

# 混合内容分发网络及其性能分析模型

蒋 海<sup>1),2)</sup> 李 军<sup>1)</sup> 李忠诚<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

<sup>2)</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘 要** 在大规模数字内容网络分发方面,占主导地位的 CDN(Content Delivery Network)和 P2P(Peer-to-Peer)网络具有显著互补优势。CDN 网络可降低数据传输延迟,提高用户体验;P2P 网络的部署成本低,可扩展性强。文章提出一种基于 CDN 和 P2P 技术的混合内容分发网络(Hybrid Content Distribution Network, HCDN),在骨干网部署 CDN 系统,在接入网构建 P2P 区域化网络,终端用户可同时通过 CDN 和 P2P 网络获取数据;阐述了 HCDN 网络模型及其内容分发处理流程,包括内容路由、副本放置和数据下载;给出了基于流模型的混合网络性能模型,并从节点数量变化、下载时间、服务能力和传输开销等方面进行综合性能评价。实验结果表明, HCDN 能提高下载速率、降低服务器负载以及减小骨干网传输流量,既可克服 CDN 网络部署成本高的缺点,也可避免 P2P 网络在节点数量稀缺时的低性能。

**关键词** 混合内容分发网络; CDN 系统; P2P 技术; 流模型; 性能建模

**中图法分类号** TP393 **DOI 号:** 10.3724/SP.J.1016.2009.00473

## Hybrid Content Distribution Network and Its Performance Modeling

JIANG Hai<sup>1),2)</sup> LI Jun<sup>1)</sup> LI Zhong-Cheng<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

<sup>2)</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract** CDN (Content Delivery Network) and P2P (Peer-to-Peer) are two dominant technologies for large-scale content distribution. CDN may reduce the end-user perceived latency, and P2P can decrease the deployment cost. In this paper, HCDN (Hybrid Content Distribution Network) is proposed to combine complementary advantages of CDN and P2P. In which, user node can retrieve content from both backbone CDN system and P2P autonomy. The network model and distribution operations are presented in detail, including content routing and replica placement. Also the performance evaluation based on fluid model is described, and some metrics such as the evolution of nodes, average downloading time, and service capacity are analyzed. The clear performance benefits of the approach are shown with comparison of conventional CDN and P2P. As shown in the experimental results, HCDN has many advantages on decreasing overload of server, increasing downloading speed and reducing network transmission cost.

**Keywords** hybrid content delivery network; CDN system; Peer-to-Peer; fluid model; performance modeling

收稿日期:2008-09-20;最终修改稿收到日期:2009-01-05。本课题得到国家“十一五”科技支撑计划项目基金(2006BAH02A11)和国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2007CB310702)资助。蒋 海,男,1980 年生,博士研究生,主要研究方向为大规模数字内容网络分发和 Peer-to-Peer 技术。E-mail: jianghai@ict.ac.cn。李 军,男,1974 年生,博士,主要研究方向为计算机网络、信息安全。李忠诚,男,1962 年生,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为计算机网络、测试、可信计算。

## 1 引言

随着互联网用户数量迅速增长,大规模数字内容网络分发技术已成为学术界和工业界的热点问题. 相关的诸多应用得到越来越广泛的普及,包括大规模文件传输和音视频流媒体分发等. 这些应用通常要求具有高速度、低延迟、高可扩展性等特点. 当前,针对提高大规模内容分发效率,占主导地位的两种技术是: CDN(Content Delivery Network)<sup>[1]</sup> 和 P2P(Peer-to-Peer)<sup>[2]</sup> 网络.

在 CDN 网络中,大量服务器被部署在互联网的“边缘”,这些边缘服务器(surrogate server)用于有策略地存储源服务器(origin server)的内容. 例如,美国 Akamai 公司在全球部署了超过 25000 台边缘服务器,用于提供商业 CDN 服务. 用户发送的资源请求,被 CDN 路由系统定向到离用户最近的边缘服务器. 因此,数据传输延迟被显著减小,用户可获得更好的体验;同时,可以降低源服务器的负载,减小网络拥塞,提高系统的可用性. 然而,CDN 网络也具有如下不足: (1) 部署和维护的成本高; (2) 受限于边缘服务器的处理能力; (3) 它本质上仍是一种客户/服务器结构,随着请求服务的用户数增加,边缘服务器的性能会明显下降.

在 P2P 网络中,用户节点既作为客户端从其它节点下载内容,也作为服务器向其它节点提供数据上传功能. 大量 P2P 软件被广泛使用,如 BitTorrent、eMule、Napster、PPLive 等. 在 P2P 网络中,各节点是完全自愿的,可随时加入或离开网络,参与节点数越多,下载速度越快. 因此,P2P 网络具有可扩展性强、容错性强、部署成本低等优势. 但是,P2P 网络也存在如下缺陷: (1) 当参与节点数稀少时,性能很差; (2) 用户节点的存储空间和上传带宽较小; (3) 由于用户节点的不稳定性,难以提供有效的 QoS 保证.

综上,CDN 和 P2P 具有显著的互补优势. 本文结合 CDN 和 P2P 技术,提出一种混合内容分发网络(Hybrid Content Distribution Network, HCDN),并通过建立模型对 HCDN、CDN 和 P2P 的性能进行比较分析.

本文第 2 节介绍相关研究背景;第 3 节详细阐述 HCDN 网络,包括网络模型、内容路由机制和分发处理流程;第 4 节分析 HCDN 的性能,给出了基于流模型(Fluid Model)的性能模型,对节点数量变

化、下载时间、服务能力和传输开销等指标进行分析;第 5 节详细描述了我们的实验结果,并跟传统 CDN 和 P2P 网络进行比较;第 6 节总结全文并指出下一步工作.

## 2 研究背景

目前,CDN 网络主要应用于 Web 和流媒体内容分发,相关研究工作主要集中在副本放置策略、内容路由算法、负载均衡和请求重定向等方面. 文献[3]深入研究了 CDN 网络与 Web 的集成问题,结果已得到广泛应用. 用户可访问边缘服务器上的 Web 副本以提高效率. 文献[4]对副本放置策略进行了改进,提出分布式的动态机制,并给出了负载均衡的算法. 文献[5]描述了一种基于智能 DNS 的请求重定向机制,用于将用户请求定向到“最近”边缘服务器. 文献[6]提出了一种基于片段的大文件分发技术,其特点是存储在边缘服务器上的副本并非完整的文件,而是依据策略划分得到的文件片段. 文献[7]描述了一种 Video-CDN 系统,利用 CDN 技术分发高质量的 TV 内容. 文献[8]对 CDI(Content Distribution Internet)进行了研究,它主要为多个独立的 CDN 网络提供互操作能力.

