

P2P 流媒体:一种新型的流媒体服务体系

刘亚杰 窦文华

(国防科学技术大学并行与分布国家重点实验室 长沙 410073)

摘要 流媒体应用是推动未来宽带应用的主动力,但流媒体对带宽的高占用特性使其在 Internet 上大规模应用面临诸多困难。虽然 IP 组播能减轻服务器和网络负载,但众多原因使之在短期内难以广泛实现;CDN(Content Delivery Network)通过把服务和内容“推”向网络的“边缘”,也能减轻服务器和网络负载,但其昂贵的费用使得一般 ICPs 无法承担。在 Internet 环境下最近兴起的 P2P(Peer-to-Peer)技术在提高资源利用率、扩展服务能力等方面具有潜在的巨大优势,P2P 技术在流媒体中的应用能够充分利用以往被忽视的众多客户机的资源,是一种性价比良好的流媒体服务体系。本文首先指出了 P2P 流媒体应用中所面临的挑战,并着重从多播树协议、QoS 保证、激励机制等方面阐述了 P2P 流媒体的研究现状,分析讨论了存在的问题,并指出了今后的研究方向。

关键词 P2P,流媒体,多播协议,QoS,激励

P2P Media Streaming: a New Type of Media Streaming Service Architecture

LIU Ya-Jie DOU Wen-Hua

(National Laboratory for Parallel & Distributed Processing, NUDT, Changsha 410073)

Abstract Media streaming will become the mainly driving force for future broadband network application. But media streaming imposes a high load on the underlying network and the streaming server, and there still exists many difficulties for deploying it in a large-scale. IP Multicast could be the best way to overcome this drawback since it was designed for group-oriented application. However, its deployment on the Internet is still limited due to several fundamental concerns. CDN (Content Delivery Network) push the content and service to the Internet edge, which could alleviate burden on media servers and network infrastructure, but normal ICPs could not afford the expensive charge. The recently rising Peer-to-Peer technologies has huge potential on efficiently resource usage, system scalability and so on. P2P media streaming can efficiently using large mount of clients' resource which have been ignored before, and it will become a cost-effective media streaming service architecture. In this paper we first point out exist challenges for P2P media streaming, then mainly introduced some recent research result such as protocol of multicast tree, QoS guarantee and incentive mechanism and so on. Some exist problems are discussed. The orientations of the future research are also given.

Keywords P2P, Media streaming, Multicast protocol, QoS, Incentive

1 前言

计算机技术特别是网络技术的飞速发展,深刻地改变着人们的工作、生活和思维。随着单机处理能力的增强和宽带网络的普及,人们不再满足于传统的网页浏览、文件下载、聊天等因特网呆板的表现形式,流媒体以其特有的娱乐性和交互性将成为推动未来宽带应用的主动力。尽管满足流媒体服务的基础环节如服务器性能、网络带宽、视频编码、传输等技术取得飞速发展,但由于流媒体本身对资源高消耗的特点,使得其服务成本居高不下的同时,服务器的负载也不堪重负,部分网络发生拥塞,服务质量得不到保障。IP 组播技术^[1]以其多路复用的方式能够减缓服务器和网络的负载,但其在实现方面的复杂性以及在拥塞控制、可靠性管理方面的不足使其在近几年来难以广泛实施。而最新兴起的 CDN^[2](Content Delivery Network)服务通过在 Internet 上广泛部署服务节点(如 Akamai 公司已在全球部署了 10,000+ 个节点),把服务内

容“推”向网络的“边缘”,并把客户请求路由到距客户最近的服务节点,从而减轻了服务器的压力和对骨干网络的带宽消耗,但 CDN 按字节收费的方式使一般流媒体内容提供商(ICP)无法承担其租赁费用。因此,在有限的资源条件下,如何满足快速增长的用户需求,并在确保服务质量的同时,降低单条流的服务成本,成为流媒体技术研究中一个挑战性的课题!

