

云辅助的 P2P 视频点播分发机制研究*

郭红方^{1,2}, 林子松^{1,2}, 王宗敏^{1†}

(1. 郑州大学 河南省信息网络重点学科开放实验室, 郑州 450052; 2. 郑州大学 信息工程学院, 郑州 450001)

摘要: 提出一种新的流媒体分发混合网络模型 P2Cloud, 通过将云技术引入到 P2P 模式中, 充分利用云技术的高可靠性、高存储及处理能力来协助 P2P 完成视频点播服务。针对 P2Cloud 模型的关键问题——视频片段的分布, 引入数据片段有用值的概念, 不但考虑到视频片段的流行度, 同时考虑已加入节点的失效性, 进而提出根据有用值来决定数据块向云平台的上传策略。并通过形式化的成本估算模型对 P2Cloud 点播应用成本进行量化, 以指导点播服务提供商降低其部署成本。实验验证了提出的 P2Cloud 在用户满意度、带宽节约率及带宽消耗方面优于现有方案。

关键词: 视频点播; 对等网络; 云服务; 成本模型; 流行度; 内容分发

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2013)02-0525-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.057

Research on streaming distribution of cloud assisted P2P video-on-demand

GUO Hong-fang^{1,2}, LIN Yu-song^{1,2}, WANG Zong-min^{1†}

(1. Henan Provincial Key Lab on Information Networking, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China; 2. School of Information & Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This paper proposed a hybrid streaming distribution overlay, called P2Cloud, which supported P2P VoD service by introducing cloud technology with high reliability, storage, and processing ability. To address the key issue of P2Cloud—the video segment distribution, the segment usefulness considering popularity and peer effectiveness was introduced, it proposed a migrating policy according to the segment usefulness as well. And it proposed the formalized cost model of P2Cloud to guide the VoD service to reduce the deployment cost. The extensive simulation experiments validate that P2Cloud outperforms the existing solutions in term of the user's satisfaction, bandwidth saving, bandwidth consumption.

Key words: VoD; P2P; cloud service; cost model; popularity; content distribution

0 引言

随着宽带互联网的普及和多媒体技术的发展, 视频点播服务已经成为互联网生活的重要组成部分, 然而庞大的用户规模、动态的用户操作和海量的流媒体数据向点播服务提出了更大的挑战。如何在现有的物理网络上以较低的代价向大规模的动态用户提供交互性的流媒体应用也一直是点播应用需要解决的关键问题^[1,2]。P2P 技术通过普通节点相互协作实现了免费的资源共享, 成为视频点播应用最有前景的实现方案。然而 P2P 视频点播系统中, 用户行为的时间不同步性、兴趣独立性、节点的高度动态性降低了节点间相互协作共享资源的机率, 不能满足用户对视频的需求, 也不满足高资源利用率及系统的快速扩展。

据统计, 对于前 25 名的流行视频文件就需消耗 60% 的服务器带宽。另外, 视频点播应用存在时间局部性, 例如每天的晚 8 点为视频点播的黄金时间, 此时用户量很大, 然而一天的其他时间用户都在上班, 用户量小, 因此为了满足用户的需求, 视频点播服务提供商不得不部署大量的服务器支持用户量最大时的点播服务。这导致了大量的服务器资源大部分时间内

是浪费的, 没有充分的利用。这在一些重大事件、运动会、比赛等期间尤其突出。

云服务“pay-as-you-go”的付费模式^[3], 充足的存储空间与快速的处理能力为点播应用的发展提供了新的发展空间。如果把整个视频服务都移到云平台上, 用户所有的请求都被定向到云服务, 就成了传统意义上的 C/S 模式。这种模式不但不能充分利用节点自身的资源, 用户的频繁访问还使得点播服务提供商向云服务器者付出巨额资金, 其成本往往要比点播提供商自己部署服务器要大。根据文献^[4]提到的 MMVE 服务, 假设每 12 h 平均的流量是 27 TB, 而 Amazon EC2 按 0.08 \$/GB 标准收取费用^[5], 则每个月带宽的消耗就得花费大概 13 万美元。从此不难看出, 对于海量的流媒体视频数据如果全部都利用云服务, 那代价更是不可想象。

