

无线局域网中 TCP 公平性研究综述

黄家玮 王建新

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

摘要 在无线局域网中,由于无线 MAC 层协议只能保证各无线节点的公平接入无线信道,如何确保传输层 TCP 流的公平性就变得十分重要。TCP 闭环拥塞控制的贪婪性、MAC 协议节点接入公平性和无线信道的异构性,导致 TCP 在无线局域网出现多种不公平问题。对当前存在的几种 TCP 不公平问题及相应的解决方法进行了分析和比较,阐述了目前亟待解决的主要问题和今后的研究方向。

关键词 TCP,公平性,无线局域网,MAC

Survey on TCP Fairness in Wireless Local Network

HUANG Jia-wei WANG Jian-xin

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract TCP fairness is an important issue in WLAN because the wireless channel is shared by all mobile stations. While the MAC protocol provides all the competing stations with equal opportunity for media access, it does not guarantee fair service provision at the transport layer. The greedy closed loop control nature of TCP congestion control, the long-term equal channel access probabilities guaranteed by MAC layer protocol, and the performance anomaly of wireless channel lead to the significant unfair bandwidth distribution between TCP flows. This paper attempted to address these TCP unfairness problems by first summarizing over several major reasons for such unfairness, an in-depth analysis and the detailed comparison between different solutions were proposed. Some new research directions for optimizing TCP fairness in WLAN were suggested.

Keywords TCP, Fairness, WLAN, MAC

1 引言

随着无线技术的逐渐成熟,无线接入网络已经成为 Internet 中的重要组成部分。其中,基于 IEEE 802.11 MAC 层协议的无线局域网(Wireless LAN)已经被广泛地部署在学校、车站、机场等信息热点地区^[1]。

然而,IEEE 802.11 协议的随机接入特性只能保证各节点在 MAC 层长期公平地接入无线信道,并不能保证 TCP 流公平使用无线网络资源。多变的无线信道、MAC 层协议的特性和 TCP 本身的拥塞控制机制都可能导致 TCP 协议在 WLAN 中出现各种不公平问题:(1) 由于 TCP 对 DATA 分组和 ACK 分组丢弃敏感度的不对称导致的上下行 TCP 流不公平;(2) TCP 闭环拥塞控制的贪婪特性造成上行 TCP 流之间不公平和 TCP 长短流不公平;(3) 无线信道的异质性和 MAC 层的公平接入特性使得快速和慢速 TCP 流间出现时间不公平和网络总体效率低下问题。针对这些问题,目前出现了多种改善 WLAN 中 TCP 公平性的协议和算法。本文首先归纳了这些改善公平性的机制,比较分析相应的解决方案,同时提出了研究方向。

2 上下行流不公平

在无线局域网中,接入节点 AP(Access Point)位于有线网络和无线网络的结合部,同时传输从有线网络到无线网络的下行流和从无线网络到有线网络的上行流。因为无线信道具有低带宽、高延时和高差错率的特性,AP 的下行缓存很容易成为从有线网络向无线网络传输的瓶颈。Pilosof 等人指出当 AP 出现拥塞丢包时,TCP 流会产生上下行不公平问题^[2]。由于下行流的 DATA 分组和上行流的 ACK 分组共同竞争下行缓存,当下行流 DATA 分组丢弃时,下行 TCP 流会降低发送速率;而当上行流的 ACK 分组丢弃时,因为 ACK 分组具有累计确认效应,上行 TCP 流不会因为 ACK 分组丢弃而减低发送速率。因此,TCP 拥塞控制机制对 DATA 和 ACK 分组丢弃敏感度的不对称导致了上行 TCP 流会压制下行 TCP 流。而且当同时存在多条上行和下行流时,由于 MAC 层 IEEE 802.11 协议使得包括 AP 的各无线节点具有相同接入信道概率,这也会造成上行流发送的概率高于下行流发送概率,加剧上下行 TCP 流的不公平性。

针对上下不公平问题,已经有很多典型的算法^[2-8]。依据

到稿日期:2008-03-23 本文受湖南省杰出青年基金(No. 06JJ10009),国家自然科学基金(No. 60673164),高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20060533057),新世纪优秀人才支持计划(No. NECT-05-0683)资助。

黄家玮 男,博士研究生,讲师,主要研究领域为计算机网络、网络拥塞控制,E-mail: huang_jiawei@sohu.com;王建新 男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络、网络优化理论、计算机优化算法。

