

基于 P2P 和 CDN 的混合流媒体分发模型及分析 *

臧运港, 陈光喜

(桂林电子科技大学 计算机与控制学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 在 CDN 和 P2P 两种主流的流媒体分发技术的基础上,提出了基于系统流量的混合流媒体分发模型,根据系统中节点数量和媒体流量之间的关系,在 CDN 自治域内实现 CDN 和 P2P 的混合式服务,并对上述理论进行了仿真。实验结果表明,与传统的 CDN 和 P2P 相比,新的混合模型既可以减少主干网络的流量,又能在不降低流媒体质量的情况下,有效降低 CDN 服务器压力,减少系统的响应时间,提高网络利用率。

关键词: 内容分发网络; 对等网络; 流媒体; 混合流媒体分发模型

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2010)06-2208-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.06.060

Hybrid streaming media distribution model based on P2P and CDN

ZANG Yun-gang, CHEN Guang-xi

(College of Computer & Control, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Based on CDN and P2P, this paper provided a new HSDM. According to the relation of peers and streaming capacity in the system, realized and then simulated the hybrid model. The result shows that compared with traditional CDN and P2P, this new hybrid model obviously reduces the flow of backbone network. And also, with this new method can effectively reduce the pressure of CDN servers and the response time of system without compromising the media quality delivered, and increases the network utilization.

Key words: CDN(content distribution network); P2P(peer-to-peer); streaming media; hybrid streaming media distribution model (HSDM)

0 引言

随着网络技术的进步,人们对所分发的实时流媒体的质量和分发速度提出了更高的要求。在实时流媒体分发领域,最为常用的是 CDN 和 P2P 两种技术。

CDN 技术最初用于 Web 服务。当用户向 Web 服务器发送请求时,利用 DNS 的重定向机制,将其重定向到离用户最近或负载最低的 CDN 服务器上,以加快响应速度和优化热点内容分布,达到平衡 Web 服务器负载和降低网络带宽消耗的目的。这一技术同样可以应用于网络流媒体服务。由于流媒体本身的特点,大量用户对热点文件的重复请求,使得网络中存在大量冗余数据,CDN 服务器的处理能力和出口带宽就成为系统瓶颈;另外,CDN 服务器部署和维护的高费用,也增加了服务提供商和客户的成本。当前相关研究主要从副本放置算法^[1]、内容路由^[2]、负载均衡和重定向机制^[3]等方面对 CDN 技术进行了改进,使得系统的服务性能和健壮性得到了提高,但是仍未能有效解决网络流量消耗和系统瓶颈的问题。

与 CDN 不同,P2P 内部所有节点的地位均等,节点之间不需要互联网路由器和网络基础设施的支持,成本低、易于部署;同时,P2P 节点在下载文件时还上传给其他请求节点,扩大了用户组的规模,提高了系统效率。然而,由于没用中心服务器,P2P 节点之间的内容交换缺乏统一的管理,内容的安全性无法

保证;流媒体分发时需调动较多的种子节点,节点之间的频繁交互占用了大量带宽;在节点数目太少时,会造成网络传输中断。目前大量研究分别从文件访问控制机制^[4]、容错机制和节点激励机制^[5]角度,对 P2P 进行了改进,但仍不能有效降低主干网络流量,流媒体分发的启动速度仍然与种子节点的数量密切相关。

目前,国内外对于 CDN 和 P2P 的混合结构的研究尚处于起步阶段。文献[6]提出了基于泛洪的紧急消息广播技术,但是不适于大型的流媒体分发。文献[7]是侧重系统的安全认证,在非结构化的 P2P 网络中引入访问控制机制,对分发策略进行了分析,却未涉及系统流量的控制。文献[8]利用 CDN 服务器的去中心化,将 POP 节点(points of provider)构成一个 P2P 网络,实现副本放置,但其侧重的是服务器层面的 P2P 实现和负载均衡,自治域内的资源并未充分利用,CDN 处理能力和出口带宽仍然是系统瓶颈。鉴于此,本文从系统流量控制的角度,提出了基于 CDN 和 P2P 的新的混合流媒体服务模型。系统由 CDN 服务器及 P2P 网络组成的自治域构成:在用户请求较少时,采用传统的 C/S 服务模式;而在用户不断增加的情况下,由 CDN 作为索引服务器,将客户端节点构成一个中心化的 P2P 网络,这样既能保证流媒体服务的质量,加快 P2P 的启动过程,又能将媒体流量控制在自治域范围内,从而有效降低主干网络带宽和服务器部署成本。

