,包括调度器的调度结果,用户 TCP 数据到达 MAC 层的速率,用户 TCP 数据包在 MAC 层积压的时延、数据量等。利用这些信息,MAC 层可以判断用户积压在 MAC 层的数据包是否可能会超时。如果 MAC 层调度器为用户分配的发送速率持续小于用户 TCP 数据到达 MAC 层的

速率,用户 TCP 数据在 MAC 层的时延会不断增长,最终造成超时。此时,基站 MAC 层“拥塞”引起虚假超时。

在设计 LTE 系统的 MAC 层调度器和调度机制时需要考虑很多因素,不仅仅要考虑 TCP 协议的性能,还要考虑其他种类数据流(如 VoIP 等)、用户之间的公平性以及各种服务质量(Quality of Service, QoS)等等。因此很难设计出一个能完全解决虚假超时问题的 MAC 层调度器。而利用 MAC 层的统计信息来判断 MAC 层的 TCP 数据包是否会超时的方法复杂度低。因为这种方法并不依靠基站 MAC 层调度器来解决虚假超时,因而可以利用一些已经广泛的应用,较为成熟的调度器,从而减小 MAC 层的设计难度。而且无论采用何种调度器,都可以采用相似的简单方法来检测超时,从而进一步简化 MAC 层的设计。

1.2 拥塞警告的发送

在本文提出的方法中,MAC 层需要将超时信息通过跨层方式通知 TCP 发送端。在 LTE 下行系统中,因为基站 MAC 层无法直接与用户 TCP 发送端通信,基站 MAC 层需要先通知基站上层,再由基站通知网关向 TCP 发送端发送 MAC 层拥塞警告。基站 MAC 层到网关之间的通信时延很小,可以忽略其影响。

参考其他 TCP 拥塞控制机制^[15],本文使用 TCP 头 Byte 12 的 7 bit(TCP 保留位)作为拥塞警告标志位 MAC-CW,如表 1 所示。发送 MAC 层拥塞警告时,网关生成一个 TCP 数据包,并将 TCP 数据包头 MAC-CW 位置 1,然后发送给用户的 TCP 发送端。TCP 发送端收到数据包并检查 MAC-CW 标志位。如果该位为 1,就记录下这个拥塞警告。

而在 LTE 上行系统中,用户端 MAC 层可以直接跨层将拥塞警告通知 TCP 发送端,因此不需要发送 TCP 数据包作为拥塞警告。

1.3 拥塞控制机制

当 TCP 发送端收到拥塞警告,在该拥塞警告的有效期内,TCP-MAC-CW 拥塞控制机制如果发现数据超时,则判断为虚假超时。现有的 TCP 拥塞控制方法在网络拥塞后会重发超时的数据包,然后进入慢启动方式。但虚假超时并非网络拥塞:超时的数据包并未丢失,不需要重发;TCP 传输速率超过了用户从调度器分配得到的 MAC 层发送速率,需要调整拥塞窗口,减小 TCP 发送速率;但是不应该在非拥塞情况下采用慢启动方式,这样会损失系统性能。

本文的 TCP-MAC-CW 方法针对虚假超时采用特殊的控制机制,不重发超时的数据包,也不采用慢启动方式。对拥塞窗口的调整算法如图 1 伪代码所示。虚假超时发生后,TCP-MAC-CW 将拥塞窗口阈值(ssthresh)的值设为当前已发送但还未被确认数据包个数的一半,拥塞窗口(cwnd)大小设为修改后的 ssthresh。这样可以适度减慢 TCP 发送速率,缓解基站 MAC 层的压力,同时避免像慢启动那样过多损失系统性能。然后调整重传超时定时器(Retransmission Time-Out, RTO)。接着,TCP-MAC-CW 会区分导致虚假超时的不同原因,以采取相应的控制方式。每次虚假超时发生后,TCP-MAC-CW 记录当前拥塞窗口大小,与之前的记录进行比较。