为了克服 P2P 流媒体点播系统中节点的不可靠性、请求时间的局部性、服务器的可扩展性等导致的用户点播服务不能满足的问题, 本文结合 P2P 与云服务, 提出一种新的视频点播内容分发架构 P2Cloud, 通过考虑 P2P 点播应用于中的数据片段的流行度与节点的离开行为对要迁移到云平台的点播数据片段的进行选择进行设计。云辅助的 P2Cloud 不但避免了 P2P VoD 中节点不

收稿日期: 2012-07-05; 修回日期: 2012-08-10 基金项目: 国家“863”计划基金资助项目(2008AA01A315); 国家教育部高等学校博士学科科研基金资助项目(20114101110007); 河南省教育厅 2011 年创新人才资助项目(2011HASTIT003); 河南省信息化工程项目(2008xxh001)

作者简介: 郭红方(1981-), 女, 河南濮阳人, 博士, 主要研究方向为网络多媒体、云服务等(hfguo@zzu.edu.cn); 林子松(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为计算机网络、Web 服务; 王宗敏(1964-), 男(通信作者), 教授, 博士, 主要研究方向为计算机应用技术。

可靠性导致的跳转时延过长,也降低了点播服务提供商为了满足用户的需求而不断部署新服务器带来的成本。

1 相关工作

根据 P2P 技术与云服务结合的模式,将其分为以下两类:

a) P2P-in-Cloud 模式。云平台对于一个服务提供商来说,整个云平台可以被认为是一个集中式的资源,这些数据中心会分布在不同的地方。一个 Cloud-like 的架构支持平台的服务,存在严重的单点失效问题。现有的一些研究侧重在利用 P2P 技术优化云服务端的拓扑结构^[6-10],例如,GFS 文件存储系统为了克服 master 目录主服务器的性能瓶颈,文献[8]就通过结构化的 DHT 组织所有的 TrunkServer 服务器。也有的研究利用部署多个 master 目录主服务器来减少单点失效的风险^[9]。Ranjan 等人^[10]提出了采用 P2P 技术连接不同的云服务的功能,不仅仅只部署在存储服务上。P2P-in-Cloud 主要是面向云服务器端的,本文关注的是从用户角度向云服务转移的应用的 Cloud-in-P2P 模式。

b) Cloud-in-P2P 模式。文献[4]通过结合 P2P 资源与 Cloud 资源来支持大规模的 MMVE 应用,Cloud 给节点提供了可信任的资源,极大地提高了其扩展性,并且达到负载均衡。文献[11]提出了一种基于 P2P 与 Cloud 的移动设备流数据的分发结构,其中 Cloud 端提供存储与及处理请求的任务,移动终端之间则通过 P2P 来合作分发数据、分散负载。文献[12]提出基于云服务传递网络的弹性 P2P VoD 覆盖网络构造方法。文献[13]则构建了一种基于 Cloud-P2P 的恶意代码联合防御网络。

与以上研究不同,本文的主要工作如下:a)提出云辅助的视频点播分发模型,解决其成本高、资源利用率低等问题;b)进而引出其关键问题数据片段备份策略选择优化问题及系统部署的形式化成本估算模型;c)通过模拟仿真实验及对比对所提策略的性能进行分析,验证其有效性。

2 云辅助的 P2P 视频点播分发模型

云辅助的 P2P VoD 服务模型构建的重要依据从以下三方面来分析:

a) P2P 模式需要云模式的辅助,由于 P2P 流媒体服务中,节点的不可靠性、服务器的可扩展性等导致的服务不能满足的情况及服务器带宽消耗高等问题,利用云服务提供的存储空间、可靠服务,将视频数据分发的部分功能转移到云服务中,从而实现部分的负载转嫁,达到了降低点播服务提供商服务器的负载,降低其成本。

b) 网络中既然有超级节点这个角色^[14],20%的超级节点完成了 80%的请求服务,所以设计思路就可以将 Cloud 网络作为 P2P 网络中的超级节点。在 Cloud 中,存储服务器可以作为 P2P 网络中的边缘服务器对流数据进行快速可靠的转发。

c) 云模式需要 P2P 模式的辅助,由于云模式下的流媒体服务是通过租用服务器资源来实现的,所以为了减低其运行成本,P2P 免费资源共享服务是理想的选择。

2.1 设计思路

利用云平台提供的存储空间、可靠服务,将视频点播中数据分发的部分功能转移到云服务中,从而实现部分的负载转嫁,达到降低点播服务提供商服务器的负载,降低其成本的目的。

其中需要解决的关键问题是哪些数据应该转移到云服务中,需要转移多少数据流量等。这些都直接关系到点播服务提供商需要向云服务商付出的成本。

本文将利用 Cloud 网络作为 P2P 网络中的超级节点来帮助解决由于海量流媒体与高带宽消耗带来的 P2P VoD 服务得不到满足的问题。而新的服务结构面临的关键问题与挑战如下:

a) 整个数据转发网络包括参加的用户节点、点播应用提供商的服务器及引入的云服务器,通过合理的部署进行快速的数据转发。

b) 视频片段的放置问题,根据数据片段的流行度与节点失效率来决定数据片段向云平台转移的策略。

c) 对于视频点播服务提供商最关心的带宽消耗问题,通过模型化的分析以指导提供商需要部署服务器的方案,降低其成本。

2.2 云辅助的 P2P 视频点播架构——P2Cloud

本文提出了 P2Cloud 视频点播服务内容分发模型,如图 1 所示。

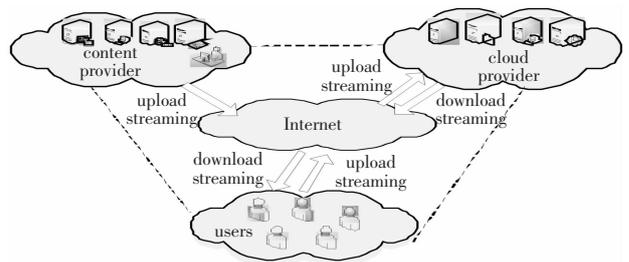


图 1 P2Cloud 拓扑模型

P2Cloud 包括三个主要参与对象:

a) 内容提供商 (content provider, CP)。内容提供商拥有源视频资源,除了负责整个系统的传统的节点管理、内容分发功能外,还需负责与另一参与对象——云服务提供者 CLP (cloud provider) 的交互。

b) 终端用户 US (users)。它是整个系统服务的终端用户,其动态的用户请求及对服务质量的需求是系统设计的关键参考因素。终端用户间可通过向内容提供商请求、互相协作、向云服务提供者请求资源。

c) 云服务提供者 CLP (cloud provider)。CLP 根据当前用户请求及 CP 提供服务情况,协助合理地向用户提供数据资源以满足用户的请求。

对于 P2Cloud 中用户,其请求操作可通过 P2P 终端用户协作、内容提供商的私有服务器及租用的云服务器三种方式实现。如图 2 所示。当用户发起一个请求,首先需要在通过 P2P 网络来搜索其目标资源,资源的快速准确定位是 P2Cloud P2P 端研究的重要内容。若在 P2P 端没有找到目标资源,根据传统的方法,此时需要向内容提供商部署的私有服务器获取。对于 P2Cloud 模式,用户根据本文提出的成本估算模式得到应该向云服务提供者还是内容提供商服务请求。

2.3 点播应用与云平台交互方式

P2Cloud 需要解决的关键问题是哪些数据应该转移到云服务中,转移多少数据以及点播应用如何与云平台交互等,这些关系到点播服务提供商需要向云服务商付出的成本。图 3 给出了点播应用与云平台交互的结构。其中 Broker 是云提供商与其客户通信接口。当接到有用户上传或下载数据的请求时,内

容提供商需与云服务提供商就租用不同服务级别、服务器类型等成本进行协商,进而通过虚拟机调度机制对虚拟机群的资源进行调度。在此需要指出的是,内容提供者与普通用户都可以向云平台上传资源,这样也降低了内容提供者私有服务器的负载。不难看出,在此有两个关键问题需要解决:a)数据片段内容放置策略(也可看做是迁移策略);b)如何为内容提供者设计准确的成本模型,使得能及时合理地选择要租用的服务。

