

无线 Ad Hoc 网络 P2P 流媒体分发缓存算法^{*})

左冬红 杜旭 杨宗凯

(华中科技大学电信系 武汉 430074)

摘要 无线 Ad Hoc 网络由于其传输时延较长,网络拓扑动态变化以及高丢包率,给流媒体在无线网络中的分发带来了挑战。但随着移动通信终端设备存储能力的提高,在无线 Ad Hoc 网络中进行 P2P 的流媒体分发服务成为可能。本文提出一种最小化网络总体有效传输代价的 P2P 流媒体分发启发式缓存算法,它是在网络总体缓存资源有限的条件下,综合考虑流媒体片段内部流行度、无线节点可靠性,以及片段实际缓存密度与期望缓存密度之差等因素,以减少流媒体分发总体传输代价为目标的启发式缓存算法,此算法能很好地减少流媒体分发启动时延,有效地减少流媒体分发给在无线 Ad Hoc 网络中的传输代价。

关键词 对等,流媒体,缓存算法,传输代价,自组织

The Replication Strategy for P2P Media Streaming Delivery in Wireless Ad Hoc Networks

ZUO Dong-Hong DU Xu YANG Zong-Kai

(Dept. of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract In wireless Ad Hoc networks, due to the long transmission time, dynamic network connectivity, and potentially high loss rate, media streaming delivery in such networks is challenging. But with the memory increase of mobile terminal, media streaming delivery in a Peer to Peer fashion is possible in wireless Ad Hoc networks. The heuristic cache algorithm aimed to minimal the total effective network transmission cost is proposed for peer to peer media streaming delivery in wireless Ad Hoc networks, it considers the media internal segment's popularity, the reliability of wireless hosts, and the difference of segment's reality cache dense and expected cache dense. It can effectively reduce the start-up delay and the total transmission cost of media streaming delivering in wireless Ad Hoc networks.

Keywords Peer to Peer, Media streaming, Cache strategy, Transmission cost, Ad Hoc

1 前言

近年来手持式无线终端设备的数据处理能力、存储空间以及无线链路带宽都得到较大提高,使得利用移动终端资源进行 P2P 的流媒体分发服务成为可能。无线 Ad Hoc 网络 P2P 流媒体分发除了能大幅缓解服务器的负载、下行链路紧张的问题,最重要的是可以缩短用户请求时延,降低无线链路不稳定性对连续媒体访问的影响,提高流媒体服务的 QoS。

无线网络中,单个移动节点具有资源有限、节点移动性强和自主管理等特征,使得单个节点只能对影片的部分片段提供不可靠的缓存服务,因此必须依靠多个节点,汇聚零散的、有限的、不稳定的个体资源,利用分散存储,互为备份的策略,来共同保证缓存影片内容的可靠性和连续性播放要求。提高缓存影片内容的可靠性需要对相同的影片片段在不同节点上作重复的存储,而提高播放内容的连续性则需要有限的节点上提供尽可能多的不同缓存片段。在有限的资源空间下,这两个指标是一对矛盾。而用户访问 VOD 流媒体通常从头开始,由于各种原因可能中途退出,因此流媒体片段其流行度具有一定的规律:离起点越近的片段被访问的概率越大,并且已有文献指出其服从 Zipf 分布^[1]。本文将在无线 Ad Hoc 网络整体缓存资源有限,单一节点资源可靠性一定的约束条件下,结合流媒体片段内部流行度提出一种使得无线 Ad Hoc 网络流媒体分发整体传输代价最小的分布式 P2P 流媒体分发缓存算法。

本文在第 2 节中首先介绍相关研究工作,第 3 节分析在一定存储资源条件下,最小化网络传输代价的分布式 P2P 流媒体分发缓存模型,第 4 节提出一种实现此 P2P 流媒体分发

缓存模型的启发式算法,第 5 节通过仿真实验分析此算法的性能,最后指出该算法的创新之处。

2 相关研究工作

如何利用无线网络中的分布式资源一直是国内外比较活跃的研究领域。早期基于移动节点的无线网络分布缓存的研究主要是针对一般数据,研究如何提高用户请求命中率、减少响应时延。然而流媒体数据与一般数据相比,在时延约束、资源需求、访问特征、连续性等方面存在很大的差异。首先,流媒体数据量大,单个节点资源有限很难全部缓存下来;其次,传输时延要求严格;第三,抖动时延要求非常严格。

