

基于可重构路由器上缓存的流媒体协作分发策略

何智能, 谷光昭, 王新, 赵进, 薛向阳

(复旦大学 计算机科学技术学院 智能信息处理上海市重点实验室, 上海 201203)

摘要: 提出一种新颖的基于可重构路由器上缓存的协作分发策略来加速流媒体。通过网络存储即多个边缘路由器节点对热点视频数据进行合作缓存, 就近为用户提供服务, 从而使得流媒体服务器的性能要求尤其是带宽需求得到巨大的降低, 骨干网传输的流量也明显减少, 同时用户响应延迟也得到明显的改善。此外, 实现了一个原型系统来评价基于路由器上缓存的流媒体协作分发策略的性能, 结果表明该方案相比于现有的方案在改善网络性能以及用户体验方面取得很大的提升。

关键词: 流媒体; 缓存; 路由器; 可重构网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)06-0082-09

Novel cooperative caching strategies for video streaming distribution based on reconfiguration routers

HE Zhi-cong, GU Guang-zhao, WANG Xin, ZHAO Jin, XUE Xiang-yang

(Shanghai Key Laboratory of Intelligent Information Processing, School of Computer Science, Fudan University, Shanghai 201203, China)

Abstract: A novel cooperative caching scheme based on reconfiguration routers was proposed to accelerate the delivery of streaming media. Through cooperative caching for popular videos among the routers, the server capability, especially bandwidth requirements were decreased. Moreover, the traffic over the backbone network was dramatically reduced and user experience was also improved due to the edge routers providing services for the user quickly. Furthermore, implemented a prototype system is implemented to evaluate the scheme, and the results show great improvement over the state-of-the-art solutions.

Key words: streaming media; caching; router; reconfiguration network

1 引言

流媒体业务依靠互联网的高速发展给自身提供了强大的市场动力, 流媒体业务正变得日益流行。然而网络流媒体爆炸式的发展给传统互联网带来巨大的压力, 视频服务耗费了大量的带宽。目前视频下载已经成为占用公众互联网带宽资源的主

要业务之一, 但是网络运营商从中获益不多, 他们不可能不计成本地扩展公众互联网的带宽, 因此网络带宽也制约着网络视频的发展。

事实上, 多年来网络一直沿着面向业务支撑的技术体系发展。为了满足特性差异日益扩大的用户业务承载需求以及大量差异化业务的规模化应用, 面向服务提供的新型网络技术体系也就是可重构网络^[1,2]开

收稿日期: 2011-09-29; 修回日期: 2012-01-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2009AA01A348); 国家自然科学基金资助项目(61171074); 国家科技重大专项基金资助项目(2010ZX03003-003-03); 教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(NCET-11-0113)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2009AA01A348) The National Nature Science Foundation of China (61171074), The National Key S&T Project (2010ZX03003-003-03); Supported by Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-11-0113)

始被越来越多的人关注。路由器作为关键网络设备，已经不能单纯的追求提高设备性能，而是需要同步研究提高性能和扩展功能，这是实现多网融合、业务融合的迫切需要。基于可重构网络的思想，刘强^[9]等人提出了面向服务提供的可重构路由器。而为了缓解流媒体高带宽、低延迟的要求，本文提出一种新颖的基于可重构路由器上缓存的流媒体协作分发策略，该策略利用边缘路由器的计算和存储资源对热点视频对象进行缓存与合作分发，从而减轻骨干网和服务器的负载，同时提高用户的观看体验。

现有2种最主要的流媒体分发加速方法分别为CDN(content delivery network)分布式缓存^[4,5]和P2P(peer-to-peer)客户端缓存^[6-8]。CDN分布式缓存方法通过在网络边缘部署大量服务器来提高系统的服务能力，然而部署大量服务器花费的代价很大，因此可扩展性受到限制；P2P缓存技术充分利用客户端的资源协同合作来减轻服务器的负载，但它给ISP带来巨大的负担。CDN和P2P技术分别从服务器和客户端的角度来加速流媒体的分发，而被忽略的路由器如今性能与功能也越来越强大，不仅仅满足于传统的存储转发，而是开始支持高层的业务处理。Cisco集成服务路由器上的应用扩展平台(AXP, application extension platform)就提供了接口来实现分组分析、事件通知、网络管理等托管应用程序。另外路由器上配备的内存容量也越来越大。

国内外学者对利用网络中间设备来改善网络性能的方法也有一定的研究。HUA K等^[8]提出一种缓存多播协议(CMP)，CMP利用路由器的磁盘空间提供一小段滑动窗口的视频缓存来为接下来一段时间内到达的同一视频请求直接提供服务，从而减轻服务器的负载。CMP主要用于直播系统中的多播技术，在视频点播中的使用效率不高。文献[9]中描述了本文的前期工作，仅仅提出使用路由器缓存为流媒体分发服务的思想；本文中路由器加速流媒体分发的策略进行了延伸和具体阐述，从单个路由器扩展到多个路由器合作的方式，并且提出了路由器上适合流媒体应用的缓存算法以及多个路由器合作下的数据调度策略，最后还实现一个真实的原型系统，通过实验证明文中提出策略的有效性。