最近兴起的 P2P(Peer-to-Peer)技术能利用 Internet 中的各个节点进行对等计算,充分挖掘了 Internet 上空闲资源,在利用率、扩展性、容错等方面具有潜在的巨大优势,并在文件共享、分布式计算、协同工作、Internet 存储等方面已经取得了初步良好应用。如果把 P2P 引入到流媒体服务中,就可以充分发挥以往被忽略的众多客户机的作用,让客户端缓存一部分信息,充当一部分服务器的功能,使服务分散化,从而减轻服务器的负载和网络带宽占用,具有潜在的应用前景。

目前,基于 P2P 的流媒体服务体系已经引起了许多大学

刘亚杰 博士研究生,主要从事多媒体 QoS、多媒体网络等方面的研究;窦文华 博士生导师,教授,主要从事高速网络、多媒体网络、网络安全等方面的研究。

(如 Stanford University^[3]、Purdue University^[4,5]、Maryland University^[6]、Central Florida University^[7]、Chinese University of Hong Kong^[8]等)、研究机构(如 Microsoft Research^[9]等)以及公司(如 VTrails^[10]、AllCast^[11]等)的重视并纷纷开展研究。由于 P2P 服务体系需要让某些节点暂时发挥服务器功效,而这些节点与传统的服务器相比存在一定差异,如提供服务的节点位置不固定、服务能力有强有弱、节点频繁加入离开等。而流媒体本身又有其独特性质,如数据存储量大、带宽占用高、持续服务时间长、高 QoS 要求等。因此,在 P2P 流媒体服务体系中,如何在充分利用众多节点资源的同时并能确保服务质量,面临着许多挑战。本文将主要从多播树协议、QoS 保证、激励机制等方面阐述讨论 P2P 流媒体的研究现状,分析现存的问题,并指出了今后的研究方向。

2 多播树协议

在 P2P 流媒体中,必须把服务器和所有参与服务的节点组织成为多播树,这也是首先需要解决的问题。由于多播树中一般节点的服务能力有限,其所带子节点的数目不能太多;另外,节点与源节点服务器之间的路径不能太长,否则流的延迟太大,即树的高度也受限,这属于 NP-Hard 类问题。

文[3]在其原型系统 SpreadIt 中最早提出了一种多播树构造协议:根节点 S 为源服务器,当新节点加入时,从 S 开始搜索,直到发现某个非饱和(Unsaturated,一般指有剩余带宽资源)节点,并把新节点作为其子节点加入。对于节点的退出和失效,假设退出节点为 D,其子节点集合为 C_D ,D 的父节点为 P,那么 D 节点向 P 节点注销,并向 C_D 中的所有节点转发重定向(redirect)消息,重定向目的为 P 节点或 S 节点;对于节点的失效(由掉电等原因引起),在所有父子节点之间维持心跳线(heart beat),如果在某段时间内收不到父节点的心跳信号,就认为父节点已经失效,重新向 S 节点发起加入请求过程。SpreadIt 的最大问题是一旦父节点失效,其子节点将成为“孤儿”节点,需要从根节点开始重新发起搜索加入过程,从而可能导致服务中断的时间太长。

文[4]提出一种利用 BGP 路由表构造多播树的协议:以 BGP 路由表中的信息为基础,把参与活动的节点划分为多个簇(cluster),并建立中心索引服务,以记录和维护每个簇及簇内节点的信息,包括带宽、在线概率、缓存等。节点加入时只需查询中心索引,由中心索引根据请求节点位置及相关簇的信息,尽量返回同簇节点或邻居簇节点为其服务;同样,节点在退出或失效时也只需和中心索引节点联系,由中心索引节点维持整个多播树。它的优点是简单,并可以就近找到对等服务节点;其不足之处是依赖中心索引维护整个多播树,不适应大规模的 P2P 流媒体应用,同时也存在单点失效的隐患。