另一方面,近几年 P2P 网络在文件共享领域得到了越来越广泛的应用,同时人们围绕 P2P 技术也开展了大量的研究工作<sup>[9-10]</sup>. P2P 网络按结构可划分为中心化、非中心化和混合型三种. 在中心化结构中,存在索引服务器,用于为各 peer 节点提供资源定位信息. 典型应用如 BitTorrent<sup>[11]</sup>,它结构简单、定位查询速度快,但其可扩展性受限于索引服务器的能力. 在完全非中心化结构中,没有服务器,是通过各 peer 的协作实现资源定位的,代表性的方法如 Chord<sup>[12]</sup>. 在混合型结构中,一些 peer 节点被选择成“超级节点(super node)”<sup>[13]</sup>,它们为本地的其它 peer 提供定位信息.

有关结合 CDN 与 P2P 的研究仍处于初步阶段. 文献[14]给出了一种 PM-CDN(P2P-based Multimedia CDN),将 P2P 技术引入 CDN 骨干网络,使边缘服务器之间可互相交换副本,以提高副本分发的效率. 文献[15]将 CDN 和 P2P 技术结合,用于流媒体的分发,然而,它主要侧重 P2P 网络中的 peer 激励机制. 文献[16-17]简单介绍了 PCDN 的路由算法,但并没有阐述融合 CDN 与 P2P 的体系结构和有效性. 文献[18]将 P2P 技术引入 CDI 网

络,用于在多个 CDN 网络间实现数据共享.

本文所提出的 HCDN 网络中,在 CDN 接入网络构建 P2P 自治域,使用户节点既可从边缘服务器下载,又能支持 peer 节点间交换数据,从而充分利用 CDN 和 P2P 网络的互补优势;而不仅仅是在 CDN 骨干网络利用 P2P 技术提高副本放置效率.文章阐述了该混合内容分发网络结构及其主要处理流程,并给出基于 Fluid Model 的性能分析模型.

### 3 结合 CDN 与 P2P 的混合内容分发网络

#### 3.1 混合内容分发网络模型

传统 CDN 网络结构如图 1(a)所示.内容首先被有策略地从源服务器分布到各边缘服务器上,用户节点可从边缘服务器获取数据.与传统 C/S 结构相比,CDN 网络可减小数据延迟,提高传输速率,降低源服务器负载.

中心化的 P2P 网络结构可表示成如图 1(b)的索引模型,用户节点通过与索引服务器交互获取拥

有同一文件的其它 peer 信息,文件数据在用户节点之间交换.由于服务器仅维护索引信息,并不参与文件数据的传输,其负载被减轻,具有良好的可扩展性.

混合内容分发网络 HCDN 的网络结构可抽象成图 1(c)所示的两级层次化模型.内容分发过程分为两个阶段:CDN 级和 P2P 级.在骨干网部署 CDN 级分发系统,将内容分布到骨干网络的边缘,并在副本传输中应用 P2P 技术,边缘服务器可同时从源服务器和其它边缘服务器获取副本数据;在接入网构建中心化的 P2P 自治网,用户节点之间可相互交换文件内容.因此,用户节点即可从 CDN 网络的边缘服务器获取数据,同时也可通过 P2P 网络从其它 peer 节点获取数据.跟传统 CDN 网络相比,HCDN 可降低服务器负载,提高可扩展性,从而可通过减小边缘服务器数量节约部署成本;与纯 P2P 网络相比,HCDN 可提供更好的 QoS 保障,当共享同一文件的 peer 节点数少时,用户节点可通过 CDN 网络从边缘服务器下载,另外,HCDN 中的“区域”化 P2P 网络可显著降低骨干网络传输负载.

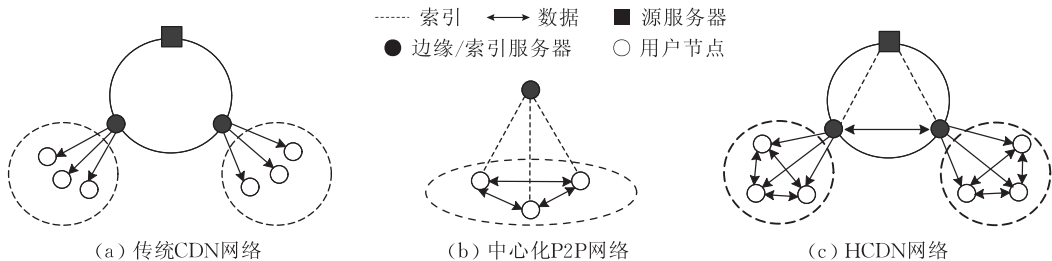


图 1 CDN、中心化 P2P 和 HCDN 的网络模型

值得一提的是,HCDN 是由服务器和用户节点所组成的覆盖网络(overlay network),边缘服务器是一个逻辑实体,可以由机群或多个物理服务器构成.HCDN 中 P2P 网络采用中心化结构,这样:(1)中心化索引查询速度快,可减小用户请求的响应时间;(2)实现简单,操作可控性强;(3)索引服务器可与边缘服务器集成在一起,也可分别部署.

#### 3.2 混合网络内容路由机制

内容路由机制实现将用户请求定位到 CDN 边缘服务器.基于查询(query-based)、摘要(digest-based)、哈希表(hashing-based)这 3 种方法的传输开销较大,因此 HCDN 采用基于目录(directory-based)的内容路由机制<sup>[19]</sup>.

在 HCDN 中,存在目录服务器(可单独部署,也可在源服务器上实现),用于维护内容在各边缘服务器的分布情况.内容路由的主要步骤包括:

1. 通过静态配置或动态 DNS 解析,用户请求首先被发送至本地边缘服务器(local surrogate server);
2. 如本地边缘服务器存有被请求的副本,则直接向用户节点提供访问服务,转步 6;
3. 如本地边缘服务器不存在被请求的副本,那么进行如图 2 所示的请求重定向过程.向目录服务器发送查询请求,其应答消息中包含服务器列表,以标识哪些边缘服务器有对应副本;

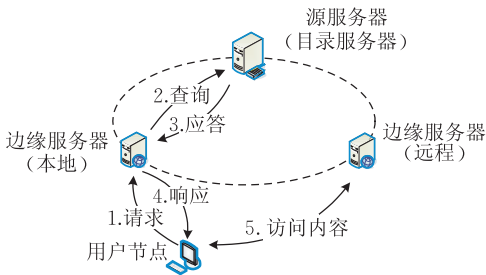


图 2 HCDN 中的请求重定向处理流程

4. 本地边缘服务器向用户节点回应重定向的远程边缘服务器地址信息；
5. 用户节点的请求被重定向到远程边缘服务器，实现内容访问；
6. 结束.