这些算法所采用机制,可以分为 TCP 流限速、AP 缓存队列调度和 MAC 层协议改进三大类。

2.1 解决方案

(1)TCP 限速机制

TCP 限速机制依据当前 AP 缓存使用状态来限制上行流发送速率。文献[2]提出在 AP 上修改上下行 TCP 流 ACK 分组通告窗口的方法 ModifyACK,其通告窗口大小都与 B/n (B 为 AP 缓存大小, n 为上下行 TCP 流总数),从而通过限制 TCP 流的发送速率来实现上下行公平。VQ-RED^[3] 是一种保证上下行流公平的拥塞控制算法。VQ-RED 在 AP 上分别统计上下行流发送 DATA 分组的数量作为各上下行流的虚拟队列长度,并依据虚拟队长对通过 AP 的各流运用 RED 主动队列管理算法。算法中为各单流的虚拟队列设置相同拥塞丢弃门限,通过公平丢弃每流分组来确保上下行流公平。

(2)调度机制

调度机制在 AP 的缓存中对上下行流的分组实施调度发送,动态调节各流分组的发送概率,实现上下行公平。文献[4]将 AP 的缓存分成多个子队列分别来缓存各上下行 TCP 流的 DATA 和 ACK 分组。其工作原理如图 1 所示,调度算法动态调节各子队列的发包概率,通过提高 DATA 分组发送概率和降低 ACK 分组发送概率来实现上下行 TCP 流的公平。

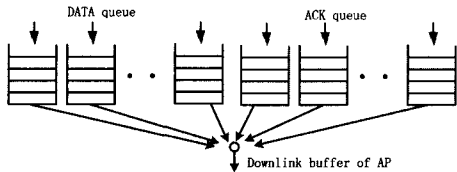


图 1 保证上下行公平的多队列调度算法

文献[5]在文献[4]的基础上提出将缓存分成两个子队列分别来缓存 TCP DATA 和 ACK 分组,在两个子队列间调度发送来实现公平性。文献[6]没有将缓存分成多个子队列,而是采用 LAS(Least Attained Service)的单队列调度算法。LAS 调度算法的原则是给接受最少服务的流赋予最高的调度优先级。其具体方法是:当一个分组到达时,LAS 依据其序列号将该分组插入到缓存队列的合适位置。如果某条流收到的分组越少,该分组插入的位置就越靠前,从而确保各下行流的 DATA 和上行流 ACK 分组都有相同的出队速率,并依靠 TCP ACK 的自同步来保证上下行流吞吐率公平。

(3)MAC 层协议改进

文献[7,8]从 MAC 协议的竞争机制改进和参数调节入手来提高 AP 发送分组的概率,提高下行流的吞吐率。文献[7]提出在 AP 节点实施下行补偿的接入机制(DCA)。DCA 机制如图 2 所示,如果发生上行流量占优时,AP 节点就不采用 802.11 协议的 DCF 退避竞争机制,而只等待一个小于 DIFS 的时间间隔 PIFS 就抢占信道,发送下行流的数据帧。由于其他无线节点采用 DCF 机制,DCA 机制大大提高了下行流的吞吐率。

在 IEEE 802.11e 协议中,每个结点为不同接入类别的业务提供多个发送队列,每个队列使用不同的协议参数如 CW_{min} , CW_{max} , AIFS (Arbitration Interframe Space) 分别竞争

信道以及不同的 TXOP 值来设定每次发送分组的个数。文献[8]针对 IEEE 802.11e 协议进行参数调节,一方面降低 AP 的最小竞争窗口 CW_{min} 来增大 AP 竞争信道成功概率,另一方面提高 AP 的 TXOP 值来增加每次发送 DATA 分组的个数,双管齐下提高网下行流的吞吐率。表 1 列出几种典型的解决上下行不公平问题的算法特征表。

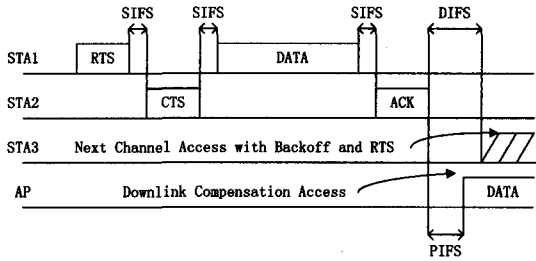


图 2 DCA 机制

表 1 几种解决上下行不公平问题的算法特征表

算法	机制	特征
ModifyACK ^[2]	网络层限速	修改 ACK 通告窗口
VQ-RED ^[3]	网络层限速	设置相等丢弃阈值
Multi queue ^[4]	网络层调度	AP 实施多队列调度
LAS ^[6]	网络层调度	AP 实施单队列调度
DCA ^[7]	MAC 协议改进	减少 AP 的退避时间
802.11e 修改 ^[8]	MAC 参数调节	调节 CW_{min} 和 TXOP

