

内容分发网发展综述

刘 瑜¹ 朱光喜¹ 尹 浩² 刘雪宁²

(华中科技大学电信系 武汉 430074)¹ (清华大学计算机系 北京 100084)²

摘 要 随着互联网的高速发展,网络服务对于内容传输的质量要求也越来越高,内容分发网(Content Delivery/Distribution Networks,CDN)被证明是一种提高网络性能和加速网络业务的有效方式,在 10 年的时间内成为互联网不可或缺的核心技术之一。以 CDN 架构的演变为标准,将 CDN 技术的演进过程分为缓存辅助 CDN、光纤辅助 CDN 以及对等网辅助 CDN 三个阶段,阐述对于 CDN 关键技术在互联网需求推动下的研究与发展,并展望 CDN 未来的发展趋势。

关键词 内容分发网,互联网,对等网

Content Delivery/Distribution Networks: Overview

LIU Yu¹ ZHU Guang-xi¹ YIN Hao² LIU Xue-ning²

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)¹

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)²

Abstract Over the last few decades, Internet has drawn people from all over the world, mainly driven by the emergence of the Web (World Wide Web, WWW). With the rapid growth of Web sites and also the scale of Internet, the QoS (Quality of Service) requirements of content transportation of Web sites have been more and more critical. Content Delivery/Distribution Networks (CDN) is proved to be an efficient way to improve the performance of network and accelerate the network operation and it has become one of the essential kernel technologies of Internet within the last decade. This paper categorized the evolution process of CDN into three stages based on the changes of its architectures. The first generation of Cache-assisted CDN alleviated the load burden on source by deploying surrogates (cache servers) to the edge of networks which is closer to the clients. The second generation built highway to guarantee the bandwidth between surrogates by using fiber links, so called Fiber-assisted CDN. The third generation of Peer-assisted CDN utilized the extra resource of clients through the cutting edge Peer-to-Peer (P2P) technology, to elevate the scalability and reduce the cost. This paper described the research and development of CDN technologies driven by the requirements of Internet. The future trend of CDN was also discussed.

Keywords Content delivery/distribution network (CDN), Internet, Peer-to-Peer (P2P)

1 引言

上世纪 90 年代中期开始,随着网络在世界范围内的普及,互联网进入飞速发展期,Web 站点也以指数级增长^[1]。伴随而来的是网络通信对于内容传输速度、准确性和可用性等服务质量的要求越来越严格。当大量用户访问 Web 站点时,随着访问量的增加,网站负载增大,可能造成网站设备和资源不堪重负,从而导致网站过载而延迟响应甚至失效,最终影响到网站的用户体验。

早期研究提出了集群(clustering)、多径(multihoming)和镜像(mirroring)等技术,用于解决由于服务器处理能力或网络传输带宽不足引发的失效和拥塞问题。代理缓存技术作为镜像技术的改进也在 CDN 得到了采用。

自 1998 年第一个 CDN 从 MIT 实验室诞生,到 2007 年

底增长到 28 个大型提供商,CDN 经历了 10 年飞速发展壮大的过程。本文根据 CDN 架构的特点提出 3 阶段的划分方式,如图 1 所示。

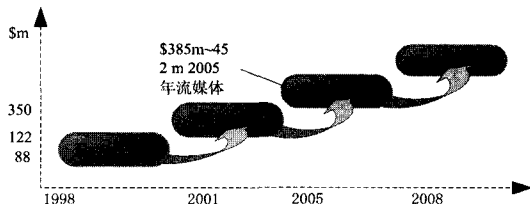


图 1 CDN 的发展

第一代 CDN, 本文将其称为缓存辅助 (Cache-assisted) CDN, 利用部署在全球范围内边缘网络中的缓存服务器以最快的速度响应用户请求, 针对 Web 文件和图片等静态内容进行加速。内容分发成为商用 CDN 的专业服务项目。随着宽

到稿日期:2008-03-20 本文受国家自然科学基金(编号 60502023, 60473086 和 60673184)及国家 863 高技术项目基金(编号 2007AA01Z419)资助。

刘 瑜、刘雪宁 博士研究生, 主要研究方向为多媒体通信; 朱光喜 教授, 博士生导师, 主要研究方向为多媒体通信、移动通信; 尹 浩 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为多媒体通信、信息安全、数字版权。