为了提高内容路由效率，目录服务器和本地边缘服务器可附加决策算法，以使请求被重定向到“最优”的远程边缘服务器. 同时，本地边缘服务器可缓存从目录服务器收到的应答记录，以避免频繁发送 query 消息，缓存记录应具有生存期.

3.3 混合网络的 CDN 级内容分发

在 CDN 级内容分发中，引入 P2P 技术，网络结构可采用中心化或非中心化. 在中心化结构中，存在一个索引服务器(可单独部署，也可在源服务器上实现)，其处理流程如图 3 所示. 索引服务器收到查询请求后，检索其维护的索引表，并返回服务器列表，表明哪些边缘服务器拥有所请求文件的副本；从而，边缘服务器即可从源服务器下载，也可同时从其它边缘服务器下载. 在完全非中心化结构中，不需要索引服务器，各边缘服务器组成结构化 P2P 网络(structured P2P network)<sup>[20]</sup>(比如 Chord、CAN 算法)，适用于边缘服务器数量多的情况，以避免索引服务器的负载.

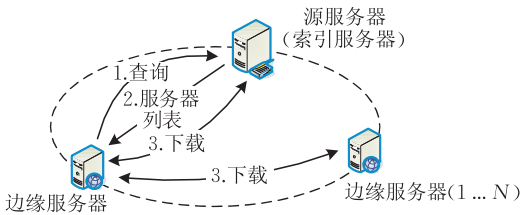


图 3 HCDN 中的 CDN 级内容分发流程

已有副本放置策略<sup>[21]</sup>仍适用于 HCDN 的 CDN 级内容分发. 在 CDN 网络中，副本数量越多，越能提高边缘服务器的请求命中率和降低网络传输开销，但却需要消耗更大的存储空间. 副本放置策略的核心思想是通过合理放置副本，有效权衡存储开销和网络传输开销，通常，其主要考虑因素包括文件的大小、请求频率、传输路径长度等.

3.4 混合网络 P2P 级内容分发

在 HCDN 的 P2P 级内容分发中，边缘服务器具备索引服务功能(也可单独部署索引服务器)，为本区域的用户节点提供资源定位服务. 边缘服务器维护索引表，以标识哪些 peer 拥有同一文件，索引表中的条目具有生存期，用户节点进行周期性更新，如生存期变为零，意味着该用户节点已离开 P2P 网络，则将该条目从列表中删除. 分发流程如图 4 所

示. 用户节点所发请求中包含文件标识(如文件 Hash 值)，边缘服务器查询索引表，并返回 peer 列表，从而用户节点可同时向边缘服务器和其它 peer 节点发送文件片下载请求. BitTorrent 等类似协议可用于构建 HCDN 的 P2P 网络.

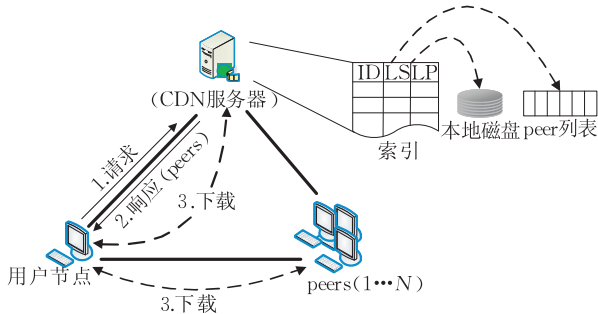


图 4 HCDN 中的 P2P 级内容分发流程

HCDN 中的 P2P 网络实现了流量区域控制，可有效克服传统 P2P 网络对骨干网带来的巨大负载<sup>[22]</sup>；同时，P2P 网络的引入，可降低 CDN 边缘服务器的服务压力. 已有的 peer 选择策略<sup>[23]</sup>仍可应用于 HCDN 的 P2P 网络，但 P2P 下载应优先于从 CDN 下载，使 CDN 边缘服务器尽量为 peer 稀少的用户节点提供下载服务，以提供 QoS 保障.

4 基于流模型(Fluid Model)的性能分析模型

由于用户节点的随机性，P2P 网络建模分析一直是一个难题. 文献[24]给出了基于排队论的通用化分析模型；文献[25-26]分别对 BitTorrent 协议和 P2P 缓存系统进行分析，并验证了 Fluid Model 的有效性. 本节给出基于 Fluid Model 的混合网络性能分析模型，并跟传统 CDN 和 P2P 网络进行比较.

性能分析使用的符号定义如表 1 所示. 将 HCDN 中的用户节点分为两类：下载节点(downloader)和种子节点(seed). 下载节点指当前没有整

表 1 符号定义说明表

符号	定义
$x(t)$	$t$ 时刻种子节点的数量
$y(t)$	$t$ 时刻下载节点的数量
$F$	文件大小
$\lambda$	请求到达率
$\mu_s$	边缘服务器的服务带宽
$\mu_p$	用户节点的上传带宽
$c$	用户节点的下载带宽
$\eta$	P2P 级文件共享的效率
$\alpha$	下载节点中断下载的比率
$\beta$	种子节点离开系统的比率
$d_s$	边缘服务器与用户节点的平均距离(跳数)
$d_p$	用户节点之间的平均距离(跳数)

个文件,正在进行下载的用户节点;种子节点指已拥有完整文件,但仍留在 P2P 网络中为其它节点提供上传服务的用户节点。

### (1) 模型描述

假设每个用户节点具有相同的下载带宽  $c$  和上传带宽  $\mu_p$ , 请求到达率服从参数为  $\lambda$  的 Poisson 分布; 下载节点可在成为种子节点前中断下载, 中断率服从均值为  $1/\alpha$  的指数分布; 种子节点可在一段时间后离开系统, 离开率服从均值为  $1/\beta$  的指数分布; 因子  $\eta(0 \leq \eta \leq 1)$  用于表示下载节点的上传效率, 即上传带宽的利用率,  $\eta=0$  表示下载节点不上传数据,  $\eta=1$  意味着下载节点上传速率为最大带宽。同时, 不失一般性, 设文件大小  $F=1$ 。