本文第2节介绍基于可重构路由器上缓存的流媒体协作分发策略；第3节对关键算法以及调度策略进行研究；第4节给出原型系统测试结果并且进行性能评价；最后对本文的内容进行归纳并对未来

的工作进行展望。

2 基于路由器缓存的流媒体协作分发

2.1 缓存架构

传统CDN网络用于流媒体分发主要通过CDN服务器集群缓存热门视频以满足大量的用户请求。不管怎样，部署服务器集群的代价实在太高。而在基于路由器的流媒体缓存新架构中，本文增加一层路由器缓存。如图1所示，CDN服务器和客户端之间的多个路由器形成不同的本地缓存组，在CDN服务器覆盖下处于同一个自治域(AS)内的路由器会被划分在同一个本地缓存组中。路由器缓存层会对本地热门的视频数据进行缓存，这样局部大量访问都集中在路由器缓存的热门视频上，从而数据在骨干网的传输量得到减少并且服务器的负载也得到减轻。当然不是所有路由器都参与流媒体的协作分发，只有那些处在网络边缘的路由器才可能被选中。一方面是因为核心路由器需要处理多处汇聚过来的大量数据分组，没有剩余的存储以及计算能力去处理额外的应用。而边缘路由器的性能尽管比不上核心路由器，但是边缘路由器承受的存储转发压力会小很多，它拥有空闲的资源来存储和分发流媒体数据。而且本文主要的目标之一是减轻骨干网络的负载，如果在核心路由器上进行存储，当多个核心路由器协作分发的时候不可避免地会造成数据在骨干网络中的大量传输，这与本文的优化目标是背道而驰的。另一方面，核心路由器一般与用户有一定的距离，而边缘路由器离用户最近，只有一跳或者两跳的距离，因此在这些距离用户最近的边缘路由器上存储分发流媒体，可以极大地降低用户响应延迟以及数据传输延迟，从而提高用户体验。

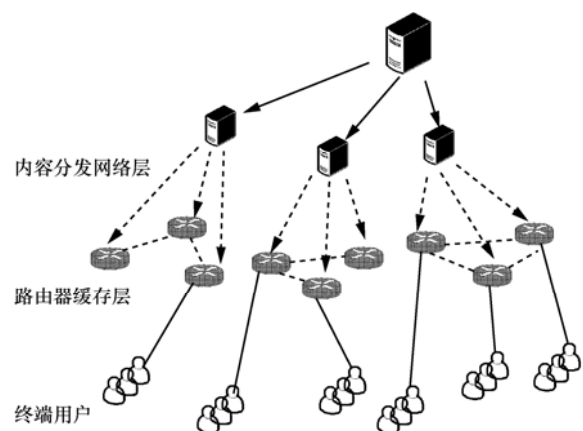


图1 基于路由器的流媒体缓存架构

2.2 分发方法

在传统 CDN 分发方法中，用户请求会被重定向到 CDN 服务器，然后由该 CDN 服务器提供服务，如图 2(a)所示。而在基于路由器缓存的协作分发策略中，缓存路由器距离用户更近并且路由器之间不需要重定向。如图 2(b)所示，用户请求会被距离该客户端最近的边缘路由器截取，该边缘路由器称为此客户端的家路由器。家路由器截取用户请求后，在缓存中查找用户请求的视频段，同时家路由器会向同一个本地缓存组中的合作路由器发送资源查询命令，合作路由器接收到资源查询命令后，会在自己的缓存列表中查找该视频段的数据；随后合作路由器会将查询结果反馈给家路由器，同时向客户端推送缓存命中的数据。对于家路由器来说，它不仅需要向客户

端推送数据，还需要收集合作路由器的反馈信息，根据这些反馈信息以及自身的存储情况做出判断，以决定是否需要向 CDN 服务器请求额外的数据。如果整个本地缓存组中缓存的数据足以还原客户端所需的视频数据，则家路由器不会向 CDN 服务器请求额外的数据；如果整个本地缓存组中缓存的数据不足以还原出客户端请求的视频数据，则家路由器会将请求转发到 CDN 管理中心，此时就像是家路由器代替客户端向服务器发起了一个请求，以后的过程和一个普通客户端请求服务没有区别，首先该请求会被转发到 CDN 管理中心，然后由 CDN 管理中心把该请求重定向到某个最合适的 CDN 服务器，最后由该 CDN 服务器协助视频段的数据分发。与传统 CDN 分发不同的是，家路由器会根据自身的缓存策略对 CDN 服务器分发的数据进行缓存，以便对该视频段的同一请求提供服务。在 CDN 服务器和客户端之间增加路由器缓存并且采用合适的缓存算法对热门视频数据进行缓存后，根据 80/20 原则（即 80% 的用户访问都集中于 20% 的热门视频），大部分的用户访问都不需要重定向到 CDN 服务器，而是直接由本地的缓存路由器组来提供服务，这极大地提高了用户体验。