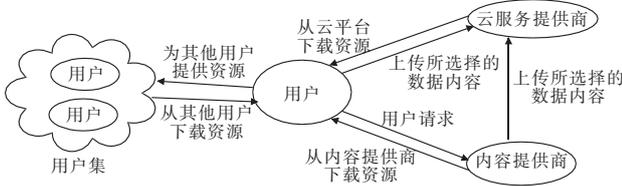


图 2 CAPMedia 用户请求模式

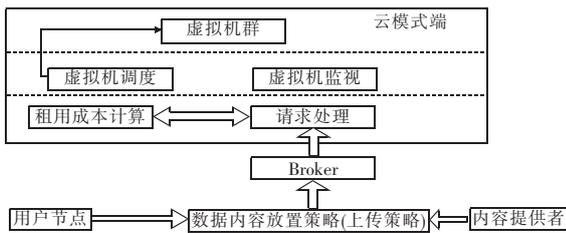


图 3 点播应用与云模式交互方式

2.4 视频数据片段备份上传策略

由于点播用户行为是高度动态变化的,对视频片段的喜好也遵循时间局部性,对于一些热门片段,访问的用户量多并不能说明此时提供数据的节点也多,因为大量的用户观看完之后会选择离开或跳转到其他节目片段。这也从对实际系统的监测数据中得到验证,如图 4 所示,对于服务器端的流量,流行度前 25% 的文件夹要消耗 60% 的带宽资源,越流行的视频并没有由于请求的节点多而互相共享达到节约带宽资源。

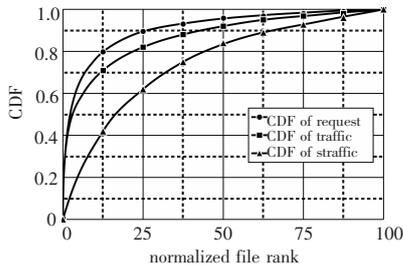


图 4 点播实际系统流量统计

所以为了影响带宽资源的流行度高的文件,为了满足用户的需求,其流行度将作为是否要上传至云平台的一个重要因素。同时为了降低上传至云平台的成本,只有在现有节点通过共享不能满足用户需求时,才会向云平台上转移。本文提出了数据片段有用值的概念,不但考虑到视频片段的流行度,同时也考虑了已加入节点的失效性,进而提出了根据有用值来决定数据块备份的上传策略 PPL(popularity and peer life)。

定义 1 在 t 时刻,若缓冲区的状态是 $S(T) = (n_1(t), n_2(t), n_3(t), \dots, n_m(t))$, m 是一个影片包括的数据块的数目, $n_i(t)$ 是存储有数据块 i 的节点集。对于在时间段 $[t, t + \theta]$ 内,如果对于存储数据块的节点集离开的概率为 $F^\theta(T) = (f_1^\theta(t), f_2^\theta(t), \dots, f_m^\theta(t))$,则定义该段时间内缓冲区中节点有用值为

$$\sum_{i=1}^m (1 - \prod_{j=1}^{n_i(t)} f_{ij}^\theta(t)) / m$$

在此加入已经得到的访问概率信息,设在时间段 $[t, t + \theta]$ 内,数据块 i 的访问概率是 $p_i^\theta(t)$,则此数据块 i 在整个系统的效用值可表示为

$$(1 - \prod_{j=1}^{n_i(t)} f_{ij}^\theta(t)) / p_i^\theta(t)$$

以上定义是说明数据片段 i 对于整个系统的有用值,然而此有用值需要已知系统全局信息情况,这样又会加重服务器的压力,带来服务器性能瓶颈,浪费大量的资源。本文提出的 PPL 策略通过节点与邻居节点交换信息,选出需要上传的数据片段,把任务分散到每个节点,这样就减少了服务器的负载。以下是对选择数据块的理论分析与定义。

定义 2 假设节点 i 在 t 时刻的邻居节点集为 $neighbor(t)$,其中存储有数据块 k 的邻居节点定义为 $neighbor^k(t)$,如果数据块 k 不在节点 i 本地缓存区中,即 $k \notin localcache_i(t)$,则节点 i 选择预存的数据块的方法是通过找到邻居节点中效用值最小的数据块,如下:

$$\begin{cases} \min_{c \in (1, 2, \dots, m)} [(1 - \prod_{nei \in neighbor^k(t)} f_{nei}^\theta(t)) / q_{ij}^\theta(t)] & k \notin localcache_i(t) \\ 0 & k \in localcache_i(t) \end{cases}$$

根据以上分析,数据块的上传策略考虑到其节点离开失效的情况,利用以上定义的计算公式比较效用值,这种解决方案更适合高度动态的视频点播应用。

3 系统成本估算模型

向云服务中转移部分的视频点播服务不得不考虑成本问题,采用流媒体数据流量的传输作为指标分析了 P2Cloud 视频点播的成本估算。图 5 描述了视频点播服务在五类节点间的数据转发模式。其中源服务器不但要服务部分用户节点,还要向云平台上上传视频数据;P2Cloud 也允许普通节点向云平台上传视频内容。