2.2 存在的问题

TCP 限速机制只依据 AP 节点局部状态信息来限制 TCP 流的发送速率,这类方法忽略了正在 TCP 连接在其他链路上传输的分组,过于保守地降低网络总体效率。

AP 缓存的多队列调度算法能较好地改善公平性,但实现相对较复杂。单队列的 LAS 调度算法在缓存拥塞程度较轻时能有效改善公平性,但当缓存丢包很严重而致使缓存队列中下行流的 DATA 分组稀缺时,LAS 算法的公平性调控能力变得很弱。

MAC 层协议改进算法的关键问题在于只适用于各节点发送饱和和流或节点数量很多的情况。实际在 TCP 的拥塞控制机制下,各无线节点并不是持续参与 MAC 层竞争信道。仅仅在 MAC 层调节各节点接入信道的概率并不是解决 TCP 流上下行不公平问题的关键。

3 快慢速流时间不公平

在无线信道中,因为信号衰减、干扰等原因,无线信道的传输质量与节点位置相关。而目前在 WLAN 中广泛采用自适应速率选择策略,如 ARF^[9],RBAR^[10],能根据特定时间内外界因素来决定无线节点的数据最佳发送速率,这就使得在 WLAN 中普遍存在不同数据传输速率。在 IEEE 802.11 无线局域网中,不论各节点的信道速率快慢,802.11 协议的 DCF 机制使得各节点都具有相同的发送概率,保证了基于吞吐率的最大-最小公平。而这种在多速率网络中的吞吐率公平会使得低速传输的流会占用大量的信道时间,无形中挤占了高速传输流的信道时间,造成快慢速流之间的信道时间不公平和 WLAN 总体吞吐率急剧下降^[11]。

针对在无线网络中公平和效率的冲突,文献[12]指出应该将比例公平作为无线网络的设计目标。Tan 等提出在多速率网络中应将时间公平作为设计目标^[13]。而实际上,在多速

率网络中的比例公平和时间公平的实际意义是一致的^[14]。目前实现时间公平主要通过 MAC 层 802.11 协议改进和流量控制两类,具体包括以下方法。

3.1 解决方案

(1) 基于 MAC 层发送帧数

文献[15]提出一种时间公平的 MAC 层协议 OAR(Opportunistic Media Access)。图 3 显示了 OAR 协议的工作原理。和 IEEE 802.11 协议中每次竞争到信道只能发送一个数据帧不同,OAR 将发送数据帧的数目设为 $TxRate/BaseRate$,其中 $TxRate$ 是节点当前发送速率, $BaseRate$ 是基本发送速率。这样,OAR 通过增加快速节点每次发送数据帧的数量来保证快速节点和慢速节点得到相等的信道时间,从而提高网络总体效率。但 OAR 协议也会大幅提高慢速节点的等待发送时间。

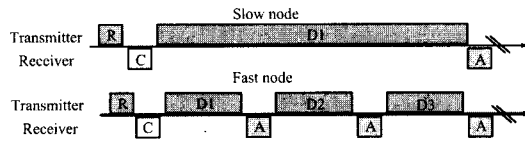


图 3 OAR 协议

(2) 基于 MAC 层信道接入概率

基于 IEEE 802.11 协议 DCF 接入机制,Idle sense^[16]协议根据无线信道速率反比设定各节点的竞争窗口 CW ,确保信道快速节点的 CW 较小,能获得较高的信道接入概率。文献[17]针对 802.11e 协议,分别依据信道速率调节各节点的 AIFS 和 CW_{min} 这两个参数保证时间公平。但调节 CW 和 CW_{min} 的问题在于会增加节点的退避时间,造成不必要的信道空闲。调节 AIFS 的缺陷则是当节点加入或退出网络时,其他节点的 AIFS 都需要重新计算和更新,计算和控制开销较大。