如果这次超时的拥塞窗口小于前一次超时的拥塞窗口,TCP-MAC-CW 认为这是基站 MAC 层调度机造成的周期性虚假超时。TCP-MAC-CW 减小拥塞窗口后,采用快速恢复(TCP-MAC-CW Fast Recovery)方式;当拥塞窗口恢复到前一次超时的大小时,采用标准的拥塞避免(Congestion Avoidance)方式。MAC 层调度机制周期性地为用户分配资源。虚假超时后,当 MAC 层调度器重新调度用户资源,快速恢复方式能够随着用户发送速率的恢复,尽快调整 TCP 发送速率,充分利用网络带宽。之后采用拥塞避免减缓 TCP 发送速率,避免超过用户在 MAC 层的发送能力。相反,则 TCP-MAC-CW 认为这次虚假超时是突发性的,是由于用户信道经历衰落,信道质量变差引起的。TCP-MAC-CW 减小拥塞窗口大小,进入拥塞避免方式,等待用户信道衰落结束。

在 TCP-MAC-CW 方法中,TCP 发送端拥塞控制机制与 LTE 基站 MAC 层调度器之间进行了跨层优化。TCP-MAC-CW 根据 MAC 层调度器不同的调度情况采取相应的拥塞控制措施,能够更合理地调整 TCP 发送速率,

表 1 TCP 头 Byte 12 的数据格式

Table 1 TCP header Byte 12

Byte 12	0	1	2	3	4	5	6	7
	header length				reserved			MAC-CW

TCP-MAC-CW congestion control algorithm on TCP sender:

```

begin
    Record timeout cwnd=cwnd
    Adjust RTO( )
    ssthresh=cwnd/2
    cwnd=ssthresh
    if timeout cwnd<last timeout cwnd then
        last timeout cwnd=timeout cwnd
        TCP-MAC-CW Fast Recovery( )
    else
        last timeout cwnd=timeout cwnd
        Congestion Avoidance( )
    end if
end
function TCP-MAC-CW Fast Recovery( ){
    for each ACK do until last timeout cwnd ≤ cwnd
        cwnd=cwnd+1
        Send new packet if allowed by cwnd
    end for
    cwnd=ssthresh
    Congestion Avoidance( )
}
function Adjust RTO( ){
    Add each user's RTO timer with RTO
    Back off timer:RTO=RTO×2
}

```

Fig.1 Pseudo code of TCP-MAC-CW congestion control

图 1 TCP-MAC-CW 拥塞控制机制伪代码

减小虚假超时问题对 TCP 性能的影响。

2 仿真结果

本文按照 3GPP LTE 协议标准^[16-18]搭建了 LTE 仿真平台,对本文的 TCP-MAC-CW 方法进行仿真。模拟的场景如图 2 和图 3 所示。

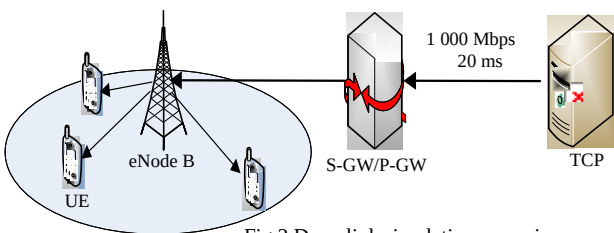


Fig.2 Downlink simulation scenario
图 2 下行系统仿真场景

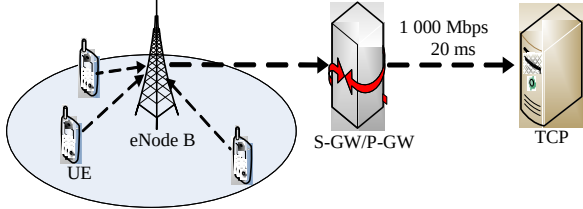


Fig.3 Uplink simulation scenario
图 3 上行系统仿真场景

这是一个单小区 LTE 系统的仿真场景,图 2 为下行系统,图 3 为上行系统。下行系统中,多个用户从服务器上通过 TCP 协议下载数据,而在上行系统中,多个用户向服务器上传数据。服务器与网关之间的网络连接一般为高速的骨干网络,因此假设服务器与网关之间的有线网络带宽为 1 000 Mbps,平均传输时延为 20 ms,网关与基站间的时延忽略不计。LTE 系统主要仿真参数和 TCP 协议主要参数分别如表 2 和表 3 所示,LTE 系统无线带宽 20 MHz,采用 HARQ 和 ARQ,MAC 层调度方式为考虑时延的比例公平算法^[19](Proportional Fair Scheduler, PF Scheduler);TCP 数据包大小固定为 512 bit。

针对本文的 TCP-MAC-CW 与 TCP-Reno,TCP-Veno,TCP-New Jersey,TCP-FIT 和 LL-ELSN 5 种拥塞控制方法,对比系统实际吞吐量和用户公平性 2 个方面。采用蒙特卡洛方法,多次仿真求平均值。