在 HCDN 网络中, 若下载带宽是瓶颈, 则系统总上传速率为  $c y(t)$ ; 如果不受限于下载带宽, 则系统总上传速率为  $\mu_p(x(t) + \eta y(t)) + \mu_s$ , 其中,  $\mu_p(x(t) + \eta y(t))$  来自 P2P 网络,  $\mu_s$  来自 CDN 网络的边缘服务器。

因此, HCDN 网络的流模型如图 5 所示。系统中种子节点和下载节点的数量变化可表示如下:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = \min\{c y(t), \mu_p(x(t) + \eta y(t)) + \mu_s\} - \beta x(t) \\ \frac{dy(t)}{dt} = \lambda - \min\{c y(t), \mu_p(x(t) + \eta y(t)) + \mu_s\} - \alpha y(t) \end{cases} \quad (1)$$

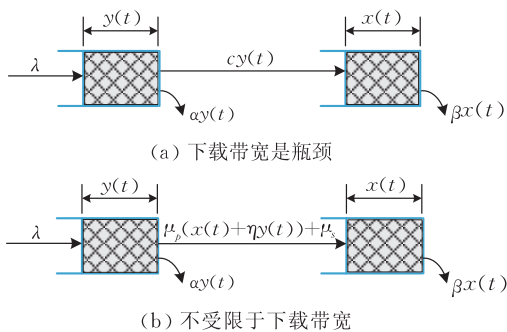


图 5 HCDN 网络的流模型

### (2) 稳定状态下种子节点和下载节点数目

我们考虑稳定状态, 令

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{dy(t)}{dt} = 0,$$

根据式(1), 可得到

$$\begin{cases} 0 = \min\{c \bar{y}, \mu_p(\bar{x} + \eta \bar{y}) + \mu_s\} - \beta \bar{x} \\ 0 = \lambda - \min\{c \bar{y}, \mu_p(\bar{x} + \eta \bar{y}) + \mu_s\} - \alpha \bar{y} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别是的  $x(t)$  和  $y(t)$  的平衡值 (equilibrium value). 解方程组(2)得到

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{c \lambda}{\beta(c + \alpha)} \\ \bar{y} = \frac{\lambda}{c + \alpha} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $c \bar{y} < \mu_p(\bar{x} + \eta \bar{y}) + \mu_s$ , 表示 HCDN 中下载带宽是瓶颈;

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\eta \lambda \mu_p + \alpha \mu_s}{\eta \beta \mu_p - \alpha \mu_p + \alpha \beta} \\ \bar{y} = \frac{\beta \lambda - \lambda \mu_p - \beta \mu_s}{\eta \beta \mu_p + \alpha \beta - \alpha \mu_p} \end{cases} \quad (4)$$

其中  $c \bar{y} \geq \mu_p(\bar{x} + \eta \bar{y}) + \mu_s$ , 表示 HCDN 不受限于下载带宽。

类似地, 针对传统纯 P2P 网络, 令  $\mu_s = 0$ , 利用流模型可推导出稳定状态下种子节点和下载节点的表达式:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{c \lambda}{\beta(c + \alpha)} \\ \bar{y} = \frac{\lambda}{c + \alpha} \end{cases} \quad (5)$$

其中  $c \bar{y} < \mu_p(\bar{x} + \eta \bar{y})$ , 表示 P2P 网络中下载带宽是瓶颈;

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\eta \lambda \mu_p}{\eta \beta \mu_p - \alpha \mu_p + \alpha \beta} \\ \bar{y} = \frac{\beta \lambda - \lambda \mu_p}{\eta \beta \mu_p + \alpha \beta - \alpha \mu_p} \end{cases} \quad (6)$$

其中  $c \bar{y} \geq \mu_p(\bar{x} + \eta \bar{y})$ , 表示 P2P 网络不受限于下载带宽。

### (3) 平均下载时间

利用 Little 法则, 可得到稳定状态下用户节点的平均下载时间为

$$T = \frac{\lambda - \alpha \bar{y}}{\lambda - \alpha \bar{y}} \bar{y} = \frac{1}{\lambda} \cdot \bar{y} \quad (7)$$

其中,  $T$  是平均下载时间,  $\lambda - \alpha \bar{y}$  是下载节点完成下载的平均比率,  $\frac{\lambda - \alpha \bar{y}}{\lambda} \bar{y}$  是下载节点变成种子节点的平均数量。

因此, 对于 HCDN 网络, 根据式(3)、(4)和式(7)可得

$$T_{\text{HCDN}} = \begin{cases} \frac{1}{c + \alpha}, & c \bar{y} < \mu_p(\bar{x} + \eta \bar{y}) + \mu_s \\ \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\beta \lambda - \lambda \mu_p - \beta \mu_s}{\eta \beta \mu_p + \alpha \beta - \alpha \mu_p}, & c \bar{y} \geq \mu_p(\bar{x} + \eta \bar{y}) + \mu_s \end{cases} \quad (8)$$

类似地, 对于 P2P 网络, 根据式(5)~(7)可得



$$T_{P2P} = \begin{cases} \frac{1}{c+\alpha}, & c\bar{y} < \mu_p(\bar{x} + \eta\bar{y}) \\ \frac{\beta - \mu_p}{\eta\beta\mu_p + \alpha\beta - \alpha\mu_p}, & c\bar{y} \geq \mu_p(\bar{x} + \eta\bar{y}) \end{cases} \quad (9)$$

对于传统 CDN 网络,符合典型的 M/M/1 排队模型特性,其到达率和服务率分别为

$$\begin{cases} \lambda_i = \lambda \\ \mu_i = \begin{cases} i \cdot c, & 1 \leq i \leq m, \quad m = \frac{\mu_s}{c} \\ \mu_s, & i > m \end{cases} \end{cases}$$

于是,可得到队列长度为  $i$  时的概率

$$P_i = \begin{cases} \left(\frac{1}{i!}\right)\left(\frac{\lambda}{c}\right)^i P_0, & 1 \leq i \leq m \\ \left(\frac{1}{m!}\right)\left(\frac{\lambda}{c}\right)^m \left(\frac{\lambda}{\mu_s}\right)^{i-m} P_0, & i > m \end{cases},$$

且  $\sum P_i = 1$ .