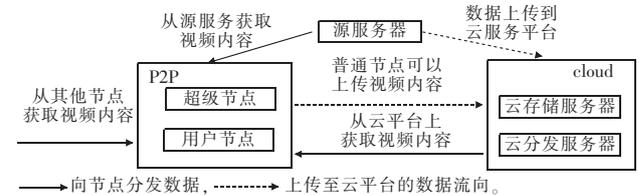


图 5 P2Cloud 数据转发模型

定义: $cost_1$ 为视频点播服务提供商向节点分发数据的流量, $cost_2$ 为视频点播服务提供商向云服务上传的视频资源流量, $cost_3$ 为普通节点向云服务上传视频资源流量, $cost_4$ 节点从云服务上获取视频资源的流量, $cost_5$ 为租用的存储服务器的成本。其中: $cost_2$ 、 $cost_3$ 、 $cost_4$ 、 $cost_5$ 都是云服务提供商向点播服务提供商收取的; $cost_1$ 、 $cost_2$ 为视频点播服务提供商自己部署服务器的成本。成本估算参数描述如表 1 所示。

表 1 成本估算参数描述

参数	功能描述
ε	考查的时间段
c_i	数据块 i
$s(i)$	数据块 i 的大小
$tocs^\varepsilon(t)$	在 ε 内源服务器向云服务上传的数据块
$toep^\varepsilon(t)$	在 ε 内普通节点向云服务上传的数据块
SSCapacity	SS 服务器的带宽服务能力
Request $^\varepsilon(t)$	节点在 ε 时间段内对数据块的平均请求
SStoPeer $^\varepsilon(t)$	节点在 ε 时间段源服务器提供的平均带宽
P2P $\varepsilon(t)$	节点在 ε 时间段相互资源共享平均带宽
CSS(t)	在 t 时刻存储在云服务上的存储空间

根据以上分析,下面给出了成本计算的形式化表示,对于时间段 $[t, t + \varepsilon]$ 内根据参数说明表1所示的参数说明,可以得出总成本 cost 为

$$\text{cost} = \text{cost}_1 \times \text{SSCapacity} + \sum_{i \in \text{toCS}^e(t)} \text{cost}_2 \times s(i) + \sum_{j \in \text{toCP}^e(t)} \text{cost}_3 \times s(j) + \text{cost}_5 \times \text{CSS}(t) + \text{cost}_4 \times (\text{Request}^e(t) - \text{SStoPeer}^e(t) - \text{P2P}^e(t))$$

为求最小的成本消耗,根据租用成本计算模块,使系统能自适应地在源服务器、终端节点与云服务器间进行资源请求的最优配置。在保证用户请求得到满足的情况下, λ_1, λ_2 代表源服务器与云服务器提供资源占用的比例。可形式化求最小值问题,如下:

$$\begin{aligned} \text{Minimize: } C &= \lambda_1 \times \text{SStoPeer}^e(t) \times \text{cost}_1 + \lambda_2 \times \text{Cloud}^e \times \text{cost}_4(t) \\ \text{Constraints: } &\text{P2P}^e(t) + \text{SStoPeer}^e(t) + \text{Cloud}^e(t) \geq \text{Request}^e(t) \end{aligned}$$

4 性能测试与分析

4.1 实验配置

本节对 P2Cloud 进行了仿真实验,优化了基于事件驱动的 P2P 视频点播模拟器^[15],模拟了云计算平台环境,并实现本文提出的策略,测量了基于 P2Cloud 视频点播应用的操作成本与性能,并与 P2P、C/S 结构进行对比分析。比较了三种结构在节点失效时对点播服务的影响。对提出的 PPL 策略进行了多方面的测量分析,根据所提出的成本估算模型作了模拟实验,对成本消耗进行量化。主要性能指标如下所示:

- a) 未满足用户请求的概率。节点没能获得服务的请求数量与所有请求的数量比值。
- b) 带宽节约率。请求云服务器上的数量与所有请求的比率。
- c) 成本率。采用 P2Cloud 所消耗的成本与传统的 C/S 模式的成本比值。

本实验的视频总共包括 720 块,节点数目是 16 000。每个节点请求可以是 1 ~ 720 的任意一数据块。数据块的流行度采用 log-normal 分布^[16],参数仍是 $\sigma = 1.35, \mu = 0.0159$ 。由图 2 得知,前 25% 受欢迎的数据要占服务 60% 的带宽,在模拟实验中,本文采用了这些数据。