2.1 系统实际吞吐量比较

比较本文的 TCP-MAC-CW 与其他拥塞控制机制在不同网络负载下的系统实际吞吐量。仿真结果如图 4 和图 5 所示,显示了 6 种拥塞控制方法在 LTE 下行与上行系统中的单个用户平均实际吞吐量。

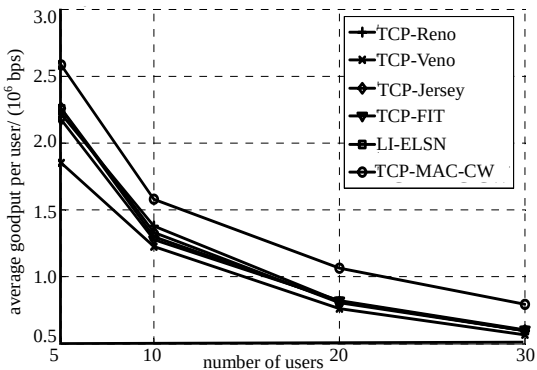


Fig.4 Goodput of TCP variants on LTE downlink
图 4 LTE 下行系统实际吞吐量比较结果

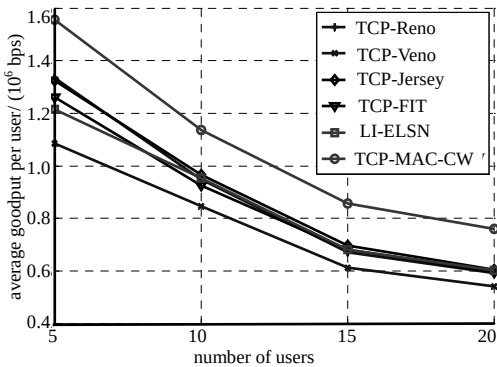


Fig.5 Goodput of TCP variants on LTE uplink
图 5 LTE 上行系统实际吞吐量比较结果

表 2 主要仿真参数

Table2 LTE simulation parameters

simulation length	10 000 TTI(10 s)
network	single cell cell radius:400 m user position:uniform distribution DL SISO mode/UL SISO mode
PHY parameters	sub-frame length:1 ms cyclic prefix:normal subcarriers per RB:12 subcarrier spacing:15 kHz duplexing:FDD
channel mode	modulation constellation:QPSK,16QAM,64QAM code rate:according to 3GPP TS 36.213
HARQ	EPedA 5 incremental redundancy 6 stop-and-wait processes
ARQ	max 3 retransmissions max 2 retransmissions
link adaptation/AMC	according to 3GPP TS 36.213 measurement period:1 ms
CQI	CQI granularity:1 RB per CQI other parameters according to 3GPP TS 36.213
MAC scheduling	PF scheduler considering delay HARQ prioritized

表 3 TCP 协议主要参数

Table3 TCP parameters

TCP parameter	value
TCP SMSS	fixed,512 Bytes
initial cwnd size	1 SMSS
initial ssthresh	64 SMSS

从图 4 和图 5 中看出, 本文的 TCP-MAC-CW 实际吞吐量大于其他 TCP 拥塞控制算法。主要原因在于 TCP-MAC-CW 解决了虚假超时问题。用户数为 5 时, TCP-MAC-CW 也能较大地提高实际吞吐量, 说明即便网络轻载时, MAC 层调度机制也会导致较严重的虚假超时问题。图 4 和图 5 还显示随着用户数的增加, 网络负载加重, TCP-MAC-CW 相较于其他 TCP 拥塞控制方法的实际吞吐量增益越大。下行系统中 TCP-MAC-CW 相对其他方法的实际吞吐量增益如表 4 所示。网络负载较重时, 用户间对无线资源激烈竞争, MAC 层调度器引起的传输速率和时延波动更明显, 引起更严重的虚假超时问题。因此网络负载越重, TCP-MAC-CW 解决虚假超时得到的性能增益越大。

从表 4 中还可以看到, Veno,Jersey,FIT 和 LL-ELSN 这 4 种改进的 TCP 拥塞控制机制的实际吞吐量并不比 Reno 高。虚假超时问题严重影响了这些改进机制的性能。并且, 这些改进的 TCP 拥塞控制方法的目标都是克服无线信道高误码率引起的高误包率问题; 但是 LTE 引入了 HARQ,ARQ,AMC 等技术, 同时在 MAC 层调度下, 降低了误包率。因此在 LTE 网络中, 改进的 TCP 拥塞控制方法无法发挥出优势^[20]。