收稿日期: 2009-10-13; **修回日期:** 2009-12-05 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(10501009,10661005);广西教育厅科研资助项目(200807LX112)

作者简介: 臧运港(1983-),男,硕士研究生,主要研究方向为网络流媒体的传输(zangyungang@gmail.com);陈光喜(1971-),男,教授,博士,主要研究方向为多媒体及数字水印算法。

1 系统模型

1.1 传统 CDN 和 P2P 服务模式的比较

传统的 CDN 服务模式是将远程的流媒体服务器上的内容缓存到用户网络边缘的 cache 服务器上,向自治域内的节点提供高质量的流媒体服务;而 P2P 模式则是将所有客户端节点组成一个对等网络,节点之间互通有无,共享所需的数据。

从图 1(a)中可以看出,传统的 CDN 服务模式使得服务器与客户端的距离变近,避免了由于网间互联造成的时间延迟,减少了主干网络的流量,提高了响应速度,但是其 C/S 服务模式要面向每一个客户提供会话,网络上存在大量重复数据,系统流量与 CDN 服务器所面对的客户端节点数有关,因此在节点数一定(满负载)的情况下,系统的流量曲线呈水平状如图 1(c),CDN 服务器的性能和出口带宽成为系统瓶颈。而在 P2P 模式下,节点之间共享数据,理论上下载速度只受限于下载带宽和客户端性能,但是流媒体的分发过程需要足够的节点来启动,种子较少时启动过程缓慢;随着 P2P 网络规模的增大,网络流量呈指数增加如图 1(c),而且由于节点间所在地域的差别,导致大量占用了主干网络带宽。

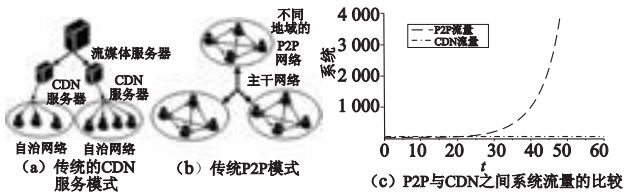


图1 CDN和P2P系统模型及系统流量比较

通过以上对比,本文提出这样一种模型:在 CDN 的自治区域内,初始分发阶段由 CDN 向内部节点提供快速的流媒体响应;后续分发中,将自治区域内的节点组成一个局部的中心化的 P2P 网络。这样,在充分利用内部网络资源的同时,可以降低 CDN 服务器的压力,同时有效减少流入到主干网络的带宽。

1.2 混合服务模型的建立

本混合流媒体分发模型由流媒体服务器、CDN 服务器和客户端节点组成的 CDN 自治域组成。每个流媒体服务器可以向多个 CDN 服务器发送媒体副本;同样,每一个 CDN 服务器也可以向多个自治域提供流媒体服务,如图 2 所示。为了便于描述,将系统简化,只有一个 CDN 服务器和一个 P2P 网络,所有节点只请求一个文件,P2P 节点分为两级,即节点到 CDN 的最大距离(跳数)为 2。

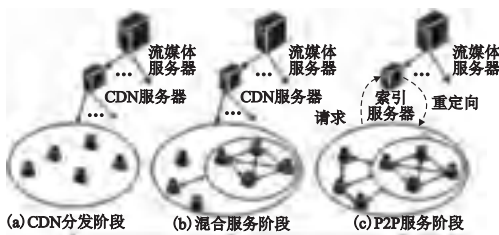


图2 混合服务模式向客户提供流媒体服务

整个媒体分发过程可以分为以下三个阶段:

a) 流媒体初始分发阶段(图 2(a))。客户端节点群的一个子集向 CDN 服务器发送流媒体请求。由于此时服务请求数量较少,CDN 服务器及其出口带宽足以提供高质量的流媒体服务,整个服务过程全部由 CDN 服务器提供;然后将当前获得服务的节点加入到支撑节点集中,这一过程类似于传统的