因此,CDN 网络的平均下载时间可表示为

$$T_{CDN} = \frac{\sum i P_i}{\lambda} \quad (10)$$

#### (4) 系统服务能力

系统服务能力指系统所能提供的最大上传速率.在 CDN 中,仅有边缘服务器提供上传服务;在 P2P 中,种子节点和下载节点提供上传服务;在 HCDN 中,上传服务来自于 CDN 和 P2P 级网络.因此,可得到如下表达式

$$\begin{cases} SC_{CDN} = u_s \\ SC_{P2P} = u_p(x(t) + \eta y(t)) \\ SC_{HCDN} = \mu_s + u_p(x(t) + \eta y(t)) \end{cases} \quad (11)$$

#### (5) 边缘服务器负载

在 CDN 网络中,边缘服务器的负载取决于下载节点的数量,如下所示:

$$O_{CDN} = \min\{(u_s, c \cdot y(t))\} \quad (12)$$

在 HCDN 网络中,用户节点请求负载为  $c y(t)$ ,P2P 级网络的服务能力是  $\mu_p(x(t) - \eta y(t))$ ,假设从 P2P 网络完全优先于从 CDN 网络下载,则边缘服务器的负载可表示如下:

$$\begin{aligned} V_{P2P} &= \min\left\{c, \frac{\mu_p(x(t) + \eta y(t))}{y(t)}\right\}, \\ O_{HCDN} &= \min\{(u_s, y(t) \cdot (c - V_{P2P}))\} \end{aligned} \quad (13)$$

#### (6) 网络传输开销

在 CDN 网络中,用户节点都从边缘服务器下载内容,因此,其网络传输开销为

$$Cost_{CDN} = d_s \cdot y(t) \quad (14)$$

在 P2P 网络中,用户节点之间进行数据交换,其网络传输总开销为

$$Cost_{P2P} = d_p \cdot y(t) \quad (15)$$

在 HCDN 网络中,部分内容从 P2P 网络下载,其余部分内容来自于 CDN 边缘服务器,若从 P2P 网络优先于从 CDN 网络下载,则根据式(13),可以得到

$$\begin{aligned} V_{HCDN} &= \min\left\{c, \frac{\mu_s}{y(t)} + V_{P2P}\right\}, \\ Cost_{HCDN} &= d_p \cdot y(t) \cdot \frac{V_{P2P}}{V_{HCDN}} + d_s \cdot y(t) \cdot \frac{V_{HCDN} - V_{P2P}}{V_{HCDN}} \\ &= y(t) \cdot \left(d_p \cdot \frac{V_{P2P}}{V_{HCDN}} + d_s \cdot \frac{V_{HCDN} - V_{P2P}}{V_{HCDN}}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

## 5 性能评价与比较

我们采用理论数值分析与仿真实验相结合的方法,进行性能评价和比较.在理论数值分析方面,基于第 4 节所述模型的公式推导,使用工具软件 MATLAB 实现对 HCDN 性能特性的刻画以及跟其它几种方案(CDN、P2P 和 HP2P<sup>[27]</sup>)的比较.在仿真实验方面,基于离散事件仿真(Discrete-Event Simulation)机制,利用对 GPS<sup>[28]</sup>(General Peer-to-Peer Simulator,一个基于 JAVA 的通用 P2P 仿真架构)的改进,完成 HCDN 网络的仿真模拟.

在仿真实验中,本文主要考察节点数量的变化趋势,通过与理论数值进行比较,验证所提性能分析模型的有效性.其中,仿真实验场景如下:各用户节点  $P$  和边缘服务器  $S$  分别与转发节点  $T$  相连,源服务器  $R$  分别与 4 个转发节点连接,拓扑结构如图 6 所示; $P$  与  $T$  间的往返时延为 5ms, $S$  与  $T$  间的往返时延为 15ms, $R$  与  $T$  间的往返时延为 25ms;边缘服务器  $S$  和源服务器  $R$  的带宽为  $\mu_s$ ;每个用户节点的下载和上传带宽分别为  $c$  和  $\mu_p$ ,并以参数为  $\lambda$  的 Poisson 分布概率加入网络,下载节点和种子节点的离开率分别服从参数为  $\alpha$  和  $\beta$  的指数分布;实

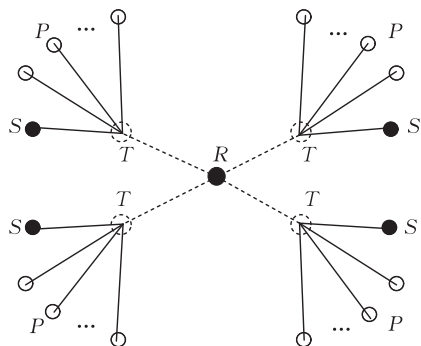


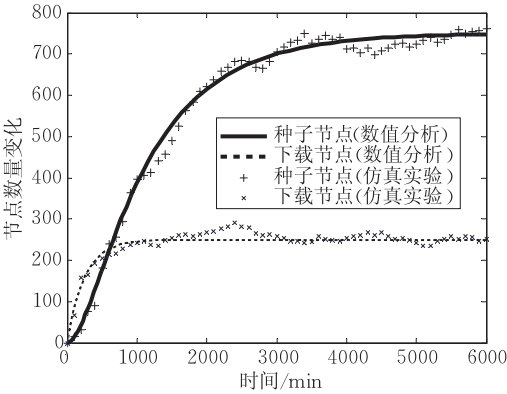
图 6 仿真实验的网络拓扑结构

验中忽略传输层的拥塞控制策略,即节点可利用其最大传输带宽.

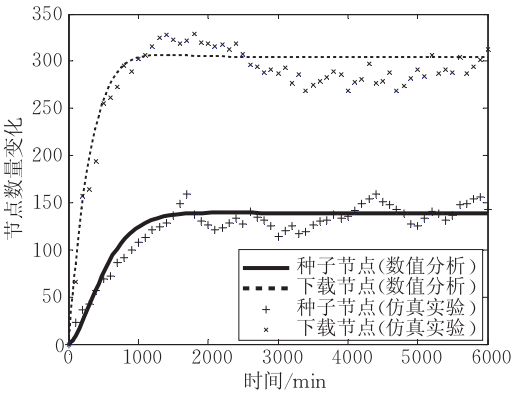
以如下数据作为理论数值分析和仿真实验基本参数: $\mu_p=0.0015, \mu_s=0.03, c=0.003, \alpha=0.001, \beta=0.001, \eta=1, \lambda=1, d_p=2, d_s=4, d_r=6$ . 通过改变参数的值,分析相应因素对性能的影响. 在性能评价中,将混合 P2P 网络(Hybrid Peer-to-Peer, HP2P)作为对比方案,在 HP2P 方案中,用户节点通过 P2P 网络和服务器(源服务器)下载.