文[6]根据层次簇(hierarchical cluster)的思想提出了一种分布自适应的多播树构建协议 NICE(如图 1 所示):

(1)与活动的节点划分为多个簇,构成最底层的层次节点,每个簇的大小为 $[k, 3k]$, k 为系统参数。每个簇中选出一簇首(cluster leader),构成上一层的簇成员,如此类推组成多个层次的簇,媒体服务器是最高层次簇的成员;

(2)簇中成员直接从其簇首获取数据,即在多播树中每个簇成员是其簇首的子节点,服务器为多播树的根,树的高度为 $O(\log_k N)$, N 为参与活动的节点数目;

(3)对于多播树的维护,每个节点只负责记录其所在簇的其它节点的状态信息以及父子节点的状态信息。节点平均维

护开销为 $O(k)$,最大维护开销为 $O(k \log N)$;

(4)节点加入时,从根节点开始搜索,直到在最底层某个簇中找到合适位置;节点退出或失效时,仅需要经过簇内协商即可为子节点找到新的父节点;节点的加入离开行为使得簇的大小不在 $[k, 3k]$ 之间时,需要进行簇的拆分或合并。

与前面两种协议对比,NICE 的维护管理具有分布性和自治性,节点的维护负载较轻,并且节点的退出只影响局部节点,不影响根节点。其缺点是层次越高的节点,其负载越重,如最高层次的节点的度数达到 $O(k \log N)$,当系统规模很大时,可能成为系统的瓶颈。

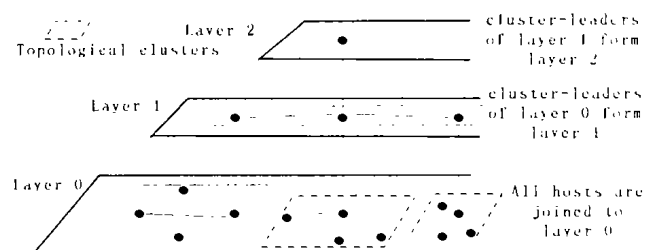


图 1 Hierarchical arrangement of hosts in NICE

文[7]基于 NICE 协议的缺陷,提出了一种新的基于层次簇思想的多播树构建协议 Zigzag(如图 2 所示),该协议与 NICE 大致相似,但解决了其瓶颈问题。其主要改进点是:假设节点 d 在树中的最高层次为 L ,在 L_{i-1} 层次上 d 所属的簇为 $C_{d,i-1}$,与 $C_{d,i-1}$ 同属 L_{i-1} 层次的其他簇集合为 $S_{d,i-1}$,那么, d 只向 $S_{d,i-1}$ 中的非簇首节点转发数据。改进之后,多播树中节点所带子节点的数目最多为 $O(k^2)$,与参与多播树的节点数目无关。另外,在其他性能方面 Zigzag 与 NICE 相当,即每个节点的平均维护负载为 $O(k)$,树的高度为 $O(\log N)$ 。