CDN 服务。

b) CDN 和 P2P 混合服务阶段(图 2(b))。此时,随着客户端数量的不断增加,CDN 服务器及其网络负载不断加大,由于部分节点已经获得了部分或者全部数据,CDN 服务器首先监测支撑节点集的总出口(上传)媒体流是否满足流媒体播放,如果是,则由支撑节点提供服务;否则由自己对此请求提供服务。此时 CDN 服务器承担着传统 CDN 服务器和索引服务器的双重角色,并加快了 P2P 的启动进程。

c) P2P 服务阶段(图 2(c))。随着内容分发的进行,支撑节点集的规模越来越大,最终达到一种平衡状态:自治域中,全部节点流媒体的总和大于 CDN 所应分发的整个文件。这时系统可以完全启动 P2P 模式,如果不考虑节点的失效和退出,仅靠 P2P 网络,足以将流媒体文件的分发过程持续下去。设此时为切换时间 t_0 ,此后,CDN 主要充当索引服务器使用。

2 模型描述

在此系统模型中,假设所有节点均在线,不存在节点失效或退出,系统瓶颈仅为 CDN 服务器性能及输出带宽,与 P2P 节点之间网络带宽无关。同时假设每个会话的持续时间为 L ,时间间隔以 1 min 为单位; $S(t)$ 表示当前系统内流媒体的总流量; $S(t+1)$ 表示下一刻系统中总流量; N_{CDN} 为 CDN 服务器所服务的节点数; λ 为 P2P 节点每分钟所允许的最大上传流量; ρ 表示每个支撑节点上传的流量在满流会话中所占的平均比率; β 是节点请求产生率; $M(t)$ 为 t 时刻系统中保持请求的节点数,则 M_0 为分发初始阶段,向 CDN 发出请求(注册)的节点数。本文寻求系统从 CDN 模式转换到完全的 P2P 模式所需的切换时间 t_0 , t_0 越小,表示从 CDN 模式转换到完全 P2P 模式所需要的时间越短,CDN 的负载压力越小,分发速度越快。

根据图 2 所示,可以简单地将整个分发过程分为混合服务阶段($t \leq t_0$)和 P2P 阶段($t > t_0$)。

$$S(t+1) = \begin{cases} S(t) + N_{CDN} \times \lambda + \frac{S(t)}{\lambda} \times \rho \times (\lambda - 1) & t \leq t_0 \\ S(t) + \beta LM(t) \times (\lambda - 1) & t > t_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $t \leq t_0$ 时,下一刻系统内流量为当前流媒体流量与 CDN 提供的流量($N_{CDN} \times \lambda$)以及 P2P 节点之间的流量($\frac{S(t)}{\lambda} \times \rho \times (\lambda - 1)$)之和;而在 $t > t_0$ 时,由于 CDN 不参与流媒体分发,系统下一刻流量为当前流媒体流量与 P2P 节点之间流量($\beta LM(t) \times (\lambda - 1)$)之和。

同样可求得系统中向 CDN 保持请求的节点数为

$$M(t+1) = \begin{cases} M(t) - \frac{S(t)}{\lambda} \times \rho - N_{CDN} & t \leq t_0 \\ M(t) - \beta \times L \times M(t) & t > t_0 \end{cases} \quad (2)$$

在 $t \leq t_0$ 时,下一刻的保持请求的节点数为当前请求节点数减去支撑节点数和仅从 CDN 获取媒体流的请求节点数。

求解式(1)(2)可得:

当 $\lambda \neq 1$ 时,

$$S(t) = \begin{cases} \frac{N_{CDN}}{\rho} \times \frac{\lambda^2}{\lambda - 1} \times \left[\left(1 + \rho \times \frac{\lambda - 1}{\lambda} \right)^t - 1 \right] & t \leq t_0 \\ S(t_0) + M(t_0) \times (\beta - 1) \times [1 - (1 - (\beta \times L)^{t-t_0})] & t > t_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$M(t) = \begin{cases} M_0 + \frac{t \times N_{CDN} - S(t)}{\lambda - 1} & t \leq t_0 \\ M(t_0) \times (1 - \beta \times L)^{t-t_0} & t > t_0 \end{cases} \quad (4)$$

当 $\lambda = 1$ 时,

$$S(t)=\begin{cases}t\times N_{\text{CDN}} & t\leq t_0 \\ S(t_0) & t>t_0\end{cases}\quad (5)$$

$$M(t)=\begin{cases}M_0-t\times N_{\text{CDN}}-\rho\times N_{\text{CDN}}\times\frac{t\times(t+1)}{2} & t\leq t_0 \\ M(t_0)\times(1-\beta\times L)^{t-t_0} & t>t_0\end{cases}\quad (6)$$