在统计本地缓存组中所有缓存路由器上的数据时，家路由器只需要统计属于该视频段的块数是否足够，而不用考虑从哪个路由器节点获取不同的数据，这主要得益于网络编码^[10]的引入。通过对原始视频数据进行网络编码得到不同的数据块，这些不同的数据块内容不相同，但是它们存储的信息量是相当的而且地位是同等重要的。换言之，只需要足够数量的任意块编码过的数据即可还原出原始视频段，而不必关心具体是哪些数据块。因此家路由器仅仅需要统计块数是否足够，而缓存路由器也只要向客户端不断推送该视频段的数据块直到客户端不再需要数据向路由器发送刹车消息为止，这样的策略大大简化路由器上的处理以及数据的调度，关于如何对原始视频段的数据进行网络编码将会在下一节详细介绍。

3 关键算法与调度策略研究

为了能够实现路由器参与流媒体的分发，本文设计了路由器邻居节点选择算法，路由器上的分组处理算法，并且研究讨论路由器上合适的缓存替换算法来提高路由器缓存的利用率以及网络编码简化

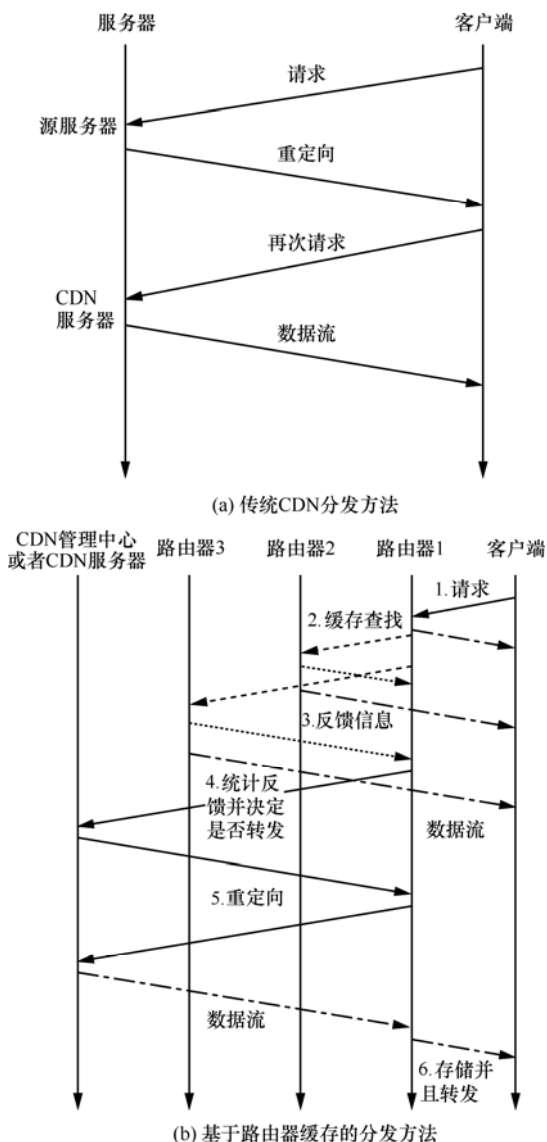


图 2 传统 CDN 分发与基于路由器的分发

数据调度的方法。

3.1 邻居节点选择算法

为了提高缓存路由器之间协作的性能，只有处在同一个本地缓存组中即同一个 AS 域内的路由器才会相互协作共同为用户提供服务，而不是任意的缓存路由器之间都可以互相合作。如何为路由器选择合适的邻居节点将直接影响路由器之间缓存协作的性能。

一般情况下，同一个自治域内 2 个节点之间的传输延迟相对比较小，因此可以快速查询到所需的视频资源，然后为用户提供服务，从而降低用户的响应时间以及数据的平均传输时间。缓存路由器是根据其所在自治域的 ASN（自治域号）来获得邻居节点列表的。当缓存路由器加入一个流媒体分发组中时，它首先向服务器进行注册。在注册过程中该路由器拥有的 ASN 会被记录在服务器上，而服务器会将已经在该服务器上登记过拥有相同 ASN 的路由器节点作为邻居节点告知新加入的缓存路由器，同时更新原有组中所有路由器的邻居列表。由于路由器一般不会宕机也不会频繁加入退出，因此不同的本地缓存组一旦形成以后就很少会发生变化。

3.2 路由器上分组处理算法

缓存路由器除了正常的存储转发功能之外，还需要处理的额外数据分组可以划分为如表 1 所示的几种类型。

表 1 路由器上处理的数据分组类型

数据分组名称	数据分组描述
REQ	客户端的请求分组
SEEK	家路由器发送的资源查询分组
FEEDBACK	合作路由器向家路由器发送的反馈信息数据分组
NREQ	路由器向服务器转发请求分组
BRAKING	客户端收足编码块后发送的刹车信息分组
UPDATE	更新邻居节点列表的信息分组
DATA	视频数据分组
QUIT	路由器退出系统标识分组

根据表 1 中数据分组的不同类型，缓存路由器只需要在接收到分组后做出相应的处理即可。比如路由器接收到 BRAKING 类型的数据分组后就停止向该客户端推送缓存的数据。路由器上的分组处理如图 3 所示。其中，PT 表示数据分组的类型，Q 表示数据分组队列，N 表示本地缓存组中存储的当前