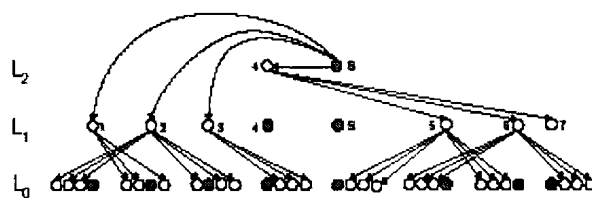


图 2 Zigzag multicast tree

3 QoS 保证

以视频流为例,现行的各种视频压缩标准产生的视频流大都有严格的时序和数据率要求,如 MPEG-1 的数据率要求为 1.5Mbps, MPEG-2 的数据率要求为 2-10Mbps, MPEG-4 的数据要求约为 700kbps,超过或低于此数据率会导致解码时的缓冲区上溢或下溢,影响播放效果。因此发送视频数据流时必须严格保证发送的实时性。此外在延迟、抖动、丢包率等方面都会影响 QoS 服务质量。在 P2P 流媒体服务体系中,由于提供服务的节点为中间节点,而中间节点所存在的不确定性、不稳定性以及服务能力的差异使得 QoS 问题更加突出。实际上,在第 2 节中讨论的各种多播树协议中,就已经涉及到 QoS 问题,因为节点的离开或失效会对后续节点的 QoS 产生严重影响。另外,由于 P2P 本身在网络上属于应用层,其 QoS 一般建立在端控制基础上,这与网络层、传输层上研究的 QoS 问题存在一定区别。

文[9]中针对节点频繁加入或离开的行为会导致后续节点的 QoS 水平发生大的抖动,提出了一种解决方法:一是对

视频流的编码采用 MDC(Multiple Description Coding)方式,即把视频流编码为独立的不同的组,节点接收到的组数越多,视频质量越好;二是对这些独立编码组用不同的多播树进行网络分发,接收端可以根据自身网络带宽、拥塞等状态选择加入到多棵多播树。这样,尽管接收节点所属的某棵多播树由于某种原因暂时中断数据传递,但其所属的其它多播树能维持传递其它编码分组的数据,这样就平滑了中间节点离开行为对后续节点 QoS 水平的影响。

文[12]提出了一种 multiple-sender 方式下保证 QoS 的流数据传递方式,针对多个发送端向一个接收端传递数据,提出了如何在多个发送端之间进行带宽和数据分配。首先根据式(1)

$$T = \frac{s}{r \sqrt{\frac{2p}{3} + t_{RTO} (3 \sqrt{\frac{3p}{8}}) p (1 + 32p^2)}} \quad (1)$$

计算发送/接收端 TCP-Friendly 友好带宽,其中, s 是 TCP 的报文大小, p 是丢失率, r 是 TCP 超时时间, t_{RTO} 是 RTT (Round Trip Time) 时间。

如果接收端播放速率为 V , 每个发送端的速率为 T_i , 那么所选择的发送端个数 N 满足式(2)

$$\sum_{i=1}^N T_i \geq V \quad (2)$$

其次,文献作者认为,对每个数据包 $pack_j$, 其到达接收端的时刻与其在接收端的播放时刻相差最大时,最有可能保证接收端的连续播放,为此,定义式(3)

$$A(j, p) = T_j - P_{j,p} \delta(p) + 2r(p) \quad (3)$$

$A(j, p)$ 代表当 $pack_j$ 由发送方 p 发送时, $pack_j$ 在接收端的到达时刻与播放时刻的差值。其它几个变量分别定义如下: T_j 为 $pack_j$ 在接收端的播放时刻, $P_{j,p}$ 为某一同步时刻开始到当前时刻发送方 p 共发送的数据包数目, $\delta(p)$ 为发送方 p 发送数据的间隔,其值可由公式(1)计算得出, $r(p)$ 为 RTT。对每个数据包 $pack_j$, 计算所有发送方 p 所对应的 $A(j, p)$ 值,取 $A(j, p)$ 最大值的发送方 p 即负责发送数据包 $pack_j$ 。该方式一般只能适应 CBR 的数据播放,对 VBR 情况不适应。

文[5]针对节点的动态行为和网络链路状态的动态变化,提出了一套 QoS 保证机制。

首先建立了一种对发送方的选择算法,该算法根据网络链路状态和发送方节点属性,把所有能够传递数据给接收方 r 的节点分为 P^{act} 和 P^{sub} 集合,其中, P^{act} 集合成员作为当前的数据发送方, P^{sub} 集合成员作为备份的数据发送方。算法原理如下:以 r 为根节点,利用某些网络拓扑发现方法(network tomograph)构造树,树的中间节点为发送方到 r 所经过的路由器,叶节点为可能的发送方;根据式(4)

$$G_p = A_p \prod_{i \rightarrow j \in p \rightarrow r} w_i^{(p)} x_{i \rightarrow j} \quad (4)$$