带接入的普及,动态页面、大文件和流媒体逐渐成为内容分发的主体,第一代 CDN 面临内容从源服务器有效分发到边缘服务器的问题。第二代光纤辅助(Fiber-assisted)CDN 采用了专用光纤链路构建属于 CDN 的骨干网,从而达到控制 CDN 内部传输的目的,将分散的边缘数据中心连接成 CDN 专有的网络,以保证服务器间内容传输的高速、高效及可靠。随着用户对网络视频服务质量期望的提高和高清晰视频流媒体的出现,流媒体直播/点播成为 CDN 服务的重点,也是消耗其资源的最大因素,甚至影响到其服务质量和可扩展性。P2P 技术被引入 CDN 以提高可扩展性并同时降低成本,形成第三代对等网辅助(Peer-assisted)CDN。

内容路由、内容分发以及内容存储和管理是 CDN 的关键技术。内容路由技术解决如何选择合适的代理缓存和路由,将内容最快、最可靠地发送给用户的问题;内容分发技术负责将数据从源传输到代理缓存;内容存储和管理技术涵盖了内容在缓存中的存储、更新以及索引、复制等方面。本文将分别介绍每个阶段推动 CDN 发展的原因、架构特点和关键技术的发展变化及其带来的结果。最后展望 CDN 技术未来的发展趋势。

2 第一代:缓存辅助(Cache-assisted)CDN

CDN 的服务对象分为两类:一类是内容提供者,一般是大型的 Web 网站,称为客户;另一类是内容的接受者,一般是 Web 网站的服务对象,称为用户。CDN 的目的就是将客户发布的内容安全、快速、有效地发送到用户,同时将用户的统计信息提供给客户。CDN 发展至今出现过各种架构设计和技术,然而都有类似的组成要素和基本网络架构。

2.1 缓存辅助 CDN 架构

一个 CDN 系统包括:多个缓存内容的代理服务器(通常部署在边缘网络中)、将所需内容传输到代理服务器的内部路由和网络以及一套日志信息统计机制^[2]。在 CDN 中,用户访问源服务器的传统 C/S 通信模式被分为两次通信过程:一次在用户和代理服务器之间,另一次在代理服务器和源服务器之间。第一代 CDN 网络架构如图 2 所示。

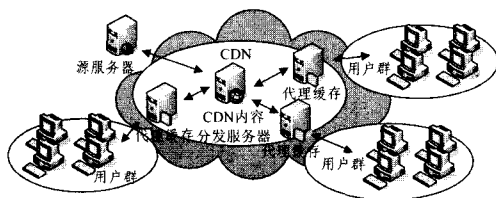


图 2 缓存辅助 CDN 网络架构

客户通过源服务器将内容交给 CDN,经 CDN 内部网络路由绕过拥塞的链路,最后由合理部署的代理服务器直接发送给用户。CDN 为客户节省了架设更多服务器的投资以及维护架构的运作开销,在减轻源服务器负载的同时提高内容发布的可用性和可靠性,让用户得到更快、更稳定的服务。

2.2 缓存辅助 CDN 中的关键技术研究

DNS(域名服务器)重定向和应用层重定向是最常用的两种内容路由技术。DNS 重定位能够根据用户位置、服务器负载和网络状况动态指定为用户服务的设备。DNS 查找时间可能会使用户感知的响应时延明显增加,DNS 系统本身也可

能成为瓶颈。URL 重写也被称为内容改写,是最常见的应用层重定向技术,既能在源服务器发布内容前重写,也能在响应用户请求时根据用户位置动态改变。

DNS 重定向和 URL 重写以各自的方式对全局服务器负载均衡(Global Server Load Balance,GS LB)提供了支持,都可以根据实时监视设备工作状况和网络流量,绕过拥塞的网络,隔离出现问题的设备和网络,避免任何服务器成为热点而过载。相比较而言,DNS 重定向由于对用户屏蔽了源,对源服务器影响更低、安全性更高,因而得到广泛的采用。