请求视频的总块数，Threshold 表示能够还原出原始数据最少需要的编码块数。该算法实现后作为一个托管应用程序嵌入到每个缓存路由器中，因此路由器能够轻松完成流媒体的分发。

```

repeat
get packet from Q and obtain PT from the packet
if(PT == REQ || PT == SEEK) then
    cache search and send hit blocks
    if (PT == SEEK) then
        send FEEDBACK to home router
    end if
else
    if (PT == FEEDBACK) then
        if (N < Threshold) then
            send NREQ to server
        end if
    else
        if (PT == BRAKING) then
            stop sending DATA
        else
            if (PT == UPDATE) then
                update neighbor node list
            end if
        end if
    end if
end if
end if
    
```

图 3 路由器上分组处理算法

3.3 缓存替换算法

路由器上缓存是有限的，当缓存满的时候，就需要根据一定的规则对缓存内容进行替换。这里需要说明的是缓存路由器本身运行系统以及完成路由等功能与流媒体数据缓存是共享内存的。而路由器上引入流媒体缓存不能影响路由器原有功能的运行，因此，在本方案中仅仅使用路由器上剩余的缓存资源（之前已经提及目前的路由器存储容量可以很大，有能力完成除传统存储转发之外的一些功能），本文以后提到的缓存都指路由器上运行原有功能后剩余的缓存资源。

目前比较流行的流媒体缓存算法是基于流行度的流媒体段缓存算法^[1]，该算法通过分析视频流行度分布，按照流行度从高到低依次缓存，如图 4(a)的一级队列缓存所示。但是在缓存十分有限的情况

下, 仅仅存储最热门的几部视频并不能明显提高流媒体系统的整体性能; 而且据相关研究^[12]用户开始观看的一段时间内最容易离开, 因此存储视频开始部分的数据显得更有意义。将传统的一级队列改进为两级缓存队列, 分别为 hot 队列和 cold 队列, 如图 4(b)所示。hot 队列中存储流行度最高的完整视频数据并且 hot 队列中存储的视频都必须达到一个访问次数门限值, 只有访问次数达到该门限值的视频才能存储在 hot 队列中; 而 cold 队列中存储流行度次之的视频开始部分数据, 它们没有访问次数的限制, 目的是为了能够扩大路由器上存储的视频数范围, 从而降低用户的平均初始响应延迟。

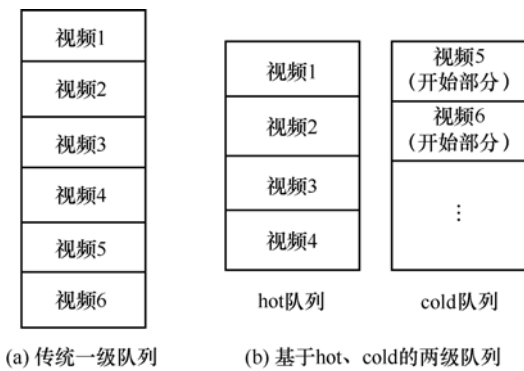


图 4 缓存算法改进

当路由器上接收到视频数据并且需要进行缓存时, 路由器首先会在 2 个队列中查找, 队列中存储的仅仅是缓存视频内容的索引, 而不是真正的数据。如果缓存命中, 判断该视频是在哪个队列中, 如果是在 hot 队列中, 则只需要将该视频访问次数

加 1 即可; 如果该视频在 cold 队列命中, 则需要判断该视频的访问次数是否达到 hot 队列的访问次数门限值, 如果访问次数达到该门限值, 则用该视频替换 hot 队列中效率值 P 最低的视频, hot 队列中被替换的视频并不会丢弃而是会被替换到 cold 队列中。其中, $P = \text{访问次数} / \text{最久未被访问时间}$, P 值越高, 视频越不可能被替换。如果访问次数未达到门限值, 则该视频仅仅存储在 cold 队列中并且只存储开始的部分数据。如果缓存没有命中, 则按照 hot 到 cold 的顺序查询空位置进行插入操作, 如果 2 个队列都已满则替换 cold 队列中最久未被访问的视频。该缓存算法结合了传统基于流行度的缓存方法与用户观看行为的特点, 能够很好地提升整个访问群体的用户体验。

3.4 调度算法

在流媒体数据调度中, 网络编码被用于简化调度。网络编码是一种融合了路由和编码的信息交换技术, 它是 R.Ahlsvede^[10]等人在 2000 年提出的理论, 它的核心思想是在网络中各个节点上对多条信道上收到的信息进行线性或者非线性的处理, 将多个数据分组做编码“融合”在一起, 然后转发给下游节点, 这样就能够提升整个网络的吞吐率。本文的调度策略中引入随机线性网络编码^[13,14]后, 所有编码以后的数据块将被一视同仁地对待, 这样可以简单地实现基于 push^[15]策略的路由器协作传输, 从而提升数据传输的效率; 同时, 网络编码可以降低路由器协作的调度复杂度。引入网络编码后的数据调度如图 5 所示, 首先在服务器上将视频段进行分