计算每个叶节点 p 的权值 G_p , 其中 A_p 为 p 的在线概率, $p \rightarrow r$ 为从 p 到 r 的路径, $i \rightarrow j$ 为 $p \rightarrow r$ 中的一段, $w_i^{(p)}$ 为衡量段 $i \rightarrow j$ 带宽状态的权值(由该段的可用带宽、共享情况等决定), $x_{i \rightarrow j}$ 为段 $i \rightarrow j$ 上基于丢包率的权值;在获取每个可能的发送方 p 的权值 G_p 后,根据式(5)(6)

$$\text{Maximize } E[\sum_{p \in P^{act}} G_p R_p] \quad (5)$$

$$\text{Subject to } a_i R_0 \leq \sum_{p \in P^{act}} R_p \leq a_u R_0 \quad (6)$$

构造集合 P^{act} , 其中 R_p 为发送方 p 数据传输率, a_i 和 a_u 为采用 FEC 编码传输时的两个系统参数,反映系统对丢包事件的

容忍程度。式(6)代表所有可能的 P^{act} 集合,而式(5)则根据 P^{act} 中成员节点的权值和发送速率来决定最好的 P^{act} 集合。

其次,在确定当前的发送方集合 P^{act} 后,文[5]提出了一种带宽分配和数据分配算法。

最后,为了适应网络和节点状态的变化,文[5]提出了对 P^{act} 中成员状态和与其相关的网络链路状态进行跟踪和监视,并在 QoS 质量水平下降时把 P^{sub} 中的成员动态补充到 P^{act} 集合中。

4 激励机制

在 P2P 体系中,需要参与服务的节点尽量贡献自己的资源,以提高 Internet 上的资源利用率,快速增长系统服务能力。但实际上网络中的众多用户在接受服务的同时不愿意贡献出本身的空闲资源为他人提供服务,这一点在文[13]中得到了实验论证:通过对著名的 P2P 文件共享系统 Gnutella^[14] 24 小时的运行活动跟踪记录,发现系统中 70% 的节点用户根本没有共享本身资源,1% 的用户节点承担了系统 47% 的下载负载,25% 的用户节点承担了系统 99% 的下载负载。这表明, P2P 系统中这种“自由发挥”(free riding)的方式并不能够真正充分利用 Internet 上的空闲资源,也不利于 P2P 今后的发展。而当前,大多数的 P2P 系统都建立在这种“自由发挥”模式基础上。因此,必须建立某种激励机制,使得网络中的节点在行使消费者角色的同时,主动承担生产者职责。

文[15]提出了一种基于博弈论的激励机制,讨论了两种支付体系下用户节点的激励效用:

- 微支付(micro-payments):采用“下载支付费用,上载获取酬劳”的方式,建立 P2P 共享体系,激励用户节点为其它节点提供共享资源;

- 共享酬劳(rewards for sharing):其机制与微支付类似,区别在于节点只需共享了资源即可获取酬劳,而不取决于其它节点是否从本节点下载了资源;

这种激励机制要求有中心节点行使仲裁职责,适用于 Napster 模式的 P2P 系统,对 Gnutella 模式不适用。

通过激励机制能使中间节点贡献本身资源,但又如何保障源服务提供商(seeding service provider)利益呢?文[4]对此情况进行了分析说明:假设每点播一部电影获利 v , 那么源服务提供商分成 $(1-a)v$, 真正提供数据传输服务的对等节点(peer nodes)分成 av , a 又称为分成因子。如果每部电影的播放时间为 T , 源节点(seeding server)能同时容纳的请求数目为 m_{p2p} , 对等节点能同时容纳的请求数目为 A (与分成因子 a 相关), 那么在时间 h 内, 源服务提供商可获利