由于 t_0 为切换时间,意味着从 t_0 时刻开始,系统可以离开 CDN 服务器而独立运行。为求得 t_0 ,可以假设 $[t_0, t_0+1]$ 内 CDN 所接收的请求数与系统请求数的瞬时关系满足:

$$\beta\times L\times M(t_0)=\alpha\times\rho\times\frac{S(t_0)}{\lambda}\quad (\alpha\text{ 为稳定因子})\quad (7)$$

将式(7)带入(4)可得,当 $\lambda\neq 1$ 时,

$$\left(1+\rho\times\frac{\lambda-1}{\lambda}\right)^{t_0}=\frac{\beta\times L\times\left(M_0+\frac{t_0\times N_{\text{CDN}}}{\lambda-1}\right)}{\left(\alpha\times\left(\frac{\lambda}{\lambda-1}\right)\times N_{\text{CDN}}+\beta\times L\times\left(\frac{\lambda}{\lambda-1}\right)^2\times\frac{N_{\text{CDN}}}{\rho}\right)+1}\quad (8)$$

当 $\lambda=1$ 时,

$$\beta\times L\times\left[M_0-t_0\times N_{\text{CDN}}\times\left(1+\rho\times\frac{t_0+1}{2}\right)\right]=\alpha\times\rho\times t_0\times N_{\text{CDN}}\quad (9)$$

利用 Maple 软件计算解方程式(8)和(9)可得 $\lambda\neq 1$ 和 $\lambda=1$ 时的切换时间。

3 系统分析

系统性能主要从 CDN 服务器的请求响应能力、系统的切换时间以及系统内媒体流量三个方面进行评价,要求系统模型能够显著减少 CDN 的持续请求数量,缩短系统的切换时间,并将系统流量控制在自治区域内。假设两级 P2P 节点各占节点总数的 50%, $c_1=2, x_1=4, c_2=4, x_2=8, \lambda=2, \rho=0.375^{[9]}, N_{\text{CDN}}=20, \beta=0.001, \alpha=1, M_0=4\,000, L=60\text{ min}$, 由式(8)可得, $t_0\approx 10$ 。

3.1 CDN 服务器性能分析

传统模式下,CDN 服务器只提供流媒体缓存服务,而混合服务模式,CDN 服务器除提供上述服务外,还具有索引服务器的功能,因此 CDN 的性能直接影响请求的处理能力和流媒体的分发速度。由于 P2P 系统中无中心服务器,故不作比较。

图 3 描述的是传统 CDN 和混合服务模式下,与 CDN 保持请求的节点数的变化。从图 3 中可以看出,在传统的 CDN 模式下所有请求都指向 CDN 服务器,直到节点接收流媒体完毕,因此请求数一直保持在较高水平。而在混合模式下,CDN 的持续请求节点数在 t_0 后呈现迅速下降的趋势,这是因为随着流媒体分发的进行,有相当一部分的流媒体分发是在自治区域中以 P2P 的方式进行的,减少了向 CDN 服务器的流媒体请求; $t=50$ 之后,CDN 的请求数量变化趋于平缓,此时 CDN 所处理的请求主要是作为索引服务器对节点的响应,这些负载比流媒体请求而言要小得多。

图 4 展示的是在混合模式和 CDN 模式下,CDN 服务器的请求拒绝率的变化情况。图 4 中一个很明显的点特点就是 CDN 模式下,系统的请求拒绝率始终居高不下,这是因为在大量用户访问($M_0=4\,000$),而服务器的处理能力相对较小(约为 40)的情况下,服务器负载很大,绝大多数请求不能及时响应,导致了大量的请求被拒绝。而在混合模式下,分发的开始阶段类似于 CDN 模式,但是在切换时间 t_0 后,绝大多数的媒体分发都是

在自治区域内部进行,CDN 只是充当了索引服务器的功能,相对于流媒体分发来说,请求数要少得多,因此系统的请求拒绝率迅速下降至最低。

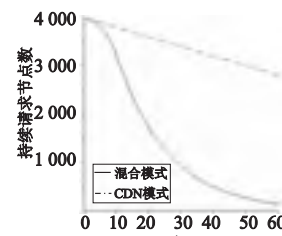


图3 与CDN保持请求的节点数的变化

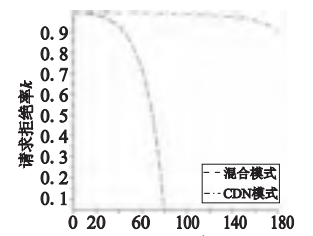


图4 CDN和混合模式下CDN请求拒绝率的变化

3.2 系统流量及切换时间的分析

自治域内流媒体的流量对网络状况有着重要影响,而切换时间的大小,直接决定了 CDN 服务器在大量请求的情况下所需要提供流媒体服务的时间,因此系统流量变化和切换时间也是评价系统性能的重要指标。