(1) 节点数量的变化趋势

所给基本参数满足条件  $c\bar{y} < \mu_p(\bar{x} + \eta\bar{y}) + \mu_s$ ,



(a) 下载带宽是瓶颈



(b) 不受限于下载带宽

图 7 节点数量变化趋势

(2) 节点数量的影响因素

为分析种子节点离开率对稳定状态下节点数量的影响,将  $\beta$  的值从 0.003~0.012 间变化,图 8 给出了对应的数值分析结果. 随着  $\beta$  值的增大,种子节点数量减小,而下载节点数量增大.

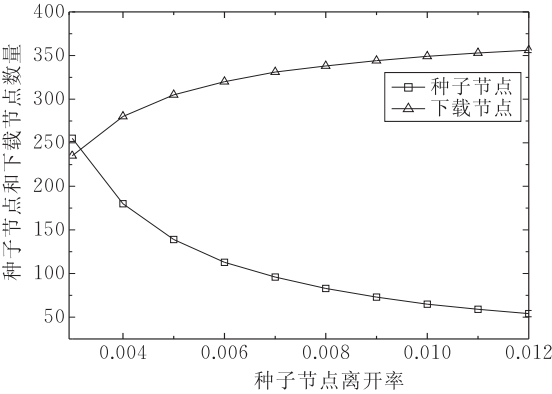


图 8 种子节点离开率( $\beta$ )对节点数量变化的影响

为分析用户节点上传带宽对稳定状态下节点数量的影响,将  $\mu_p$  的值在 0.003~0.012 间变化,图 9 给出了对应的数值分析结果. 随着  $\mu_p$  值的增大,种子节点数量增大,而下载节点数量减小;当  $\mu_p < c$  时,  $\mu_p$  的大小对稳定状态下载节点的数量有着显著的影响.

即下载节点的下载带宽是瓶颈,图 7(a) 给出了 HCDN 的一个 P2P 级网络中种子节点和下载节点随时间的变化趋势. 为考查不受限于下载带宽的情形,令  $\beta=0.005$ ,有  $c\bar{y} > \mu_p(\bar{x} + \eta\bar{y}) + \mu_s$ ,图 7(b) 给出了对应的变化趋势. 可以看出,变化趋势包含两个阶段:指数级增长阶段和稳定阶段. 同时可知,仿真实验结果与理论数值非常接近,从而验证了基于 Fluid Model 分析 HCDN 网络性能是有效的,后续的性能评价和比较将基于第 4 节所述性能模型的数值分析.

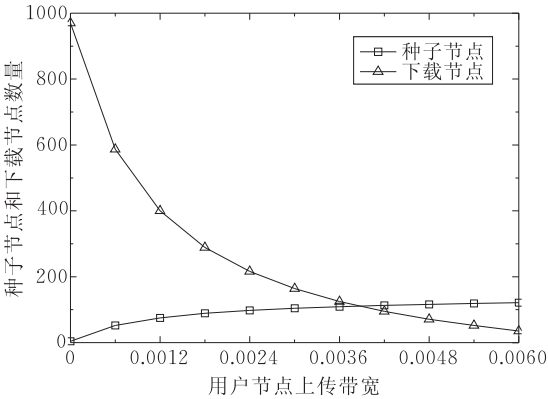


图 9 用户节点上传带宽( $\mu_p$ )对节点数量变化的影响

分析边缘服务器带宽对稳定状态下节点数量的影响,将  $\mu_s$  的值在 0~0.5 间变化,图 10 为对应的数值分析结果. 可以看出,随着边缘服务器的服务能力增大,稳定状态下种子节点的数量增加,下载节点的数量减小.

(3) 平均下载时间

当  $\beta=0.001$ (即下载带宽是瓶颈)时,分析请求到达率  $\lambda$  对平均下载时间  $T$  的影响,将  $\lambda$  的值在 0.027~0.029 间变化(接近于边缘服务器的能力  $\mu_s=0.03$ ),图 11 所示为对应的变化曲线. 可以看

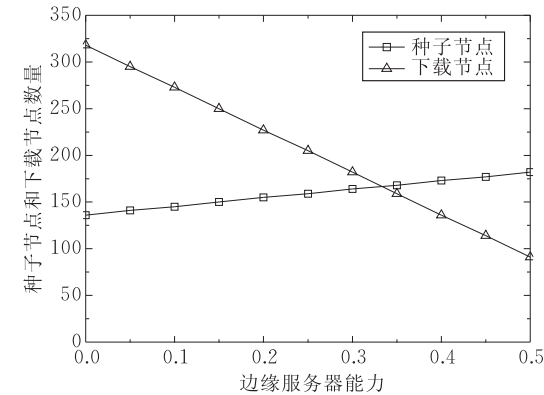


图 10 边缘服务器能力( $\mu_s$ )对节点数量变化的影响

出,在 CDN 网络中,随着请求到达率的增大,平均下载时间急剧变大;而在 P2P、HP2P 和 HCDN 网络中,平均下载时间不随请求到达率变化,这正说明了三种网络结构中 P2P 共享机制的高可扩展性.

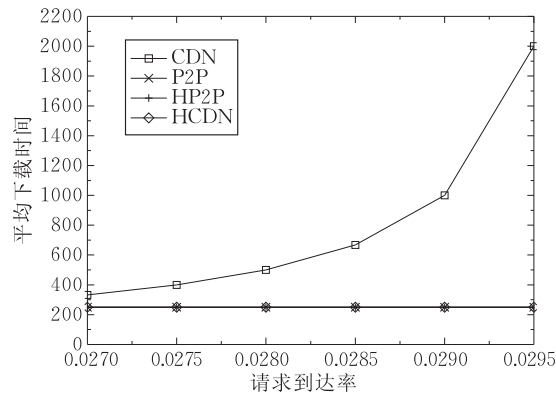


图 11 平均下载时间(当下载带宽是瓶颈时)

分析不受限于下载带宽的情形,设  $\beta=0.005$ , 让  $\lambda$  的值在  $0\sim 1$  间变化,图 12 为平均下载时间随请求到达率的变化曲线.由图可知,HCDN 和 HP2P 比纯 P2P 的下载时间小;随着请求率的增大,HCDN 和 HP2P 的平均下载时间越来越接近于 P2P,这是因为,随着用户节点的不断增加,服务器