$$V_{p2p} = \frac{h}{T} m_{p2p} v + \frac{h}{T} A (1-a) v \quad (7)$$

文献中进一步分析了在多种情况下如何对 v 取值,以便源服务提供商获利最大。

5 未来研究方向

基于 P2P 的流媒体服务体系目前还处于初步研究阶段,还有许多问题需要解决。

一个需要进一步研究的问题是多播树的生成算法:流媒体本身对资源的消耗较大,在多播树中,中间节点所带子节点数目受限;服务延迟又不能太长,即树的高度受限;此外,还要考虑到各个节点的服务能力所体现出的异构性,以及整个算法的维护开销等,目前还没有算法综合考虑了以上所有因素,

(下转第 30 页)

表 1 Megaco/H. 248 与 MGCP 对比表

	Megaco/H. 248	MGCP
业务支持	采用灵活的连接模型,支持所有类型的网络;能有效支持多种应用,包括会议、在线咨询、音乐点播等; 允许对数据包进行合法截取。	连接模式不灵活,对于不同的网络需要通过复杂的配置开展业务;不能有效支持会议及其他复杂应用。
命令	将命令和交易标识分开进行传送。	将交易标识嵌入在命令中一起传送,“寻找”(Finding)命令的响应很难实现
灵活性	通过一个 MOVE 命令,可以容易地实现呼叫等待和三方通话业务;很容易定义新的应用接口,可以在较短时间内适应市场需求。	灵活性较差。
效率	在特定应用中,通过定义 MGC 和 MG 间的应用文档,可以提高互操作能力,并减少复杂性。	未提供应用文档机制,无法提高效率。
可扩展性	在不影响基本协议标准的情况下,允许对包进行扩展,可以在原有包的基础上定义新包。	很难进行扩展设计;没有开放的包定义机制;不能提供明确的包扩展方法。
安全机制	在 IPSec 的基础上,增加了鉴权头域,提高了安全性。	只依赖 IPSec 保障安全。

现简单等特点,但其互通性和支持业务的能力受到限制。

Megaco/H. 248 因其功能灵活、支持业务能力强而受到重视,而且不断有新的附件补充其能力,是目前媒体网关和媒

体网关控制器之间的主流协议,目前国内通信标准推荐采用 Megaco/H. 248 协议。

两者之间的主要对比如表 1。

结束语 在下一代网络中,媒体网关(MG)将成为交换与分组网络之间的枢纽,媒体网关控制器(MGC)将作为控制运行的神经中枢。通过媒体网关控制协议可以实现媒体网关控制器对媒体网关的承载控制、资源控制及管理。本文对目前流行的两种媒体网关控制协议进行了分析和比较。我们可以看到,MGCP 具有实现简单等特点,但其互通性和支持业务的能力受到限制。Megaco/H. 248 协议简单,功能强大,且扩展性很好,受到越来越多厂商的认可,它必将成为未来发展的主流协议。

参 考 文 献

- 1 糜正琨. IP 网络电话技术. 人民邮电出版社, 2000
- 2 Arango M, et al. Media Gateway Control Protocol (MGCP). RFC 2705, Oct. 1999
- 3 Cuervo F, et al. Megaco Protocol version 0.8. RFC 2885, Aug. 2000
- 4 ITU-T SG16. Gateway Control Protocol, H. 248. 1. March 2002
- 5 Nortel Networks White Paper. The role of Megaco/H. 248 in media gateway control: A protocol standards overview. <http://www.nortelnetworks.com/>, Dec. 2000
- 6 Taylor T. Megaco/H. 248: A New Standard for Media Gateway Control. IEEE Comm. Mag., Oct. 2000

(上接第 3 页)

具有进一步的研究价值。

另外一个需要研究的问题是 P2P 服务体系下的存储问题。由于部分节点需要承担服务器的部分功能,因此需要在这些节点上存储流数据,同时这些节点在存储、带宽等能力上也存在异构性,因此,如何在不同的节点上存储数据,如何进行数据刷新,以达到系统的负载均衡、增强系统的可靠性和可扩展性,必须有良好的存储策略作为支持。