图 5 表示的是在 CDN、P2P 以及混合模式下系统中媒体流量的变化。在 P2P 模式下,系统中流量随着时间的增加呈指数变化。这是因为不同节点间同时存在上传和下载,频繁的数据交换,造成自治区域内流量的急剧上升。在 CDN 模式下,由于所有节点的流媒体均来自 CDN 服务器,系统中的流量只与 CDN 所服务的节点数有关,在响应节点数一定的情况下,系统中流量是一个固定值,因此呈一条水平直线。在混合模式下,系统流量不仅与系统中 CDN 处理的请求节点数有关,还与 CDN 服务器的服务状态有关:在开始分发的最初一段时间内,以传统的 CDN 方式进行媒体分发,此时系统中流量变化缓慢,随着时间的推移,系统切换到 P2P 模式,流量急剧上升,当所有节点均参与分发后,系统最终达到一个稳定状态。对比混合模式与 P2P 模式,虽然都有流量的增加,但是由于混合模式把所有流量控制在自治区域的范围内,并不会对主干网络性能造成冲击,相对于传统 P2P 而言,混合模式更有优势。

图 6 描述的是不同的系统参数下切换时间 t_0 的变化。

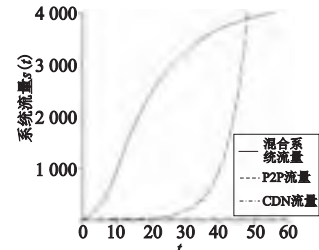


图5 混合模式与CDN、P2P之间系统流量的比较

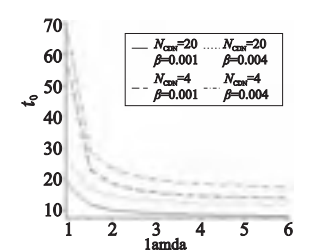


图6 不同条件下切换时间 t_0 的变化

系统的切换时间与 CDN 分配给流媒体的容量 N_{CDN} 和节点请求产生率 β 有关。在同样的节点请求产生率的情况下,系统分配给某个流媒体的容量 N_{CDN} 愈大,系统的切换时间越短,说明媒体的分发速度越快,反之亦然。因此,CDN 系统分配给流媒体资源的多少,直接影响媒体的分发速度;分配越多,系统资源越充分,CDN 参与分发的时间越短,P2P 模式的启动时间越早,CDN 服务器的压力越小;同样,每个节点每分钟产生的请求数越多,说明本节点获取流媒体的能力越强,完成接收的时间越短,那么支撑节点代替 CDN 进行 P2P 分发的时间也就越短,CDN 退出的时间也就越短。

内;而当 m 超过 16 以后,碰撞概率均大于 1.5% 甚至达到了 2.5%,这将导致多中继选择更多的失败。如果采用文献[9]的退避机制来减小碰撞概率,将会导致系统更大的时延和信令开销,无法满足实时业务的需求。在这种情况下,采用文献[10]提出的碰撞处理的改进方法会更接近实际应用。

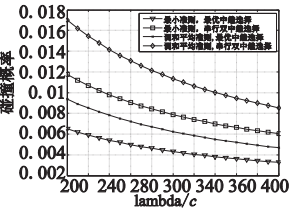


图6 最优中继选择和串行双中继选择的碰撞概率

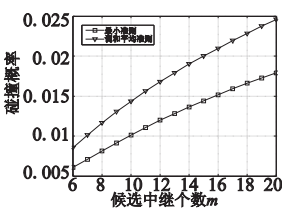


图7 串行双中继选择的碰撞概率与候选中继个数 m 之间的关系

4 结束语

本文分析了多种中继选择方法的原理和问题,提出了一种新的基于瞬时信道状态信息的串行多中继选择方法。该方法具有分布式特性,无须网络拓扑信息和集中控制单元,能够在时间上先后串行选择出最优、次优等多个中继,并且能够根据实际需要调整被选择中继的个数。详细阐述了该方法的具体实现流程,并推导了多中继选择的碰撞概率公式,且仿真并对比了瑞利衰落下的碰撞概率。采取适当机制来减小碰撞概率和进一步的性能分析、仿真将成为未来深入研究的方向。

参考文献:

[1] LEE Ki-dong, LEUNG V C M. Evaluations of achievable rate and power consumption in cooperative cellular networks with two classes of nodes[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2008, 57(2): 1166-1175.