4.2 实验结果分析

4.2.1 未满足用户请求的概率

图 6 描述了在部分节点失效的情景下,纯 Server、P2P、P2Cloud 三种模型性能的对比如。模拟实验假定节点请求高于服务器最多能支持的请求。对于服务器模式下 16 000 个节点请求,刚开始服务器只能处理 40% 的请求,随着节点失效数量的增加,在 60% 节点都失效时,服务器就能满足所有用户的需求了。但对于 P2P 模式,由于 720 块的数据分散在整个网络中,只有持有这些数据块的大部分节点都离开,节点才不能满足请求。当 90% 以上的节点都失效,P2P 中没有数据源,其失败的请求也随之快速增加。在不考虑成本的情况下,P2P + Cloud 模式对网络的动态性有较强的鲁棒性。

4.2.2 云服务中转移数据块策略

图 7 显示了 P2Cloud 按流行度效用值的高低来选择要上传资源的策略性能。图中采用了两个纵坐标,其中右边的纵坐标与上面介绍的一样,都是代表请求没有得到满足节点数与所有请求的比值。本文假定不考虑 P2P 模式的作用,根据服务器带宽对于前 25% 的文件要消耗 60% 的带宽,在此基础上,本实验测量了 P2Cloud 对点播服务提供商服务器的带宽节约情况,选择了前 20 名的数据块作为对象。

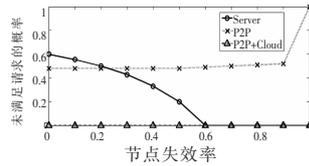


图 6 节点失效对用户请求的影响比较

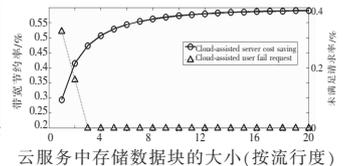


图 7 PPL 上传策略对系统性能影响分析

随着向云服务转移的数据块的增多,其带宽节约率也越来越高,从此图中可以发现前八名的数据块对带宽的性能提升较快,然而随着数据块有用值的增加,其性能提高越来越不显著。这充分验证了提出的根据有用值来向云服务转移数据块的选择策略的有效性。然而需要注意的是不能无限制地向云服务器上传数据,要找到一个最优的数据块上传数量。

从图中虚线可得,当不向云服务传送数据时,32% 的用户请求得不到满足;当上传 3% 的流行数据块时,就已经解决了用户请求得不到服务的情况,极大地提高了视频点播的性能,也增加了其扩展性。

4.2.3 成本消耗测量对比

在 P2Cloud 视频点播服务中最受关注的就是成本问题。根据本文提出的估算模型,对上传不同数量数据块到云服务所需的成本进行模拟实验。所有参数采用归一化的方式,流量都按数据块的个数计算,一个数据块计算成本是 1,其中定义 $C_2 = C_3 = C_4$,都是云服务收取点播服务的费用。

图 8 比较了点播服务器成本消耗情况。其中 cost mode 1 假设云服务收费标准与点播服务提供商的收费标准一样,都是一个数据块收费是 1。随着 SS 服务器带宽容量的提高,其负责的数据转发也越来越多,其成本也越来越高,这从另一方面也说明了采用云辅助的数据转发越多,其成本会降低。然而模式 2 提高了云服务的成本,每传送一个数据块,成本为 1.5,这是因为还必须考虑存储的代价 cost_5 。随着服务器容量的不断增加,成本率有所降低,当达到 60% ~ 70% 时,整个成本价格又出现上升趋势,这是因为此时 SS 服务器已经能完成大概一半的请求,cloud 起的作用会越来越小,而 SS 服务器起的作用会越来越大。由此不难得出,在设计流媒体应用转嫁到云服务时,服务器的实际负载控制也是一个非常关键的因素,合理地分配能有效提高整个系统性能。

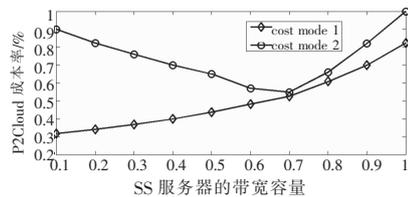


图 8 P2Cloud 成本分析

5 结束语

本文针对当前海量的流媒体数据分发的成本高及 P2P 节点的不可靠性、请求的时间局部性、服务器的可扩展性等导致的用户点播服务不能满的问题,提出一种新的支持视频点播的网络架构模型 P2Cloud,深入研究了如何将视频点播的应用部分转移到云服务中,以低成本实现点播服务中流媒体快速分发。对其关键因素数据片段备份放置问题引入数据块有用值概念,提出了 PPL 的数据上传策略;并对整个系统的成本进行了形式化表示,给出一个成本估算模型。最后通过模拟实验验证了提出的策略的有效性及其 P2P 与 Cloud 结合的高效性。 (下转第 533 页)