表 4 LTE 下行中, TCP-MAC-CW 相对于其他方法的实际吞吐量增益
Table4 TCP-MAC-CW's goodput gain compared with other protocols on LTE downlink

number of users	Reno/(%)	Veno/(%)	Jersey/(%)	FIT/(%)	LL-ELSN/(%)
5	16.4	39.4	14.3	18.9	14.7
10	14.6	18.8	23.6	21.7	29.2
20	30.7	39.7	31.6	30.1	30.4
30	33.7	41.0	32.9	32.1	32.4

2.2 用户公平性比较

MAC 层调度器和 TCP 拥塞控制方法都会影响用户公平性。本文使用 Jain's Fairness Index(FI)^[21]来衡量公平性, FI 指标定义见式(1):

$$FI = \left(\sum_{n=1}^N x_n \right)^2 / \left(N \sum_{n=1}^N x_n^2 \right) \tag{1}$$

式中: x_n 是用户 n 的实际吞吐量; N 是用户总数。FI 的值在 (0,1] 之间, $FI=1$ 表明各个用户实际吞吐量相同。 $FI=1/N$ 表明只有一个用户传输了数据, 其他用户吞吐量均为 0。FI 值越趋近于 1, 表明系统公平性越好。在不同网络负载情况下, 本文 TCP-MAC-CW 与其他方法在 LTE 下行与上行系统中用户公平性分别如图 6 和图 7 所示。

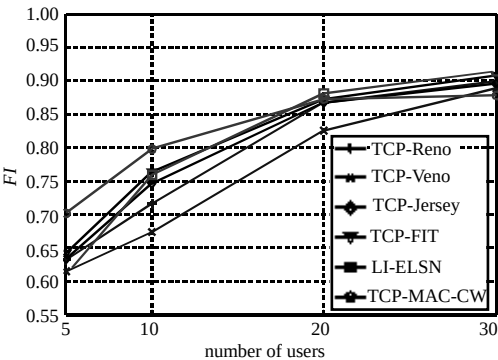


Fig.6 Fairness of different TCP variants on LTE downlink
图 6 LTE 下行公平性比较结果

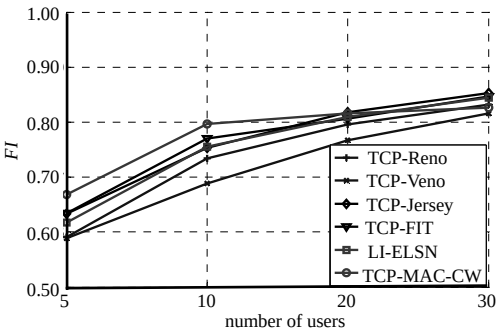


Fig.7 Fairness of different TCP variants on LTE uplink
图 7 LTE 上行公平性比较结果

从图 6 和图 7 可以看到, 网络负载不重的情况下, TCP-MAC-CW 的公平性较好。采用跨层优化方法的 TCP-MAC-CW 可以随 MAC 层调度器的调度结果来合理调整 TCP 数据发送速率, 对在调度中处于劣势的用户有所补偿。而当网络负载重时, TCP-MAC-CW 公平性下降, 但是与其他 TCP 拥塞控制机制的差距很小。因为当网络中有较多用户时, 调度竞争激烈, TCP-MAC-CW 对性能很差的用户的补偿有限, 而对性能较好的用户的实际吞吐量提高很大。考虑到 TCP-MAC-CW 吞吐量, 这样的公平性结果是比较理想的。

3 结论

虚假超时问题严重影响了 TCP 协议在 LTE 网络的性能。本文提出跨层优化的 TCP-MAC-CW 拥塞控制方法, 解决了虚假超时问题。仿真结果表明, 本文的 TCP-MAC-CW 方法能够提高 TCP 协议在 LTE 网络上的性能, 对解决 LTE 网络 TCP 虚假超时问题具有实际意义和较广阔的应用价值。

参考文献:

- [1] (美)特南鲍姆. 计算机网络[M]. 4版. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [2] (意)赛西亚,(摩洛哥)陶菲克,(英)贝科. LTE:UMTS 长期演进理论与实践[M]. 马霓,邬钢,张晓博,等译. 北京:人民邮电出版社, 2009.
- [3] Sardar B,Saha D. A survey of TCP enhancements for last-hop wireless networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2006,8(3):20-34.
- [4] Wang J,Wen J,Zhang J,et al. TCP-FIT:An improved TCP congestion control algorithm and its performance[C]// The 30th IEEE International Conference on Computer Communications. Shanghai:[s.n.], 2011:2894-2902.
- [5] Ji HoonYun. Cross-layer explicit link status notification to improve TCP performance in wireless networks[EB/OL]. (2009-01)[2012-03-06]. <http://jwcn.eurasipjournals.com/content>.
- [6] Klein,Leung T E,Haitao Zheng K K. Improved TCP performance in wireless IP networks through enhanced opportunistic scheduling algorithms[J]. IEEE Global Telecommunications Conference, 2004,5(3):2744-2748.
- [7] Ludwig R,Kartz R H. The Eifel algorithm:making TCP robust against spurious retransmissions[J]. ACK Communication Review, 2000,30(1):30-36.
- [8] Sarolahti P,Kojo M,RaatikamenK,et al. Forward RTO-Recovery(F-RTO):An algorithm for detecting spurious retransmission timeouts with TCP,Internet Engineering Task Force RFC5682[Z]. 2009.
- [9] Inamura H,Montenegro G,Ludwig R,et al. TCP over Second(2.5G) and Third(3G) Generation Wireless Networks,Internet Engineering Task Force RFC3481[Z]. 2003.
- [10] Francesco Vacircaa,Thomas Ziegler,Eduard Hasenleithner. An algorithm to detect TCP spurious timeouts and its application to operational UMTS/GPRS networks[J]. Computer Networks, 2006,50(16):2981-3001.
- [11] Jayanathan,Aiyathurai. TCP performance enhancement over UMTS network with RNC feedback[D]. [s.n.]:University of Canterbury, 2007.
- [12] Ramakrishnan K,Floyd S,Black D. The addition of explicit congestion notification(ECN) to IP,Internet Engineering Task Force RFC3168[Z]. 2001.
- [13] Matthias Malkowski,Silke Heier. Interaction between UMTS MAC scheduling and TCP flow control mechanisms[C]// International Conference on Communication Technology Proceedings. Aachen University:[s.n.], 2003:1373-1376.
- [14] Klaus Ingemann Pedersen,Troels Emil Kolding,Frank Frederiksen,et al. An overview of downlink radio resource management for UTRAN Long-term Evolution[J]. IEEE Communications Magazine, 2009,47(7):86-93.
- [15] Kuzmanovic A,Mondal A,Floyd S,et al. Adding explicit congestion notification(ECN) capability to TCP's SYN/ACK packets, Internet Engineering Task Force RFC5562[Z]. 2009.
- [16] 3GPP Technical Specification 36.213. Physical layer procedures,R10[Z]. 3GPP, 2012.
- [17] 3GPP Technical Specification 36.321,Medium Access Control(MAC) protocol specification,R10[Z]. 3GPP, 2012.
- [18] 3GPP Technical Specification 36.322, Radio Link Control(RLC) protocol specification,R10[Z]. 3GPP, 2012.
- [19] Andrews M,Kumaran K,Ramanan K,et al. Providing quality of service over a shared wireless link[J]. IEEE Commun., 2001,39(2):150-154.
- [20] Dzmity Kliazovich,Fabrizio Granelli,Simone Redana,et al. Cross-layer error control optimization in 3G LTE[C]// Global Telecommunications Conference. Washington:[s.n.], 2007:2525-2529.
- [21] Nguyen Tien-Dzung,Han Youngnam. A Proportional Fairness Algorithm with QoS Provision in Downlink OFDMA Systems[J]. IEEE Communications Letters, 2006,10(11):760-762.

作者简介:



胡子骥(1987-),男,江苏省无锡市人,在读硕士研究生,主要研究方向为移动通信系统的无线资源分配.email:tbacarrot@hotmail.com.

王旭(1986-),男,陕西省福平县人,在读博士研究生,主要研究方向为通信信号处理.

胡波(1968-),男,江苏省常州市人,博士生导师,教授,主要研究方向为数字信号处理、数字通信和系统设计.

杨涛(1970-),男,陕西省汉中市人,副教授,主要研究方向为宽带无线通信理论及信号处理.

冯辉(1980-),男,江苏省常州市人,讲师,主要研究方向为分布式信号处理理论及应用.