[2] CAI J, SHEN X, MARK J W, et al. Semidistributed user relaying algorithm for amplify-and-forward wireless relay networks[J]. IEEE

Trans on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1348-1358.

[3] MUHAIDAT S, CAVERS J K, HO P. Selection cooperation with transparent amplify-and-forward relaying in MIMO relay channels [C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. Dresden: [s. n.], 2009: 1-5.

[4] MADAN R, MEHTA N B, MOLICH A F, et al. Energy-efficient cooperative relaying over fading channels with simple relay selection [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7(8): 3013-3025.

[5] BERES E, ADVE R. Selection cooperation in multi-source cooperative networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7(1): 118-127.

[6] LANEMAN J N, WORNELL G W. Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2003, 49(10): 2415-2525.

[7] HUNTER T, NOSRATINIA A. Diversity through coded cooperation [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2006, 5(2): 283-289.

[8] HUNTER T, NOSRATINIA A. Outage analysis of coded cooperation [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(2): 375-391.

[9] BLETSAS A, KHISTI A, REED P, et al. A simple cooperative diversity method based on network path selection [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2006, 24(3): 659-672.

[10] 闻鹏举, 易辉跃, 赵晓群, 等. 一种改进的协同中继节点选择算法 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25(12): 3816-3818.

[11] 刘义凤, 邱育军, 隆克平. 一种基于多中继选择的分布式空时分组编码方案 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2009, 21(1): 39-44.

[12] 陈超, 郑宝玉, 赵贤敬. 一种利用跨层优化策略选择中继的协作路由算法 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(12): 2981-2985.

[13] HASNA M O, ALOUINI M S. End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh-Fading channels [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2003, 2(6): 1126-1131.

(上接第 2210 页)

4 结束语

针对大规模流媒体分发过程中流媒体服务器和主干网络负载过大的问题,本文在综合比较了 CDN 和 P2P 两种当前主流的流媒体分发技术后,提出了一种综合 CDN 和 P2P 优势的混合流媒体分发模型,并对此模型下的服务器负载和网络流量状况进行了仿真和分析。试验结果表明,在混合模式下,由于是 CDN 提供最初的流媒体分发,故可以得到比传统 P2P 更快的启动速度,与传统的 CDN 模式相比,又可以有效降低 CDN 服务器和主干网络的负载,减少响应时间,充分利用自治域内的网络带宽,加快了流媒体分发。

参考文献:

[1] 陈海涛, 徐传福, 黄遵国, 等. 基于对等网络的广域网内容发布系统 [J]. 计算机应用研究, 2004, 21(9): 250-252.

[2] 蒋海, 李军, 李忠诚. 混合内容分发网络及其性能分析模型 [J]. 计算机学报, 2009, 32(3): 473-482.

[3] SHAIKH A, TEWARI R, AGRAWAL M. On the effectiveness of DNS-based server selection [C]//Proc of IEEE INFOCOM. Ancho-

rage, AK: [s. n.], 2001: 1801-1810.

[4] ANCEAUME E, GRADINARIU M, RAVOAJA A. Incentive for P2P fair resource sharing [C]//Proc of the 5th IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing. Washington DC: IEEE Computer Society, 2005: 253-260.

[5] MUSHTAQ M, AHMED T. QoS provisioning for video streaming over SP-Driven P2P networks using admission control [C]//Proc of the 6th IEEE Conference on CCNC. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 978-979.

[6] 闫正航, 杨宇航, 王晖, 等. 基于 P2P 的 CDN 网络中紧急消息广播技术 [J]. 计算机应用研究, 2007, 24(5): 287-292.

[7] THRKMEN F, MAZZOLENI P, CRISPO B. P-CDN: Extending access control capabilities of P2P systems to provide CDN services [C]//Proc of the 15th IEEE SCC. 2008: 480-486.

[8] ZHANG Guo-min, XING Chang-you, CHEN Ming. A distributed multimedia CDN model with P2P architecture [C]//Proc of IEEE ISCIT. 2006: 152-156.

[9] XU Dong-yan, KULKARNI S S, ROSENBERG C, et al. Analysis of a CDN-P2P hybrid architecture for cost-effective streaming media distribution [J]. Multimedia Systems, 2006, 11(4): 383-399.