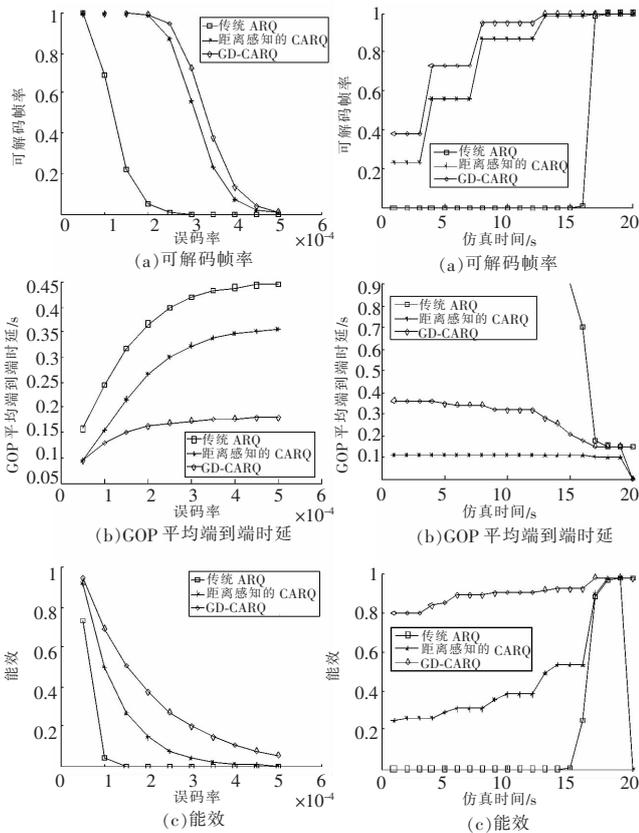


图 6 网络性能随误码率的变化

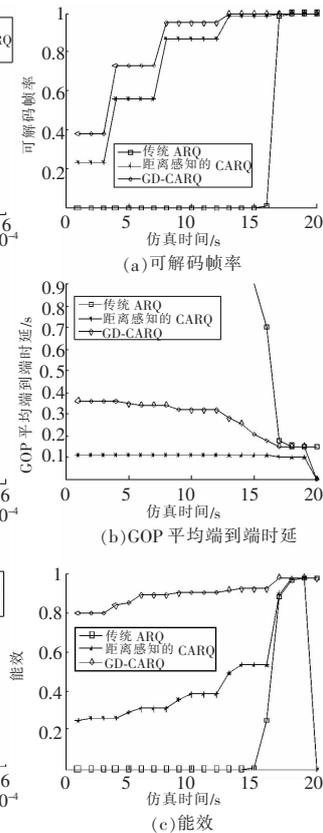


图 7 端到端视频质量保障能力分析

参考文献:

[1] NOSRATINIA A, HUNTER T E, HEDAYAT A. Cooperative communication in wireless networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(10): 74-80.

[2] AKYILDIZ I F, MELODIA T, CHOWDHURY K R. A survey on wireless multimedia sensor networks [J]. *Computer Networks*, 2007, 51(4): 921-960.

[3] 王玉斐. 无线多媒体传感器网络若干关键技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2010.

[4] TACCA M, MONTI P, FUMAGALLI A. Cooperative and reliable ARQ protocols for energy harvesting wireless sensor nodes[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2007, 6(7): 2519-2529.

[5] 胡映波, 蔡跃明. 无线传感器网络中基于切换与保持节点选择的协同 ARQ 协议[J]. *通信学报*, 2010, 31(11): 17-24.

[6] FALLAHI A, HOSSAIN E. A dynamic programming approach for QoS-aware power management in wireless video sensor networks[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2009, 58(2): 843-854.

[7] SANGKOOK L, SU W F, BATALAMA S, et al. Cooperative decode-and-forward ARQ relaying: performance analysis and power optimization[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2010, 9(8): 2632-2642.

[8] 王向东, 梁杨, 李树江. 无线视频传感器网络的能量优化[J]. *沈阳工业大学学报*, 2009, 31(5): 558-563.