(3) 基于分组大小

由于无线信道发送延时与传输分组长度 MTU 成正比,和无线信道速率成反比,文献[18]提出依据节点的信道速率设置传输分组的长度。通过合并快速流的分组,分割慢速流的分组,保证各流在无线信道传输分组的长度依据信道速率成正比,从而保证快慢流分组的无线信道发送延时相等。但基于分组大小的方法可能需要减小分组的长度,这将提高传输的控制开销,降低网络的效率。

(4) 基于流量控制

除了 MAC 层协议改进的方法,在 AP 上对 TCP 进行流量控制也可以改善时间不公平性。TTPDE^[19]队列管理算法工作在 AP 下行缓存,当出现缓存拥塞丢包时选择丢弃发送延时最大的分组,当分组从缓存出队时选择发送延时最小的分组发送。这种极端的方法让快速流尽量长时间占据信道,尽最大可能提高网络效率,但同时 TTPDE 有可能造成低速节点长期处于饿死状态。

TFRED^[20]是一种 AP 上时间公平的主动队列管理算法。TFRED 算法依据各流的信道发送速率,为通过 AP 的单流设置不同的目标队列长度。当 WLAN 发生拥塞时,选择当前单流队长超过其目标队长最大的流丢包。这样,TFRED 算法既能避免、缓解拥塞,又可以保证各无线节点的时间公平性,提高网络的整体效率。表 2 列出几种典型的解决时间不公平问

题的算法特征表。

表 2 几种解决时间不公平问题算法特征表

算法	机制	特征
OAR ^[15]	MAC 层改进	调节节点每次发送帧数
Idle sense ^[16]	MAC 层改进	调节节点的竞争窗口
MTU 调节 ^[18]	MAC 层改进	按速率反比设 MTU 大小
TTPDE ^[19]	网络层流控	牺牲慢速流,最大化效率
TFRED ^[20]	网络层流控	依据流速设置丢包概率

3.2 存在的问题

在 MAC 层改进机制中,可以依据各无线节点的发送速率来设置各节点不同竞争窗口大小、帧间的时隙长度和每次发送包的个数等参数,以保证时间公平。但 MAC 层协议的改进方法主要适合各节点发送饱和流的情况,都没有考虑 TCP 的流量特性。实际上依据底层速率信息对 TCP 直接进行流量控制更符合 TCP 公平性需求。同时修改 MAC 层协议需要大范围更新网络硬件设备,在目前不大可能推广应用。

基于流量控制的方法主要在 AP 上进行集中式控制,能有效解决下行流的时间公平问题。但如何对上行流实施分布的流量控制目前没有很好的解决方法。

以上的时间公平算法都缺乏将无线信道速率调节机制、MAC 层协议和 TCP 流量控制协议相结合作综合考虑,同时时间公平的算法对网络其它性能的影响缺乏较深入研究。

4 其他不公平问题

4.1 上行流不公平

当 WLAN 中多条上行 TCP 流同时发送时,各上行 TCP 流的 ACK 在 AP 的下行缓存排队等待发送到无线节点。如果下行缓存出现拥塞而丢弃 ACK 分组,在上行流之间可能产生不公平问题。由于 ACK 分组的累计确认效应,TCP 发端在超时之前收到 ACK 分组就不会引发超时重传。当 ACK 分组拥塞丢弃时,大拥塞窗口的 TCP 流中正在传输的 ACK 分组较多,因此出现大量连续的 ACK 丢弃而引发超时重传的概率较小,表现出较强的健壮性。而小拥塞窗口的 TCP 流由于 ACK 分组丢弃而超时的可能性较高,从而造成拥塞窗口大小不同的上行流间吞吐率不公平。

文献[21]提出了在 AP 上对 ACK 分组进行调度来保证上行流间公平。为了依据各流的拥塞窗口来提高公平性,调度算法统计每流的 ACK 平均到达间隔,为 ACK 平均到达间隔大的流设置较小的 ACK 包排队上限。如果当前某条 TCP 流的 ACK 排队数量超过其排队上限,调度算法就选择该流的 ACK 分组优先发送。由于 TCP 流的拥塞窗口大小和 ACK 分组到达间隔成反比,调度的结果是使得小拥塞窗口流 ACK 分组的排队时间较小,从而获得了更高的 ACK 分组的发送机会,降低了发生超时重传的概率。