研究表明,CDN 降低了平均下载响应时间,而 DNS 则增加了明显的时间开销^[2]。相对于直接从源服务器获取数据,内容分发服务器仍然减少了延迟^[3]。在评估了两种不同的重定向技术后,文献^[4]认为 CDN 仅需要避免选择到不合适的服务器,而不必选择最佳服务器。

通过间接的端到端路由,CDN 可以在分散的节点上建立虚拟覆盖网^[5],如弹性覆盖网(Resilient Overlay Network, RON)^[6]。但 RON 所必需的网络环境监视机制限制了可扩展性,仅适用于小规模覆盖网。CDN 驱动的绕行(Detour)基于覆盖网的路由系统,能够提高用户可靠性和性能^[7]。

推(PUSH)和拉(PULL)是两种主流的内容分发技术。PUSH 是一种主动分发的技术,通常由内容管理系统发起,将内容从源或中心媒体资源库分发到各边缘代理缓存点。PUSH 分发的主要问题是分发策略,内容分发可以 CDN 手动确定,也可以通过智能分发。根据用户访问的统计信息,以及预定义的内容分发规则,确定内容分发的过程。PULL 是一种被动的分发技术,PULL 分发通常由用户请求驱动。在实际的 CDN 系统中,通常两种分发方式都支持。内容被标上有效期,自源 PUSH 到代理缓存,而代理缓存也会主动 PULL 更新过期内容以及未被缓存的用户请求数据。

缓存辅助 CDN 主要传输内容是静态的文本和小尺寸图片。复制(Replication)技术被广泛采用,以提高系统的性能^[8]。随着源服务器上内容的更新,代理缓存中的内容就会过期,过于频繁的更新查询又会增加设备和网络的负载。在缓存这些静态内容的同时,保存一个有效期属性,代理缓存就可以知道内容过期与否,决定是否向源请求更新。CDN 所服务客户的规模不同,各自的用户群体也有区别,需要将不同客户的内容在同一个 CDN 的众多服务器上存储和发布,既满足用户的需求,又相互隔离,互不影响。基于会话(session)的方式利用 Web 的访问日志统计用户访问过的相似内容,并以此发现行为类似的用户群,以得到内容分配存储到不同服务器的最佳方式。另一种基于 URL 的方式统计 Web 网站中的热点数据,并将 URL 相近的热点数据作为一个聚集单元一起复制。这种复制机制的性能比全站复制提高了 4 到 8 倍,但计算复杂度太高。

CDN 通常支持一个可以跟踪和收集路由、分布和发送信息的统计机制。通过现有 HTTP,FTP 或 SIP 等协议从服务器等设备收集服务器负载、带宽和服务内容使用情况日志信息。这些日志信息还可以被用来维护 CDN 的网络结构,作为部署服务器的依据,以减少通信和流量开销。

2.3 第一代 CDN 对网络发展的推动

通过在边缘网络内部署缓存服务器,第一代 CDN 以最近的方式连接数据源和用户,减少内容提供者对服务器等基础

架构设备和运行维护的投入,减轻源服务器负载,为访问用户提供更快、质量更高、更可靠的服务;同时能够通过内部网络的均衡来绕过拥塞,提高 Web 的可扩展性,疏散突发性的大量访问。

3 第二代:光纤辅助(Fiber-assisted)CDN

随着互联网技术和媒体技术的发展,Web 网站也进一步向用户提供动态和流媒体内容。在对 UW 校园网流量 HTTP 协议成分百分比 2002 年与 1999 年的对比分析中发现,网页文本与图片含量分别减少了 43%和 59%,而视频和音频则分别增加了 400%和 300%^[9]。互联网中传输的内容向尺寸更大的文件和流媒体变化。

3.1 光纤辅助 CDN 架构

随着传输内容由 kB 级的静态文件转变成视频为主的 MB 级的媒体文件和 kbps 级的媒体流,CDN 无法满足从源到边缘服务器内容分发所需的时延等服务质量和带宽要求。将分散的边缘数据中心用保证带宽、时延的专用线路连接成自有的网络,成为最直接有效的解决办法。CDN 网络也逐渐转变成成为骨干专线与边缘数据中心结合的分发质量可控的自有网络。图 3 为有骨干光纤链路辅助的第二代 CDN 网络架构示意图。