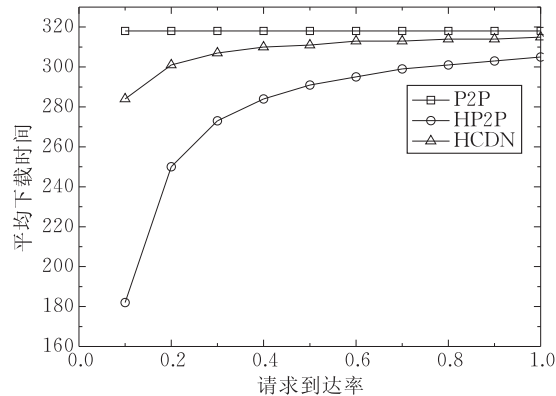


图 12 平均下载时间(不受限于下载带宽)

所占系统总服务能力的比例变小.同时,HCDN 比 HP2P 的下载时间小,这正说明了引入 CDN 网络中边缘服务器的作用.

(4) 系统服务能力

如图 13 所示,HCDN 在服务能力上有明显优势. P2P、HP2P 和 HCDN 网络的服务能力随着用户节点数量变大而增加,而 CDN 网络的服务能力为定值,即边缘服务器的服务率.当用户节点数量较小时,CDN 优于 P2P 网络,当用户节点数量较大时, P2P 优于 CDN 网络.同时,HCDN 网络的服务能力要优于 HP2P.

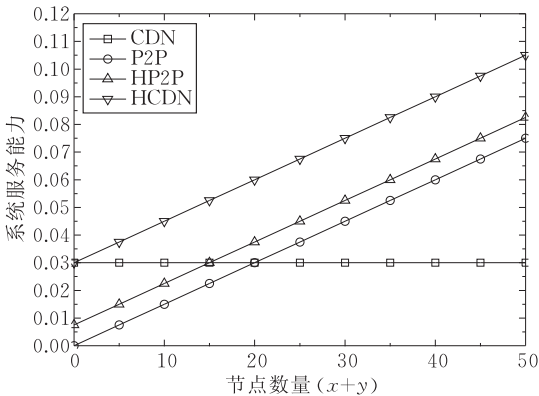


图 13 系统服务能力

(5) 服务器的负载

分析下载节点数量对服务器负载的影响,设  $\mu_s=0.05$ ,种子节点数量为 5,图 14 为对应的结果曲线图.由图可知,随着节点数量增加,对于边缘服务器负载增长,CDN、HP2P 网络要明显高于 HCDN 网络.当节点数量很多时(如  $y>50$ ),边缘服务器都以满负荷工作.

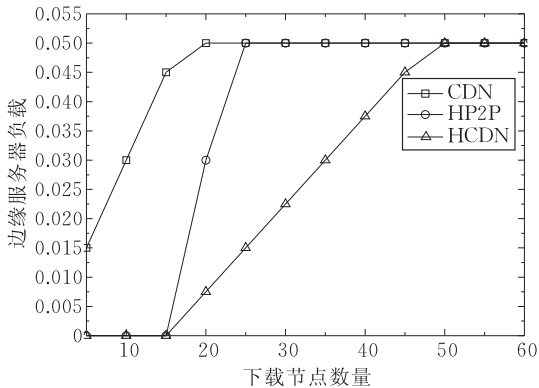


图 14 CDN、HP2P 和 HCDN 中边缘服务器负载

(6) 网络传输开销

设  $\mu_s=0.05$ ,种子节点数量为 15,图 15 给出了网络传输开销的实验结果.由于  $d_s>d_p$  (HCDN 具



有 P2P 区域控制优势,peer 节点间距离通常小于 peer 与边缘服务器间距离),由图可知,HP2P、HCDN 的网络传输开销介于 CDN 与 P2P 之间,当节点数量较小时,接近于 P2P 网络,当节点数量较大时,接近于 CDN 网络. 由于  $d_r > d_s$ ,因此 HP2P 的网络传输开销大于 HCDN.

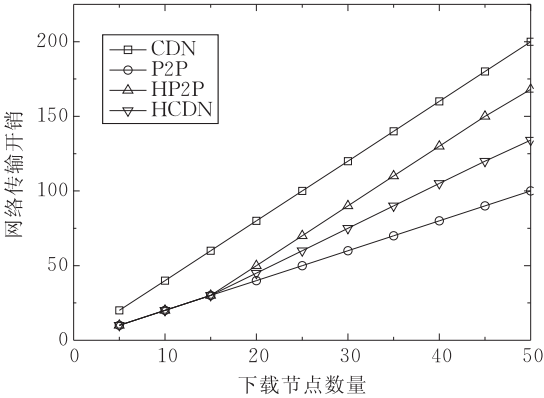


图 15 CDN、P2P、HP2P 和 HCDN 中网络传输开销

6 结论及下一步工作

针对大规模数字内容网络分发,基于 CDN 和 P2P 技术,本文提出一种混合内容分发网络,以综合利用 CDN 和 P2P 网络的互补优势,并且对 HCDN 网络的关键处理流程进行了详细阐述. 性能分析结果表明,HCDN 可明显提高下载速率,并具有良好的可扩展性;跟传统 CDN 网络相比,HCDN 可降低边缘服务器负载,节约部署成本;跟 P2P 网络相比,HCDN 能增强 QoS 保障,减小骨干网流量;跟 HP2P 相比,HCDN 具有更大的下载速率,并可减小网络传输开销.

下一步工作主要集中在如下方面:(1) 针对混合网络的特点,对副本放置和 peer 选择策略进行改进,以进一步提高内容分发效率;(2) 基于 HCDN 网络,实现应用层 QoS 控制策略,为不同级别的用户提供区分服务保障. 这些工作的完成,将使得 HCDN 网络更加高效,更适合于商业大规模数字内容网络分发.