由于 P2P 系统中节点的行为具有 Ad-hoc 性质,如何在动态的环境下保证流媒体的服务质量,需要结合流媒体对 QoS 的要求和网络流量分析等方面的知识,研究代价低、易实现的容错机制。

对于激励机制,作者认为需要对用户节点在 P2P 体系下的行为和兴趣趋向进行建模,同时借助于其它领域知识的研究成果,如微观经济理论^[16],来理解激励机制和用户行为的关系,以建立适当的激励机制。

安全问题,在所有 P2P 的协作体系中,安全保障都扮演着重要角色。围绕如何评估共享资源的真实性和可靠性,研究如何提供数字证书、对等节点认证、安全存储等,具有重要意义。

结论 在本文中,我们阐述了在大规模流媒体应用中传统服务体系所面临的困难,指出了 P2P 流媒体是一种性价比良好的服务体系;讨论了该服务体系的特点和所面临的挑战,并分别就多播树协议、QoS 保证、激励机制等方面的研究进展进行了总结,指出了进一步的研究方向。

参 考 文 献

- 1 Quinn B, Almeroth K. IP multicast applications: challenges and solutions. in Internet Engineering Task Force (IETF) Internet Draft, March 2002
- 2 Gadde S, Chase J, Rabinovich M. Web caching and content

- distribution: a view from the interior. In: Proc. of the 5th international web caching and content delivery workshop, Lisbon, Portugal, May 2000
- 3 Deshpande H, Bawa M, Garcia-Molina H. streaming live media over a peer-to-peer network. In Work at CS-Stanford. Submitted for publication, 2002
- 4 Hefeeda M, Bhargava B, Yau D. A Cost-Effective Architecture for On-Demand Media Streaming. Journal of Computer Networks, 2003
- 5 Hefeeda M, Habib A, Botev B, Xu D, Bhargava D B. PROMISE: A Peer-to-Peer Media Streaming System. Submitted to ACM Multimedia, April 2003
- 6 Banerjee S, Bhattacharjee B, Kommareddy C, Varghese G. Scalable application layer multicast. In: Proc. Of ACM SIGCOMM'02, Pittsburgh, PA, USA, Aug. 2002. 205~220
- 7 Tran D, Hua K, Do T. Zigzag: an efficient peer-to-peer scheme for media streaming. In: Proc. of IEEE INFOCOM'03, San Francisco, CA, USA, IEEE, 2003
- 8 Jack Lee Y B, Leng W T. Study of a Server-less Architecture for Video-on-Demand Applications. In: Proc IEEE Intl. Conf. on Multimedia and Expo., Lausanne, Switzerland, Aug. 2002. 233~236
- 9 Padmanabhan V N, Wang H J, Chou P A, Sripanidkulchai K. distributing streaming media content using cooperative networking. In ACM/IEEE NOSSDAV, Miami, FL, USA, May 2002
- 10 VTrails. A p2p streaming product. <http://www.vtrails.com>.
- 11 AllCast. A p2p streaming product. <http://www.allcast.com>.
- 12 Tu Yicheng, Lei Shan. Towards cost-effective on-demand continuous media service: a peer-to-peer approach. Purdue University, course project report. Fall 2002
- 13 Adar E, Huberman B. Free riding on Gnutella, First Monday, 2000, 5(10)
- 14 Gnutella website. <http://gnutella.wego.com>.
- 15 Golle P, Leylton-Brown K, Mironov I. Incentives for sharing in peer-to-peer networks. In: Proc. of Second workshop on Electronic Commerce (WELCOM'01), Heidelberg, Germany, Nov. 2001
- 16 Mas-Colell A, Winston M, Green J. Microeconomic Theory. Oxford University Press, New York, 1995