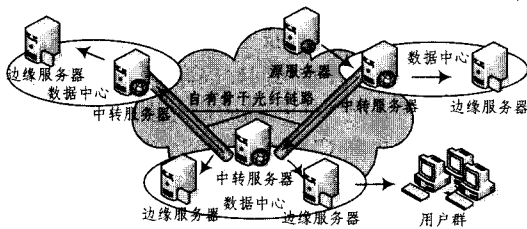


图 3 光纤辅助 CDN 网络架构

3.2 光纤辅助 CDN 中的关键技术研究

由于基于 DNS 的负载均衡为系统提供了更高的可控性和可扩展性,因此 CDN 多采用以 DNS 重定向的方式,部分配合静态 URL 重写。通过将客户内容 URL 地址静态转换为按 CDN 规则改写的地址,用户可直接通过 CDN 的动态 DNS 寻找到最适合的服务器。然而,域名映射的动态更新需要得到应用程序的支持,对于 DNS 系统的依赖也是采用这种方式的 CDN 容易受到攻击的软肋^[10]。

此外,这一阶段有些研究致力于基于 DNS 控制的服务器部署和选择问题。合理的服务器部署能够在使用户感觉到性能最优的同时把网络架构开销降到最低。贪心(Greedy)算法、热点(Hot Spot)算法和基于树的复制(Tree-based replicas)算法都提出了如何部署代理服务器的位置,以达到在改进性能的同时保持较低的架构开销的机制。实验证明,采用贪心算法的服务器部署策略能得到接近最优的性能^[3]。另一个问题是用户与其使用的域名服务器往往不在临近的网络拓扑内,因此基于 IP 地址的服务器选择的准确性受到怀疑^[11]。

为了限制覆盖网探测所需的资源,更多的研究将重点放在选择覆盖网时减少端到端测量需求。拓扑探测专用的路由底层协议帮助 CDN 利用获取的自治系统(Autonomous System, AS)路径信息在通信节点间建立分散的路径^[28],其潜在的问题是 AS 路径推断的准确性。AS 路径信息的精确性往往可能比期望的低^[11]。文献^[13]第一个提出在不使用大量

路径探测或监视的前提下,依靠 CDN 测量定位和使用高质量的 Internet 路径。

缓存技术只能存放静态内容,动态内容和流媒体内容无法采用代理缓存方式发布。为了加速用户对动态内容的获取速度,C/S 模式中服务器与用户间 TCP 连接被分成源服务器与代理以及代理与用户间两个 TCP 连接,通过代理中转动态数据,缩短响应时间。采用 ESI(Edge Side Includes)技术^[14],Web 网站可以将动态页面进一步分为静态部分和动态部分,由边缘服务器重新整合再提供给用户。

对于流媒体内容,为了进一步减轻源服务器的负载,CDN 通常为内容源提供专用的接入服务器(Entry Point)。流媒体内容由接入服务器从源服务器获取,再根据需要分发到各边缘服务器,最后由边缘服务器提供给用户。然而,随着用户规模的不断扩大,为了使用户享受的服务质量得到保证,需要部署更多的边缘服务器,这样仍然会使接入服务器成为瓶颈。一种三层组播传输架构利用应用层组播(Application Layer Multicasting, ALM)构建一个架设在 CDN 专网上的虚拟拓扑网络,为流媒体直播这种特殊的内容分发服务^[15]。

第二代 CDN 在边缘缓存中还需要对 MB 级的大文件进行存储和管理,对于大文件在缓存中存储和管理技术的研究成为复制技术的重点。FastReplica 将原始文件分割为相同大小的片段,分别分发到不同的 CDN 服务器上,再由这些服务器相互之间将数据补充完全^[16]。该机制可以减小对源服务器的负载,提高文件在 CDN 服务器中的部署效率。在不对传统基于 HTTP 传输优化的 CDN 架构进行硬件和大的软件改动的前提下,CoDeploy 通过在 CDN 服务器上部署代理,将文件分为 60kB 左右的小块,利用 CDN 对这种大小文件分发效率高的特点,达到减小 CDN 负载,提高传输效率的目的^[17]。其主要困难在于解决各服务器的协同服务中的同步问题。