4.2 长短流不公平

目前短 TCP 流占了 Web 流量的绝大部分,短流的特点是流量很小,很可能在快速启动阶段就完成传输。当出现丢包时,短流由于无法进入快速恢复而不断地超时重传,吞吐率始终很小。而长流即使出现丢包,而由于其拥塞窗口可能较大,发端能收到重复 ACK 后启动快速恢复,仍然有较高的吞吐率。在高丢包率的无线信道中,如何保护短流的吞吐率变得十分重要。

文献[22]提出了带有补偿的 LLC 层调度机制。调度机制由 3 部分组成:信道状态测量、队列选择和发送补偿。在 AP 的下行缓存中将分组按流形成子队列,通过信道状态测量,选择流信道状态好的子队列发送。同时在发送分组时,首先计算各子队列应得的公平发送个数,并依据当前已发送分组个数计算每个子队列发送分组的补偿个数。通过这种依据历史信息的发送补偿方法,避免短流频繁地超时重传,提高长短流的公平性。

4.3 多 AP 不公平

在多 AP 的 WLAN 中各无线节点可以选择接入不同的 AP,而 IEEE 802.11 协议缺省方法是无线节点接入信号强度最大的 AP。由于无线节点随机分布,选择信号强度最大 AP 接入的方法可能造成在各 AP 之间出现负载不公平和网络整体性能下降。

在多 AP 无线局域网中各无线节点可能有多个可选择的 AP,如何定义 AP 间的公平性并实现公平策略是目前的研究热点。由于分布的随机性造成无线节点信道速率的差异,如果采用吞吐率公平会降低网络的总体吞吐率。但如果采用时间公平作为目标,无线节点很可能选择接入一个低速 AP,以得到更多的信道时间,这也会降低网络的总体效率。文献[23]进而提出了一种新的 Fulfillment-based 公平性(FBF)作为多 AP 无线局域网的公平性目标。FBF 将无线节点当前获得的带宽除以最大可能获得的带宽作为公平指标。FBF 的优势在于能够大幅提高网络的总效率。文献[24]指出实现多 AP 间公平是一个 NP 难问题,并提出了近似率为常数的近似算法。

结束语 研究无线局域网中保证 TCP 公平性的算法,可以从以下几个方面进行考虑:

(1) 研究跨层的 TCP 公平性模型

目前研究 TCP 公平性的模型存在一定的片面性,有的只考虑 TCP 协议自身的拥塞控制机制;有的仅仅考虑 MAC 协议 DCF 竞争机制和概率模型,都没有综合考虑不同层次协议之间的相互联动、相互制约关系。要利用无线传输的特性,对已有的 TCP 公平性模型进行改进,使它能够在动态地反映 TCP 流量控制方法与 MAC 层协议之间的关系,用来进行有效的公平性调节。

(2) 研究综合的公平性目标

已有的公平性策略一般仅针对某个具体的目标,如基于上下行公平的方法只考虑各流无线信道速率相同情况下实现上下行流吞吐率公平;基于上行流公平的方法仅考虑同一方向 TCP 流之间的公平性;基于时间公平的策略则只考虑如何依据信道速率调节各流的发送几率,来提高网络的总体效率。研究表明应该尽可能全方位地考虑公平性目标,从而得到综合的协同策略,提出有效的多目标最优解决方案。同时根据网络的使用情况和应用的需求,把公平性和网络效率之间的对立有机地结合起来,动态寻找有效的平衡点。

(3) 研究实现公平性的算法

目前在实现公平性算法的实现主要采用经验式或启发式设计,加以典型或局部的仿真试验验证,得到的算法往往无法适应快速变化的动态网络环境。普遍存在的固定门限设计方案也缺乏相应自适应调节机制。因而,在实现公平性算法时,应该强调模型和理论分析的重要性,依赖成熟且可行的理论

方法如控制论、优化理论等来设计高效的公平性方法,并使它们具有良好的动态自适应特性。在算法性能的评价和验证上,仅仅依赖仿真试验往往无法得出系统、可信和科学的判断,应从理论分析证明和真实网络实验床测试等方面来验证算法的有效性。

本文总结了与 WLAN 中保证提高 TCP 公平性的各种相关算法,并根据不同的策略对算法进行了分类,分别对改善上下行公平、时间公平、上行流公平、长短流公平和多 AP 负载均衡的协议和方法进行了分析,阐述了各自的特点和存在的问题,并且指出了进一步的研究方向。随着无线网络的应用范围越来越广,保证无线网络资源公平分配的研究会越来越深入,在不久的将来有望取得更好的研究成果。