Internet P2P 模式流媒体分发是近年来研究较多的一个领域,并且已经得到实际应用,如 PPLive^[2],TVAnts^[3],GridCast^[4]等流媒体直播或点播系统就是采用 P2P 技术的流媒体分发系统。随着无线网络终端存储能力和带宽的提高,人们开始研究基于 P2P 模式的无线网络流媒体分发。然而对于传统的无线网络所有终端设备必须通过基站等中心接入点才能进行通信,并不适宜于 P2P 模式通信,因此 P2P 模式流媒体分发只适宜于具有对等网络结构的无线 Ad Hoc 网或 mesh 网络。无线网络考虑到无线终端设备缓存空间的有限性,其 P2P 的流媒体分发通常采取分段缓存和分段获取的方式,无线终端利用多元多径的方式获取流媒体服务。由于流媒体具有顺序播放的特性,离媒体文件起点越近的片段,传输时延要求越短。在网络负载均衡的情况下,无线网络中各跳传输时延可以认为是相同的,从而无线网络中的传输时延通常以跳数计算。无线网络基于 P2P 的流媒体分发缓存算法主要研究如何采取有效地缓存策略减少流媒体各片段在网络

^{*})基金项目:湖北省自然科学基金(2005ABA264)。左冬红 博士研究生,讲师;杜旭 博士,副教授;杨宗凯 博士,教授,博士生导师。

中的传输时延^[5,6]。目前这些算法并没有考虑无线网络节点缓存资源的有限性,节点资源的可靠性以及流媒体片段的流行度特性。如文[5]假定无线网络存储资源充足,根据网络拓扑计算各流媒体片段在达到最低传输时延要求下,所有流媒体内容在网络中所需要的缓存密度,因此只适应于缓存资源充足的无线家庭网络。而文[6]仅从自身获取流媒体片段的情况来决定缓存的内容,没有考虑流媒体内容的流行度,不能有效地利用有限的缓存资源使得网络整体传输代价最小。

文[7]提出了一种在网络整体缓存资源有限的条件下,使得流媒体分发整体传输距离最小的启发算法,此算法应用在 Internet 基于分组的流媒体分发系统上,它通过组内成员对媒体内容的多个备份来保证此媒体内容的备份在组内的可靠性。由于是 Internet 网络,同组节点之间通常传输时延很少,因此可以忽略组内不同成员提供的媒体备份传输时延的差别,而在无线 Ad Hoc 网络中不能忽略此差别,因此它并不适应于无线 Ad Hoc 网络。文[8]则提出了一种网络整体缓存资源有限且节点在一定失效概率下的流媒体片段传输失败次数最小化的启发算法,由于是应用在 Intranet 上,因此没有考虑传输距离对流媒体分发的影响。这两种算法虽然都是在网络整体缓存资源有限的约束条件下,讨论如何提高流媒体分发的效率(传输代价或成功概率),并且都考虑了媒体内容具有不同的流行度分布,但是它们都是基于有线网络,可以忽略组内或 Intranet 内不同距离节点之间传输时延的差别,而无线网络不能忽略此差别,因此不适应于无线 Ad Hoc 网络。

由此我们提出一种在无线 Ad Hoc 网络中整体缓存资源有限,单一节点资源可靠性一定的约束条件下,使得无线 Ad Hoc 网络流媒体分发整体传输代价最小的启发式算法——最小化网络总体有效传输距离的 P2P 流媒体分发缓存算法。