3.3 第二代 CDN 对网络业务的加速

拥有骨干光纤链路的第二代 CDN 对互联网业务的支持能力进一步提高,使得动态内容、流媒体内容以及大文件下载都能得到支持。由于对不同内容根据其特征采用不同的内容分发以及内容存储和管理方式,CDN 市场得到细分。在传统 CDN 静态网页加速之外,商用 CDN 纷纷推出动态页面加速和流媒体直播加速等产品和解决方案。2005 年全球仅流媒体市场就在 3.85 到 4.52 亿美元^[18]。

4 第三代:对等网辅助(Peer-assisted)CDN

处理器能力的增强和存储介质价格的下降带来的是软件、游戏以及媒体文件大小开始以 GB 为计算单位。大型游戏发行日的访问下载流量对任何 CDN 都是巨大的开销。个性化视频“播客”网站为用户提供视频录制、上载和共享的服务,改变了传统内容由网站提供的方式,也为 CDN 的内容分发带来了新的挑战。

尽管 CDN 拥有光纤骨干网络和新的传输架构以提高流媒体分发的效率和服务质量,但诸如上述的新兴内容分发需求使得边缘服务器再一次成为瓶颈,部署更多的服务器对于 CDN 来说已经无法经济有效地解决问题。P2P 的高性价比则重新得到了传统 CDN 的重视。

P2P 技术是分布式内容分发的另一个方向,几乎与 C/S

模式的内容分发技术并行发展。和 CDN 相反, P2P 的核心思想完全抛弃了传统的 C/S 模式, 连接中的每个节点的功能相同, 并具有同等的重要性。P2P 技术充分利用了网络中数量众多的普通节点的资源(带宽、存储和 CPU 处理能力)。在一定意义上, P2P 技术成为 CDN 的强大竞争者。P2P 技术的高可扩展性、低配置需求、高性价比使其占有不少优势。实际应用中, P2P 技术已经在文件分发和流媒体直播点播等领域取得了显著的成功。从 1998 年到 2004 年, Web 应用在互联网中的流量从 64% 下降到 32%, 而 P2P 则从零增长到 58%^[19]。但是 P2P 技术仍然有一些尚未解决的问题, 包括由网络地址转换(Network Address Translation, NAT)带来的端到端连接性问题、分发内容的误传/污染/盗版问题、ISP 提供商对 P2P 应用消耗大量带宽的抵制、缺少合适的收费机制、对服务内容缺乏性能保证和可管理性、缺少协作的激励机制等^[20]。另一方面, 将 P2P 技术引入 CDN 降低成本所带来的前景是十分诱人的。如何将 P2P 技术和 CDN 结合起来, 是最近几年 CDN 研究的一个热点问题。

4.1 对等网辅助 CDN 架构

对等网辅助 CDN 从 P2P 技术角度出发, 将 CDN 代理服务器改造为可靠的超级节点(Super Nodes), 以用户为 P2P 网络的对等节点, 构成 P2P 覆盖网, 如图 4 所示。这种方式中用户不再仅仅是被动的服务接受方, 也可以为其他用户提供服务。

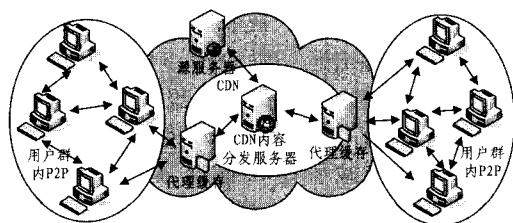


图 4 对等网辅助 CDN 网络架构

4.2 对等网辅助 CDN 中的关键技术研究

对等网辅助的 CDN 是近两年来提出的新型架构, 其内容路由方式和内容分发方式大多数采用 P2P 路由和分发技术中合适的方案。

由于内容来源相对固定, 当前对等网辅助 CDN 采用的是混合分散化体系。在这种系统中, 边缘服务器作为中央服务器通过维护元数据目录, 描述对等节点存储的共享文件来帮助对等节点间交互。尽管端到端交互和文件交换可能直接在两个对等节点间进行, 中央服务器通过执行查找和认证存储文件的节点来帮助这种交互^[21]。