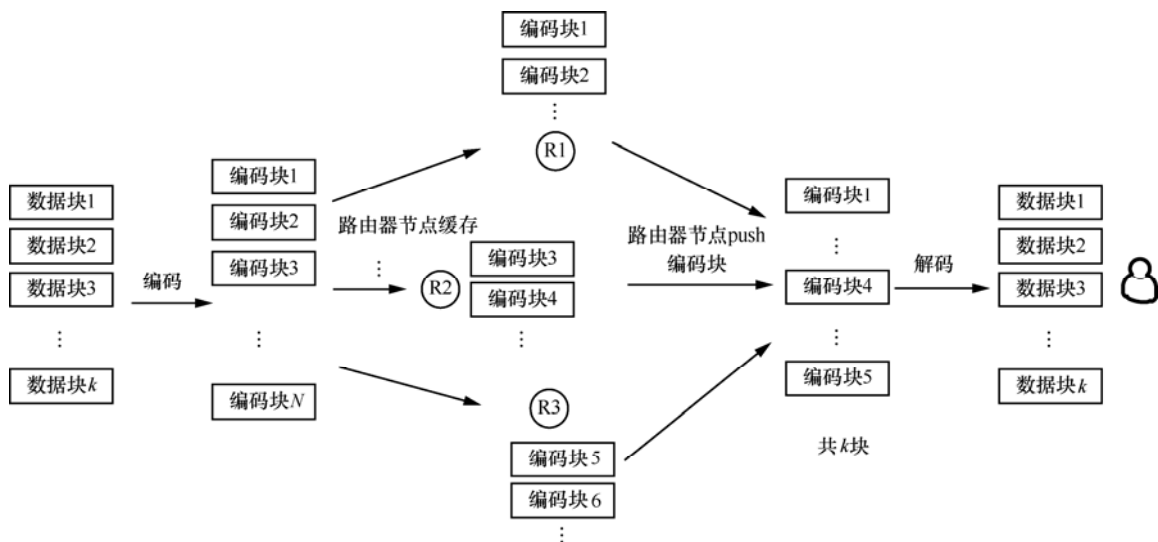


图 5 网络编码简化数据调度方法

块，假设每个视频段分为 k 个数据块，然后在有限域上随机选取 N 个线性无关的编码向量（通常 $N > k$ ），将 N 个编码向量与 k 个数据块通过有限域上的乘法得到 N 个新的编码块，然后这些编码块在第一次经过缓存路由器时会被缓存下来。当有用户再次请求该视频段的数据时，这些缓存路由器会直接向用户 push 属于该视频段的编码块，而用户只要收足任意 k 个编码块就可以解码恢复出原始的 k 个数据块。

引入网络编码后，不同缓存路由器上存储的数据本质上都是相同的，而客户端只需要得到足够的编码块数就可以还原出原始的视频数据，因此缓存路由器在向客户端提供数据的时候只需要简单地客户端 push 属于该视频段的编码块即可，从而简化了路由器协作时的数据调度，降低了系统实现的复杂度。

4 性能评价

4.1 实验环境初始化

为了评价基于路由器上缓存的流媒体协作分发策略的性能，本文实现了一个原型系统。在该原型系统中，路由器上缓存算法、分组处理等关键算法得以实现。另外，网络编码也被引入来简化系统的复杂度。实验环境为 1 台源服务器和 1 台 CDN 服务器、3 台缓存路由器以及若干台 PC 客户端组成的原型系统。实验的初始化设置及部分参数如表 2 所示，实验中共有 20 套视频节目，这些视频的热门度分布服从 $\theta=0.27$ 的 Zipf 分布。原型系统中使用的路由器内存大小为 8GB，而边缘路由器的内存大小一般都不超过 4GB，因此，在实验中使用 3GB 的内存容量用于缓存视频数据是可行的，即在保证不影响路由器处理传统业务的基础上使用剩余的内存来缓存视频数据。实际上，除了使用内存来缓存视频数据，路由器上也可以连接外部的大容量存储器来扩展整个存储空间，不过必然会带来一定量的延迟。参数缓存比例 R 表示所有缓存路由器上的缓存大小之和占服务器上所有视频内容总和的比例（本实验中 3 个路由器上缓存总和占服务器上所有视频总和的比例即为缓存比例 R ）。实验中 R 从 0 变化到 0.5，意味着每个路由器用于缓存视频数据的内存容量从 0 增加到 3GB，因为路由器之间是相互合作缓存的，所以整个本地缓存组的缓存大小将从 0 增

加到 9GB。其中， $R=0$ 表示没有引入路由器缓存策略，为传统普通 CDN 分发策略。

表 2 实验参数

参数	参数名称值
视频热门度分布	Zipf 分布 ($\theta=0.27$)
用户到达分布	Poisson 分布
用户数	$N:100 \sim 500$
缓存比例	$R:0.1 \sim 0.5$