3 无线 Ad Hoc 网络 P2P 流媒体分发模型

3.1 无线 Ad Hoc 网络流媒体分发模型

无线 Ad Hoc 网络流媒体分发采用多元多径的方式:即流媒体文件被分为多个片段,请求节点获取流媒体文件的各个片段是从不同的源节点通过不同的路径依次获得的。假定一个流媒体文件被均匀地分成 N 个片段,网络中的节点根据一定的缓存策略缓存 1 个片段为请求该流媒体的节点提供服务。流媒体片段的获取过程分为两个阶段:查找阶段和传输阶段。查找阶段采用泛洪方式,即请求节点首先向其邻居节点发出请求,邻居节点再向下一跳节点转发请求,查找深度由请求节点设定的 TTL 值指定,请求每转发一次, TTL 值减 1。当 TTL=0 时,仍然没有找到可提供该片段的节点,请求节点则需增加 TTL 的值重新发出请求继续下一轮的查找。凡是收到请求且能提供服务的节点都向上一跳节点返回响应消息,请求节点最终将获得所有可能提供该媒体片段服务的节点列表,并且也可获得该媒体片段源节点与请求节点之间的距离(跳数)信息。流媒体传输阶段即请求节点根据查找阶段获得的源节点列表信息向最近的源节点请求流媒体传输,以减少流媒体在无线网络中的传输时延。由于无线网络节点具有移动性强和自主管理等特征,以及无线网络信道共享,使得单个节点只能对影片的部分片段提供不可靠的缓存服务,因此在流媒体片段传输过程中,存在一定失效概率 q ,若失效则需要再次从提供该媒体内容的节点列表中重新选择一个最近的节点请求流媒体传输,若节点列表中的所有节点都失效,则重新查找能提供该媒体片段的节点,重复上述过程。

3.2 缓存优化模型

首先我们假定无线 Ad Hoc 网络中总的缓存资源为 S ,流媒体片段 i 流行度为 p_i ,片段 i 在网络中总的缓存份数为

λ_i ,节点失效概率为 q 。理想情况下,网络中节点均匀分布于面积为 πl^2 的平面中,则片段 i 在网络中的平均缓存密度为 $\frac{\lambda_i}{\pi l^2}$ 。假定节点之间一跳通信距离为 R ,若节点为片段 i 找到一个源节点至少需要经过的跳数为 $H_{i,\min}$,则 $H_{i,\min}$ 满足

$$(H_{i,\min}R)^2 \geq 1, \text{ 从而 } H_{i,\min} = \frac{1}{R} \lambda_i^{-\frac{1}{2}}. \text{ 若欲使得在 } H_{i,\min} \text{ 内流}$$

媒体传输失效概率小于某一概率 Q ,则应增加 $H_{i,\min}$ 使得在 $H_{i,\min}$ 跳内流媒体的备份数 n 满足 $q^n \leq Q$,即 $n \geq \frac{\log Q}{\log q}$,从而

$$H_{i,\min} = \frac{1}{R} \left(\frac{\log Q}{\log q} \right)^{\frac{1}{2}} \lambda_i^{-\frac{1}{2}}. \text{ 而缓存优化目标函数为最小化 } \sum_{i=1}^m$$

$$p_i H_{i,\min}, \text{ 即求使得 } \sum_{i=1}^m p_i \frac{1}{R} \left(\frac{\log Q}{\log q} \right)^{\frac{1}{2}} \lambda_i^{-\frac{1}{2}} \text{ 达到最小值的 } \lambda_i \text{ 的分}$$

布,其限制条件为 $\sum_{i=1}^m \lambda_i = S$ 且 $\sum_{i=1}^m p_i = 1$ 。由文[5]可知,此问题属于 K 中心问题,也是 NP 完全问题,因此只能通过启发式算法引导 λ_i 达到较优分布。采用 Lagrange 函数求解可得

$$\lambda_i = S \times \frac{p_i^{\frac{2}{3}}}{\sum_{i=1}^m p_i^{\frac{2}{3}}}, \text{ 因此}$$

$$H_{i,\min} = \left(\frac{\log Q}{\log q} \right)^{\frac{1}{2}} \times \sqrt{\frac{l^2}{R^2 S}} \times \sqrt{\sum_{i=1}^m p_i^{\frac{2}{3}}} \times p_i^{-\frac{1}{3}} \quad (1)$$

这里的 $H_{i,\min}$ 是理想网络分布状况获得的结果,实际网络中节点并不均匀分布,而且网络中参与 P2P 流媒体分发的节点数目 S 和分布范围 l 也不可能预先知道,因此我们只能把上式作为启发式算法的理论依据。