针对不同的实际应用的研究也提出了 CDN 与 P2P 混和的解决方案。针对实时文件流传输, CDN-P2P 混和架构下使用 CDN 的边缘服务器作为客户端 P2P 传输的种子(Seed), 提供索引目录和原始文件流^[22]。服务器与客户端参与文件流传输的程度是其研究的重点对象。整个文件流的服务时间被分为纯 CDN 服务、CDN 与 P2P 共同服务以及纯 P2P 服务 3 个阶段。通过对客户参与标准的比较, 分析出能够将服务器从分发该文件任务中释放出来的时间。总的来说, 最重要的影响因素为文件流带宽、文件长度、服务器服务带宽以及客户端平均上行带宽。PSN(Peer-assisted Streaming Network) 采用 CDN-P2P 混和架构的流媒体直播系统^[23]。用户在得到

稳定数据流后成为其他用户可能的数据来源。

4.3 第三代 CDN 的优势

以中流媒体直播业务为例, 定量分析 P2P 技术带来的益处。P2P 流媒体直播服务中一个关键的指标是单台服务器的放大率 α , 其中 m 和 b 分别表示用户平均上载带宽和流码率, l 表示 P2P 客户端最大层数。则有:

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\beta - l}{\beta - 1}, & \beta > l \\ +\infty, & \beta \geq l \end{cases} \quad \beta = \frac{m}{b}$$

设流码率 $m = 200\text{kbps}$, 用户层数 $l = 7$, 服务器带宽 100Mbps 。考虑用户平均上载带宽 $m = 128\text{kbps}$ 和 $m = 300\text{kbps}$ 两种情况, 结果如表 1 所示。

表 1 对等网辅助 CDN 放大率

m(kbps)	β	α	用户数	节约带宽 bps(%)
128	0.64	2.6	1,300	160M (61.54%)
300	1.5	32	16,000	3.1G(96.88%)

可以看到, P2P 技术为 CDN 节省成本的潜力是巨大的。P2P 和 CDN 技术的互补性显示出两种新兴技术结合的前景。P2P 技术低成本、高可扩展性的优点是 CDN 所缺少的; 而 CDN 的可靠性和可管理性为解决 P2P 商业化的最大阻碍提供了可能。

在内容分发、存储和管理技术中, CDN 与 P2P 相结合的思想为解决大规模用户并发访问时提高 CDN 服务容量并同时保证服务质量问题提供了广阔的研究空间。利用 P2P 技术的规模效应可以提高 CDN 的容量以解决 Flash Crowd 问题, 并使预留/消耗的带宽成本降低; 还可以为日益增长的媒体流和下载服务提供更好的服务质量。

对等网辅助 CDN 仍然处于发展阶段, 引入 P2P 一方面提高了 CDN 可扩展性, 但同时给稳定性和可靠性带来了隐患, 并使 CDN 中原本就繁琐的内容管理更加复杂。这些都是 CDN 的新挑战。P2P 技术将融入到 CDN 网络从架构到内容路由、分发以及存储和管理的各个层面, 对两者的研究和应用都会产生巨大的影响。

5 CDN 架构和技术的研究和发展趋势

在 CDN10 年的发展历程中, 我们可以清晰地看到网络架构和关键技术以应用为向导, 以网络内容服务方式的翻新、需求的提高为推动力, 以最快的响应速度直接为各种新兴的网络应用服务。

近年来社会网络站点(Social Network Sites, SNS)结合了论坛、个人主页、博客等应用, 逐渐发展成一种能够提供丰富应用的网络社区系统, 拥有 1 亿多用户。数千万的月访问用户数对图片、视频等媒体内容的动态应用交互也造成了服务带宽和计算能力的沉重负载, 亟需 CDN 提供合适的解决方案。另一方面, 互联网发展至今已经不仅限于计算机终端, 无线网络、移动网络和电视网络使互联网覆盖范围扩展到个人移动设备和家庭娱乐设备。智能手机、数字电视机顶盒及家用游戏机都具备了一定的网络功能。用户对网络应用在移动多媒体、高清视频等新领域的服务质量的期望更胜于计算机终端, 并且对各种应用整合服务的需求也更加显著。

CDN 从第一代边缘缓存、第二代架设光纤骨干网连接的

(下转第 46 页)

- [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] Bottigliglio 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 SOSP. 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, Douglis 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>