4.2 实验结果分析

4.2.1 服务器带宽

图 6 描述了路由器上的缓存大小对服务器带宽的影响，实际上该服务器可以是内容提供商的内容服务器也可以是 CDN 服务器，本文方案中的路由器位于网络的边缘，因此不管是内容提供商自己的服务器还是 CDN 服务器都可以使用边缘路由器对其减负。图 6 中，随着缓存比例 R 的增大（本地缓存组缓存从 0 到缓存 50%），很显然服务器带宽消耗呈现下降的趋势。但并不是缓存越大越好，一方面路由器上的缓存空间有限，另一方面随着缓存的增加，服务器带宽消耗会趋向于一个稳定的值，因为即使全部视频都存储在路由器上，服务器还是需要消耗一定的带宽来处理客户端的连接、路由器的流量统计、数据重传等事务。从图 6 中用户数 $N=500$ 的曲线可以看出，当缓存比例 R 达到 0.3 的时候，服务器带宽消耗 (60Mbit/s) 比不使用路由器缓存的传统 CDN 分发方案（服务器带宽消耗 240Mbit/s）减少 75% 左右，因此没有必要无限增加缓存的大小，只需要缓存 30% 左右的数据即可。图 6 中 3 条曲线分别描述了不同并发用户数的情况下缓存大小

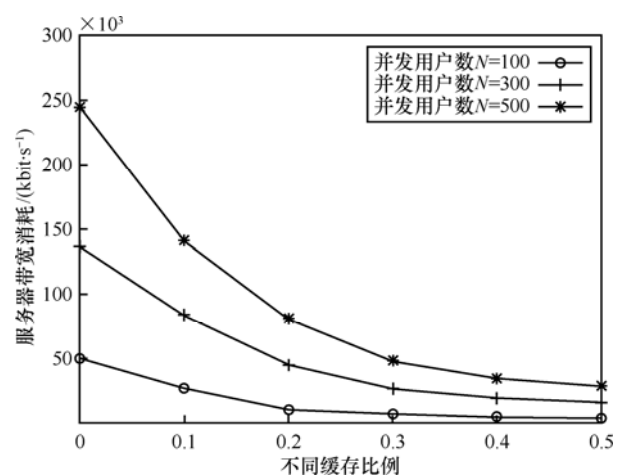


图 6 缓存大小对服务器带宽消耗的影响

对服务器带宽消耗的影响。很明显可以看到，当用户数从 100 增加到 500 的过程中，在没有路由器缓存即采用传统 CDN 分发方案的情况下，服务器带宽消耗增加接近 200Mbit/s；而在缓存比例 R 仅为 0.1 的情况下，服务器带宽消耗只增加了 115Mbit/s 左右，比传统方案增加的带宽消耗要少的多。因此基于路由器上缓存的流媒体协作分发策略对流媒体系统的可扩展性有非常大的帮助，而且有利于开展大规模流媒体的分发服务。

4.2.2 平均初始响应时间

初始响应延迟是用户体验的一个重要指标之一。初始响应延迟为用户点击视频请求到用户可以观看该视频的一段缓冲时间。实验中设置缓冲 60s 的视频数据。图 7 分别描述了缓存大小和缓存策略对平均初始响应延迟的影响。如图 7(a)所示，随着并发用户从 100 增加到 300 再到 500，在有路由器缓存策略的情况下，平均初始响应延迟都降低了至少 50%，用户体验得到很大的提升。另外随着并发用户数的增加，在没有路由器缓存的传统 CDN 分发策略下，平均初始响应时间增加的非常快，从 22s

增加到超过 50s，增幅达到 100% 以上；而在有路由器缓存的情况，平均初始响应延迟增加的速度显然要慢的多。因此，引入路由器缓存将会极大地提升用户体验，一方面得益于缓存路由器都位于网络的边缘，距离用户非常近，在用户请求后可以快速地向用户提供服务；另一方面路由器上使用的是内存而且存储的是编码以后的数据块，不像服务器需要从磁盘中读出原始数据并且进行编码。

图 7(b)描述了改进后的缓存算法对平均初始响应延迟的影响。当缓存策略从一级队列改进为 hot-cold 两级队列缓存后，平均初始响应延迟得到很大的改善，原因在于 hot-cold 两级队列缓存策略合理地运用了路由器上的有限缓存空间。通过 cold 队列对次流行视频开始部分的数据进行缓存，扩展了视频存储的范围，增加了路由器上有限缓存服务的用户数。

4.2.3 平均数据传输时间

数据传输延迟为数据从服务器(这里的服务器可能是缓存路由器，而客户端是不知道的，路由器提供的是透明服务)传输到客户端所用的时间。图 8(a)描述了不同并发用户数下路由器上的缓存大小对平均数据传输延迟的影响。整体上来看，随着并发用户数的增加，在无路由器缓存的传统 CDN 分发策略下($R=0.0$)，平均数据传输延迟在用户数从 300 到 500 的时候有一个明显的增加，说明用户数达到 500 的时候服务器和客户端之间的链路存在一定的拥堵，导致数据传输时间的增加；而在有缓存的情况下($R=0.1$ 或 $R=0.2$)，平均数据传输延迟都没有出现明显的增加，说明引入路由器缓存后，整个系统的性能以及服务能力均得到了提升。当并发用户数相同的时候，可以明显看出有缓存比没有缓存的情况平均数据传输延迟降低了至少 50%，主要原因在于缓存路由器距离用户比服务器更近，数据在本地缓存组中的路由器上缓存后，可以很快地分发给用户而不需要较远的服务器来分发。