参考文献

- [1] Kotz D, Essien K. Analysis of a campus wide wireless network // Proceedings of ACM MOBICOM. Atlanta, 2002
- [2] Pilosof S, Ramjee R, Raz D, et al. Understanding TCP fairness over wireless LAN // Proceedings of IEEE INFOCOM. San Francisco, 2003
- [3] Lin X, Chang X, Muppala J K. VQ-RED: An Efficient Virtual Queue Management Approach to Improve Fairness in Infrastructure WLAN // Proceedings of IEEE LCN. Sydney, 2005
- [4] Wu Y, Niu Z, Zheng J. Upstream Downstream Unfairness Issue of TCP over Wireless LANs with Per-flow Queueing // Proceedings of IEEE ICC. Seoul, Korea, 2005
- [5] Ha J, Choi C H. TCP Fairness for Uplink and Downlink Flows in WLANs // Proceedings of IEEE GLOBECOM. San Francisco, 2006
- [6] Ferrero D, Urvoey-Keller G. A size-based scheduling approach to improve fairness over 802.11 wireless networks // Proceedings of ACM SIGCOMM Post session. Pisa, Italy, 2006
- [7] Kim S, Kim B S, Fang Y. Downlink and Uplink Resource Allocation in IEEE 802.11 Wireless LANs. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(1): 320-327
- [8] Ng A, Malone D, Leith D. Experimental Evaluation of TCP Performance and Fairness in an 802.11e Test-bed // Proceedings of ACM SIGCOMM Workshop on Experimental Approaches to Wireless Network Design and Analysis. Philadelphia, 2005
- [9] Kamerman A, Monteban L. WaveLAN II: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band. Bell Labs Technical Journal, 1997, 2(3): 118-133
- [10] Gavin H, Nitin V, Paramvir B. A rate adaptive MAC protocol for multi-ho Pwireless networks // Proceedings of ACM MOBICOM. Rome, 2001
- [11] Heusse M, Rousseau F, Sabatell G B. Performance anomaly of 802.11b // Proceedings of IEEE INFOCOM. San Francisco, 2003
- [12] Radunovic B, Boudec J Y L. Rate Performance Objectives of Multi-ho PWireless Networks // Proceedings of IEEE INFOCOM. Hong Kong, 2004
- [13] Tan G, Gutttag J. Time-based Fairness Improves Performance in Multi-rate Wireless LANs // Proceedings of USENIX. Boston, 2004
- [14] Li B J, Soung C L. Proportional Fairness in Wireless LANs and Ad Hoc Networks // Proceedings of IEEE WCNC. New Orleans, 2005

- [15] Sadeghi B, Kanodia V, Sabharwal A, et al. Opportunistic Media Access for Multirate Ad Hoc Networks // Proceedings of ACM MOBICOM, Atlanta, 2002
- [16] Heusse M, Rousseau F, Guillier R, et al. Idle sense: An optimal access method for high throughput and fairness in rate diverse wireless LANs // Proceedings of ACM SIGCOMM, Philadelphia, 2005
- [17] Chou C T, Shin P G, Shankar S N. Contention-based airtime usage control in multirate IEEE 802. 11 wireless LANs. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(6): 1179-1192
- [18] Yoo S H, Choi J H, Hwang J H, et al. Eliminating the Performance Anomaly of 802. 11b // Proceedings of International Conference on Networking, Beijing, 2005
- [19] Seok Y S, Park J, Choi Y. Queue Management Algorithm for Multi-rate Wireless Local Area Networks // Proceedings of IEEE PIMRC, Beijing, 2003
- [20] Huang J, Wang J, Jia W. Downlink Temporal Fairness in 802. 11 WLAN Adopting the Virtual Queue Management // Proceedings of IEEE WCNC, Hongkong, 2007
- [21] Keceli F, Inan I, Ayanoglu E. TCP ACK Congestion Control and Filtering for Fairness Provision in the Uplink of IEEE 802. 11 Infrastructure Basic Service Set // Proceedings of IEEE ICC, Glasgow, Scotland, 2007
- [22] Bottiglieri M, Casetti C, Chiasserini C F, et al. Enhancing fairness for short-lived TCP flows in 802. 11b WLANs. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(1): 206-217
- [23] Zhou W, Qiao D. Fulfillment-based Fairness: A New Fairness Notion for Multi-AP Wireless Hotspots // Proceedings of IEEE ICC, Glasgow, Scotland, 2007
- [24] Bejerano Y, Han S J, Li L E. Fairness and load balancing in wireless lans using association control // Proceedings of ACM MobiCom, Philadelphia, 2004