[9] 樊晓平, 熊哲源, 陈志杰. 无线多媒体传感器网络视频编码研究[J]. *通信学报*, 2011, 32(9): 137-146.

[10] 周军, 李俊, 朱明. 基于 GOP 取帧与变帧率的 VCR 实现方法[J]. *电子学报*, 2009, 37(8): 1675-1680.

[11] 靳勇, 乐德广, 白光伟, 等. 无线传感器网络跳数和通信距离自适应差错控制策略[J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(4): 596-600.

[12] 邓克波, 刘中. 基于感知距离调节的无线传感器网络节能区域覆盖[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(10): 2305-2309.

[13] ZOU Jun-ni, XIONG Hong-kai, LI Cheng-lin, et al. Lifetime and distortion optimization with joint source/channel rate adaptation and network coding-based error control in wireless video sensor networks[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2011, 60(3): 1182-1194.

[14] Chipcon corp. CC1000 datasheet [EB/OL]. [2010-12-01]. <http://focus.ti.com/lit/ug/swru058/swru058.pdf>.

[15] Crossbow corp. Mica2 datasheet [EB/OL]. [2010-12-01]. http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/6020-0043-01_A_MICA2DOT.pdf.

[16] Video traces research group [EB/OL]. [2010-12-01]. <http://trace.eas.asu.edu/index.html>.

(上接第 528 页)

参考文献:

[1] LIU J, RAO S G, LI B, et al. Opportunities and challenges of peer-to-peer Internet video broadcast [J]. *IEEE Special Issue on Recent Advances in Distributed Multimedia Communications*, 2008, 96(1): 11-24.

[2] 沈时军, 李三立. 基于 P2P 的视频点播系统综述[J]. *计算机学报*, 2010, 33(4): 613-624.

[3] HAYES B. Cloud computing [J]. *Communications of the ACM*, 2008, 51(7): 9-11.

[4] CHEN K T, HUANG P, LEI C L. Game traffic analysis: an MMORPG perspective [J]. *Computer Networks*, 2006, 50(16): 3002-3023.

[5] Amazon EC2 [EB/OL]. <http://aws.amazon.com/ec2/>.

[6] CHEN Zhi-jia, ZHAO Yang, MIAO Xin, et al. Rapid provisioning of cloud infrastructure leveraging peer-to-peer networks [C]//Proc of ICDCS Workshops. Washington DC: IEEE Computer Society, 2009: 324-329.

[7] ZHOU Jing, SHI Zhong-zhi. Unstructured P2P-enabled service discovery in the cloud environment [C]//Proc of the 6th IIP. Berlin: Springer, 2010: 173-182.

[8] XU Ke, SONG Mei-na, ZHANG Xiao-qi, et al. A cloud computing platform based on P2P [C]//Proc of ITIME. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 427-432.

[9] YANG Jun, ZHAO Guo-hua, WANG Ke-jia, et al. A modern service-oriented distributed storage solution [J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2009, 16(1): 120-126.

[10] RANJAN R, ZHAO Liang, WU Xiao-min, et al. Peer-to-peer cloud provisioning: service discovery and load-balancing [J]. *Cloud Computing*, 2010, 1: 195-217.

[11] JIN Xin, KWOK Y K. Cloud assisted P2P media streaming for bandwidth constrained mobile subscribers [C]//Proc of the 16th International Conference on Parallel and Distributed Systems. Washington DC: IEEE Computer Society, 2010: 800-805.

[12] 史佩昌, 王怀民, 刘雪宁, 等. 基于云服务传递网络的弹性 P2P VoD 覆盖网构造方法[J]. *小型微型计算机系统*, 2011, 32(11): 2230-2236.

[13] 郑倩冰, 彭伟, 卢锡成. ERSN: 一种高效鲁棒的超节点对等网[J]. *计算机研究与发展*, 2006, 43(4): 607-612.

[14] 徐小龙, 吴家兴, 杨庚. 一种基于 Cloud-P2P 计算模型的恶意代码联合防御网络[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(6): 2214-2221.

[15] GUO Hong-fang, LIU Jiang-chuan, WANG Zong-min. Frequency-aware indexing for peer-to-peer on-demand video streaming [C]//Proc of ICC. [S. l.]: IEEE Press, 2010: 1-5.

[16] BRAMPTON A, MACQUIRE A, RAI I A, et al. Characterising user interactivity for sports video-on-demand [C]//Proc of International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video. 2007.