图 8(b)描述了不同缓存策略对平均数据传输延迟的影响。与一级队列缓存策略相比，尽管两级队列缓存策略中 cold 队列存储了一些次热门视频的开始部分数据，而不是最热门视频数据，但是平均数据传输延迟并没有太多的变化，说明 hot-cold 两级队列缓存策略的引入不会带来平均数据传输延迟的增加。

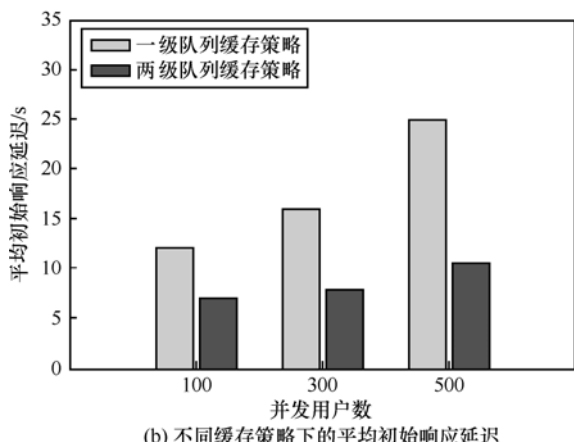
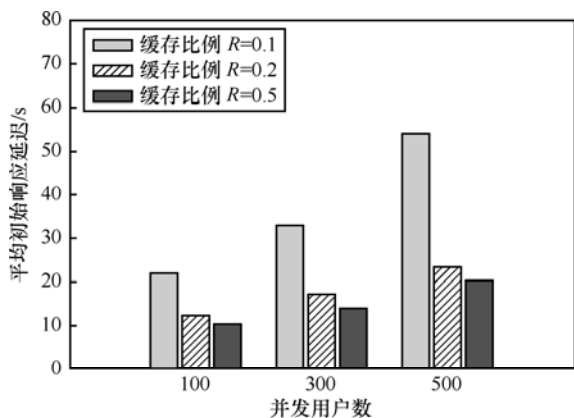
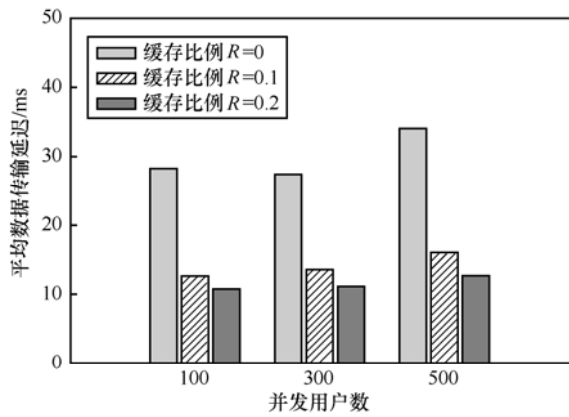
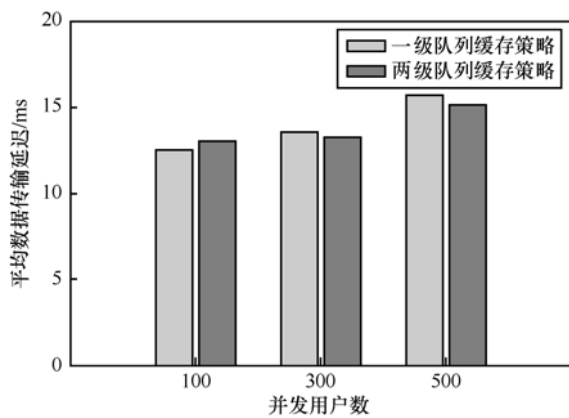


图 7 不同缓存大小以及策略下平均响应延迟的变化



(a) 缓存大小对平均数据传输延迟的影响



(b) 不同缓存策略下的平均数据传输延迟

图 8 不同缓存大小以及策略下平均数据传输延迟的变化

4.2.4 存储与计算开销

迄今为止，本文只关注路由器上缓存所带来的好处。不管怎样，引入路由器缓存来加速流媒体的分发必然会给路由器带来一定的开销，主要包括存储资源和计算资源的开销。存储资源消耗是显而易见的，而计算资源的消耗如图 9 所示。当并发用户数增加的时候，路由器上的 CPU 额外开销也随之增大，但增加的并不是很多，对于路由器来说 5%

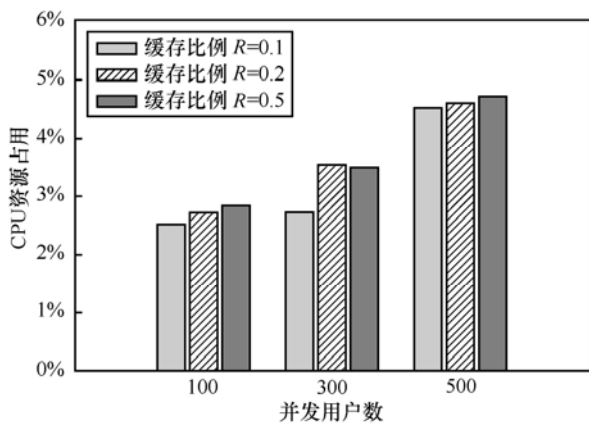


图 9 引入缓存后路由器上额外的计算开销

以下的额外 CPU 开销完全是可以接受的。当并发用户数相同时，路由器上缓存的增加并没有带来很多额外的 CPU 资源消耗。总的来说，利用路由器上缓存协作分发流媒体的策略并没有消耗路由器上太多的计算资源，完全在可接受范围之内，而且该策略还对路由器上的剩余存储资源进行了高效的利用。