(上接第 14 页)

数据中心,到利用 P2P 技术融入用户终端的第三代,在应用的推动下不断进化发展。不难看出,在充分利用网络资源、提高服务能力、降低内容分发成本的同时,CDN 在网络服务中所扮演的角色逐渐从幕后走向台前,从透明化用户服务到融入用户终端。下一代 CDN 将会在互联网基础上结合宽带无线网络、移动网络、高清电视网络,提供更丰富的网络应用支持和更高质量用户体验。一个能够为当前以及未来各种应用加速服务的 CDN 平台需要 CDN 学术界和业界共同探讨和研究。

参 考 文 献

- [1] Coffman K G, Odlyzko A M. Internet Growth: Is there a "Moore's law" for data traffic? Handbook of Massive Data Sets. Kluwer, 2001
- [2] Krishnamurthy B, Wills C, Zhang Y. On the use and performance of content distribution networks // ACMIMW, San Francisco, CA, Nov. 2001
- [3] Krishnamurthy B, Wills C. Analyzing factors that influence end-to-end web performance // WCW. Amsterdam, Netherlands, Apr. 2000
- [4] Johnson K, Carr J, Day M, et al. The measured performance of content distribution networks // WCW. Lisbon, Portugal, May 2000
- [5] Savage S, Collins A, Hoffman E, et al. Anderson. The end-to-end effects of Internet path selection // ACM SIGCOMM, Vancouver, British Columbia, Sep. 1999
- [6] Andersen D, Balakrishnan H, Kaashoek F, et al. Resilient overlay networks // ACM SOSOP, Alberta, Canada, Oct. 2001
- [7] Savage S, Anderson T, Aggarwal A, et al. Detour: a case for informed Internet transport. IEEE Micro, 1999, 19
- [8] Rabinovich M, Spatscheck O. Web Caching and Replication. Addison-Wesley, 2002
- [9] Saroiu S, Gummadi K P, Dunn R J, et al. An analysis of internet content delivery systems // Proc. of Symposium on Operating Systems Design and Implementation, Dec. 2002
- [10] Pan J, Hou Y, Li B. An overview of DNS-based server selections in content distribution networks. Computer Networks, 2003, 43(6): 695-711
- [11] Mao Z, Cranor C, Douglass F, et al. A precise and efficient evaluation of the proximity between web clients and their local DNS servers // USENIX Annual Technical Conference, Monterey, CA, June 2002
- [12] Nakao A, Peterson L, Bavier A. A routing underlay for overlay networks // ACM SIGCOMM, Karlsruhe, Germany, Aug. 2003
- [13] Su A, Choffnes D, Kuzmanovic A, et al. Drafting behind Akamai (travelocity-based detouring). ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(4): 435-446
- [14] Edge Side Includes. <http://www.esi.org>
- [15] Kontothanassis L, Sitaraman R, Wein J, et al. A Transport Layer for Live Streaming in a Content Delivery Network. Proceedings of the IEEE, Special Issue on Evolution of Internet Technologies, 2004, 92(9): 1408-1419
- [16] Cherkasova L, Lee J. FastReplica: Efficient Large File Distribution Within Content Delivery Networks // 4th USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems, Mar. 2003
- [17] Park K, Pai V S. Deploying large file transfer on an http content distribution network // Proceedings of the First Workshop on Real, Large Distributed Systems (WORLDS '04), 2004
- [18] CDN Market Dynamics, Analysis and Streaming Share: 2005 - 2006, AccuStream iMedia Research, Mar., 2006. <http://www.researchandmarkets.com>
- [19] Parker A. P2P in 2005, report from Cachelogic, 2005
- [20] Rodriguez P, Tan S, Gkantsidis C. On the feasibility of commercial, legal P2P content distribution. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(1): 75-78
- [21] Kim H. P2P overview. Tech. rep. Korea Advanced Institute of Technology, Aug. 2001
- [22] Xu D, Kulkarni S, Rosenberg C, et al. A CDN-P2P hybrid architecture for cost-effective streaming media distribution. Computer Networks, 2004, 44(3): 353-382
- [23] Rawflow. <http://www.rawflow.com>