参 考 文 献

[1] Pallis G, Vakali A. Insight and perspectives for content delivery networks. Communications of the ACM, 2006, 49 (1): 101-106

[2] Li Jin. On peer-to-peer (P2P) content delivery. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2008, 1(1): 45-63

[3] Gadde S, Chase J, Rabinovich M. Web caching and content distribution: A view from the interior. Computer Communications, 2001, 24(2): 222-231

[4] Tim Wauters, Jan Coppens et al. Replica placement in ring based content delivery networks. Computer Communications, 2006, 29(16): 3313-3326

[5] Shaikh A, Tewari R et al. On the effectiveness of DNS-based server selection//Proceedings of the IEEE INFOCOMM. Anchorage, AK, USA, 2001: 1801-1810

[6] Fei Zong-Ming, Yang Meng-Kun. A segment-based fine-grained peer sharing technique for delivering large media files in content distributed networks. IEEE Transactions on Multimedia, 2006, 8(4): 824-829

[7] Cahill Adrian J, Sreenan Cormac J. An efficient CDN placement algorithm for high-quality TV content//Proceedings of the 9th IASTED International Conference on Internet and Multimedia Systems and Applications (EuroIMSA). Switzerland, 2005: 364-369

[8] Day M, Cain B, Tomlinson G et al. A model for content internetworking (CDI). IETF RFC3466, 2003

[9] Stephanos Androutsellis-Theotokis, Diomidis Spinellis. A survey of peer-to-peer content distribution technologies. ACM Computing Surveys (CSUR), 2004, 36(4): 335-371

[10] Pourebrahimi B, Bertels K, Vassiliadis S. A survey of peer-to-peer networks//Proceedings of the 16th Annual Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing. Veldhoven, Netherlands, 2005

[11] Johan Pouwelse, Paweł Garbacki, Dick Epema et al. The bittorrent P2P file sharing system: Measurements and analysis//Proceedings of the IPTPS 2005. USA, 2005: 205-216

[12] Ion Stoica, Robert Morris, David Karger et al. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications//Proceedings of the ACM SIGCOMM. USA, 2001: 149-160

[13] Yang B, Garcia-Molina H. Designing a super-peer network//Proceedings of the International Conference on Data Engineering. USA, 2003: 49-60

[14] Zhang Guo-Min, Xing Chang-You, Chen Ming. A distributed multimedia CDN model with P2P architecture//Proceedings of the International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT'06). Bangkok, 2006: 152-156

[15] Xu Dong-Yan, Kulkarni Sunil Suresh. Analysis of a CDN-P2P hybrid architecture for cost-effective streaming media distribution. Multimedia Systems, 2006, 11(4): 383-399

[16] Li Ke, Zhou Wan-Lei, Yu Shui, Zhang Yun-Sheng. A resource-search and routing algorithm within PCDN autonomy area//Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies. USA, 2007: 509-514

- [17] Li Ke, Zhou Wan-Lei, Yu Shui, Li Ping. Novel data management algorithms in peer-to-peer content distribution networks//Lecture Notes in Computer Science 4798, Springer, 2007; 538-543
- [18] Elisa Turrini, Fabio Panzieri. Using P2P techniques for content distribution internetworking: A research proposal//Proceedings of the 2nd International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P'02). Linköping, Sweden, 2002; 171-172
- [19] Ni Jian, Tsang D H K, Yeung I S H. Hierarchical content routing in large-scale multimedia content delivery network//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Anchorage, AK, 2003; 854-859
- [20] Lua Eng Keong, Crowcroft Jon, Pias Marcelo. A survey and comparison of peer-to-peer overlay network schemes. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2005, 7(2): 72-93
- [21] Spiridon Bakiras, Thanasis Loukopoulos. Combining replica placement and caching techniques in content distribution networks. Computer Communications, 2005, 28(9): 1062-1073
- [22] Xie Hai-Yong, Yang Y Richard et al. P4P: Provider portal for applications//Proceedings of the ACM SIGCOMM'08. Seattle, WA, USA, 2008, 38(6): 351-362
- [23] Adler M, Kumar R, Ross K, Rubenstein D et al. Optimal peer selection for P2P downloading and streaming//Proceedings of the IEEE INFOCOMM. Miami, USA, 2005; 1538-1549
- [24] Qiu Dong-Yu, Srikant R. Modeling and performance analysis of BitTorrent-Like peer-to-peer networks//Proceedings of the ACM SIGCOMM. Portland, OR, USA, 2004; 367-377
- [25] Gaeta R, Gribaudo M, Manini D, Sereno M. Analysis of resource transfer in peer-to-peer file sharing applications using fluid models. Performance Evaluation Journal-Peer-to-Peer Computing Systems, 2006, 63(3): 147-264
- [26] Clevenot F, Nain P. A simple fluid model for the analysis of the squirrel peer-to-peer caching system//Proceedings of the IEEE INFOCOM. Hong Kong, China, 2004; 86-95
- [27] Rimac I, Elwalid A, Borst S. On server dimensioning for hybrid P2P content distribution networks//Proceedings of the IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P'08). Aachen, Germany, 2008; 321-330
- [28] Yang W, Abu-Ghazaleh N. GPS: A general peer-to-peer simulator and its use for modeling BitTorrent//Proceedings of the IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS'05). Atlanta, USA, 2005; 425-432



**JIANG Hai**, born in 1980, Ph. D. candidate. His research interests include large-scale content distribution, Peer-to-Peer network and next generation Internet.

**LI Jun**, born in 1974, Ph. D. , associate professor. His research interests focus on computer network and network security.

**LI Zhong-Cheng**, born in 1962, Ph. D. , professor. His main research interests include computer networks, testing and dependable computing.

## Background

This work was partly supported by the National Key Technology Research Development Program of China under grant No.2006BAH02A11 and the Major State Basic Research Development Program of China under grant No.2007CB310702. The projects focus on the integrated network distribution platform for large-scale audio and video media. The platform includes some subsystems, such as mass media management, efficient network distribution, content copyright protection and user end system. This work will contribute to improve the network distribution efficiency with the proposed HCDN (hybrid content distribution network).

In recent years, large-scale content distribution has been an intensively studied research topic. It need meet the requirement of high speed, low latency, and high scalability. CDN (Content Delivery Network) and P2P (Peer-to-Peer) have been widely used in this area. However, CDN and P2P

have complementary advantages and weaknesses. The integration of CDN and P2P is still at the preliminary stage, and there are only a few research work concentrated on it. In some related works, P2P architecture is only used in CDN network to support that the surrogates can directly exchange content. In the new approach, content distribution is divided into two stages. In the CDN-level core network, the content is strategically placed from central server to a set of edge servers, and edge servers can exchange content between each other to enhance efficiency. In the P2P-level logical access network, the content is distributed from edge server to user nodes, and the user nodes can concurrently download from both the edge server and other peer user nodes. The performance model based on fluid model is also presented, and the HCDN is evaluated by comparing with conventional CDN and P2P. The experimental result shows the clear performance benefits of the new approach.