5 结束语

本文提出了一种基于可重构路由器上缓存的流媒体协作分发策略，通过将边缘路由器组织成本地缓存组，本地缓存组中的路由器对热门视频数据进行主动缓存，在用户进行请求时可以直接提供服务。通过对原型系统的实验结果分析表明，边缘路由器上缓存的方法可以明显地减轻服务器负载，降低用户的平均初始响应时间和数据传输时间，可以极大地提升用户体验。该基于路由器上缓存的流媒体协作分发策略可以适用于大规模流媒体的分发，对于构建下一代网络有着积极的意义。

路由器上业务感知的方法以及对更多业务流的加速策略研究将是下一步工作的内容。通过对路由器上业务感知方法的深入研究来使得路由器可以支持更多的业务加速；另外虽然 P2P 给 ISP 带来巨大的流量负载，但是 P2P 技术对服务器带宽需求的降低做出了巨大的贡献，利用边缘路由器对 P2P 资源进行合理的整合以及优化，从而更好地改善网络环境将是下一步工作的另一个思路。

参考文献：

[1] 李鹏, 兰巨龙. 一种新型的可重构路由交换通用平台[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(6): 2016-2019.
 LI P, LAN J L. New reconfigurable general platform for routing/switching nodes[J]. Application Research of Computers, 2009, 26(6): 2016-2019.

[2] 李黎, 管晓宏, 蔡忠阔等. 可重构网络系统的模型及体系结构[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(4):637-641.
 LI L, GUANG X H, CAI Z M, et al Reconfigurable network model and architecture[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2009, 30(4):637-641.

[3] 刘强, 汪斌强, 徐格. 面向服务提供的可重构路由器[J]. 中国教育网络, 2010, (7):49-51.
 LIU Q, WANG B Q, XU K. Service-oriented reconfigurable routers[J].

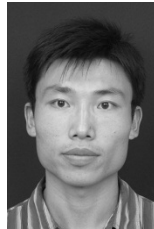
China Education Network, 2010, (7): 49-51.

- [4] BORST S, GUPTA V, A WALID. Distributed caching algorithms for content distribution networks[A]. INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE 2010[C]. 2010.
- [5] WEE S, APOSTOLOPOULOS J, TAN W, *et al.* Research and design of a mobile streaming media content delivery network[A]. IEEE International Multimedia Conference and Expo (ICME)[C]. Baltimore, MD, 2003.
- [6] HUANG Y, TOM F, *et al.* Challenges, design and analysis of a large-scale P2P-vod system[A]. Proceedings of the ACM SIGCOMM[C]. 2008.
- [7] YU H L, ZHENG D D, *et al.* Understanding user behavior in large-scale video-on-demand systems[A]. ACM SIGOPS Operating System Review[C]. 2006.
- [8] K. HUA, D. TRAN, R. VILLAFANE. Caching multicast protocol for on-demand video delivery[A]. Proceedings of S&T/SPIE Conference on Multimedia Computing and Networking (MMCN)[C]. Citeseer, 2000.
- [9] ZHONG J W, HE Z C, *et al.* Router caching for video streaming systems[A]. Proceedings of USENIX Conference on File and Storage Technologies[C]. 2010.
- [10] R. AHLISWEDE, CAI N, LI S Y. Network information flow[J]. IEEE Trans Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [11] WU K L, YU S P, WOLF J L. Segment-based proxy caching of multi media streams[A]. Proceedings of the 10th international conference on World Wide Web[C]. May 2001.
- [12] CHENG X, LIU J. NetTube: Exploring social networks for peer-to-peer short video sharing[A]. INFOCOM 2009[C]. 2009.
- [13] LI S Y, CAI N. Linear network coding[J]. IEEE Trans Information Theory, 2003, 49(2):371-381.
- [14] CHRISTOS G, PABLO R. Network coding for large scale content Distribution[A]. INFOCOM[C]. 2005.
- [15] SUH K, DIOT C, KIROSE J. Push-to-peer video-on-demand system design and evaluation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special on Advances in Peer-to-Peer Streaming Systems, 2007, 25(9):1706-1716.

作者简介:



何智聪 (1987-), 男, 江苏南通人, 复旦大学硕士生, 主要研究方向为宽带网络应用技术和下一代高可信网络。



谷光昭 (1988-), 男, 河北晋州人, 复旦大学硕士生, 主要研究方向为路由器和移动互联网。



王新 (1973-), 男, 陕西三原人, 复旦大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络服务质量。



赵进 (1979-), 男, 四川双流人, 博士, 复旦大学讲师, 主要研究方向为下一代网络和流媒体技术。



薛向阳 (1968-), 男, 江苏建湖人, 复旦大学教授、博士生导师, 主要研究方向为多媒体信息检索和网络流媒体技术。