4 最小化网络传输代价流媒体分发启发式缓存算法

我们令(1)式中 $\frac{l^2}{R^2 S} = \frac{1}{\rho}$,即 $\rho = \frac{S}{l^2} R^2$ 表示平均一跳通信范围内参与 P2P 流媒体分发的节点个数。根据文[5]的实验结果 $\sqrt{\sum_{i=1}^m p_i^{\frac{2}{3}}}$ 的取值范围在 4.1 到 4.9 之间,因此可取 4.5。从而片段 i 在网络总体缓存资源有限,期望失效概率 Q 一定的情况下,节点获取片段 i 所能达到的最少跳数 $H_{i,\min}$ 与网络中片段 i 的流行度 p_i ,平均一跳通信范围内参与 P2P 流媒体分发节点个数 ρ ,以及节点失效概率 q 相关。由此(1)式可改写为

$$H_{i,\min} = 4.5 \times \left(\frac{\log Q}{\log q} \right)^{\frac{1}{2}} \times \rho^{-\frac{1}{2}} \times p_i^{-\frac{1}{3}} \quad (2)$$

由(2)式可知流行度越高的片段,平均传输跳距应越少;参与 P2P 流媒体分发的邻居节点越多,平均传输跳距应越少;节点失效概率越大,平均传输跳距应越少,这样才能有效减少流媒体分发的网络传输代价。

流媒体分发用户的群聚特性使得流媒体片段流行度,以及参与某一流媒体 P2P 分发的节点数目在时间和空间分布上呈现明显的汇聚现象,所以片段 i 的流行度 p_i 以及一跳通信范围内参与 P2P 流媒体分发的节点数目 ρ 都随着时间和空间的变化而变化。节点失效概率 q 也与无线网络中节点的密度和网络负载相关。因此(2)式中的参数不能通过全局统计信息来获取,只有利用节点各自统计的局部信息才能在资源有限情况下更好的提高流媒体分发的质量。本文中我们先研究片段流行度和平均一跳范围内参与 P2P 流媒体分发的节点个数的获取方法。而假定节点失效概率已知,其获取算法留待进一步研究。下面分别阐述局部片段流行度、平均一跳内参与 P2P 流媒体分发节点数目的获取算法以及基于此局

部统计信息的最小化网络总体有效传输代价的启发式算法。

4.1 参数获取算法

本算法中我们需要获得的参数为:片段流行度,平均一跳范围内参与 P2P 流媒体分发的节点个数。首先我们给出算法中各符号的定义:

$p_{i,1}$:一定时间内一跳范围内邻居节点请求流媒体片段 i 的流行度。

$p_{i,n}$:邻居节点所统计的片段 i 的当前流行度。

p_i :节点统计的流媒体片段 i 的流行度。

s_1 :一定时间内所接收到的一跳范围内邻居节点对流媒体片段总的请求次数。

r_i :一定时间内所接收到的一跳范围内邻居节点对流媒体片段 i 的请求次数。

ρ_n :邻居节点所统计的平均一跳范围内参与 P2P 流媒体分发的节点个数。

p_1 :一跳范围内参与 P2P 流媒体分发的节点个数。

ρ_i :节点统计的平均一跳范围内参与 P2P 流媒体分发的节点个数。

其中, $S_1 = \sum_{i=1}^N r_i$, $p_{i,1} = \frac{r_i}{S_1}$ 。我们定义片段流行度,平均一跳范围内参与 P2P 流媒体分发的节点个数的计算方法分别为式(3),(4)所示。其中 α 为加权因子。

$$p_i = \alpha p_{i,1} + (1-\alpha) \frac{\sum p_{i,n}}{S_1} \quad (3)$$

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1-\alpha) \frac{\sum \rho_n}{S_1} \quad (4)$$

根据以上定义可知:1)节点需要周期性统计 r_i 、 ρ_i ;2)节点需要周期性性与邻居节点交互 p_i 、 ρ ,同时把从邻居节点获得的信息分别计为 $p_{i,n}$ 、 ρ_n 。因此每个参与 P2P 流媒体分发的节点都统计一跳范围内一定时间(如播放一个媒体片段的时间)内曾经接收到的对流媒体片段 i 的请求数 r_i ,若请求经过多跳才到达该节点,则不参与计数。而一跳范围内参与该流媒体 P2P 分发的节点数目即为一定时间内收到的一跳范围内来自不同邻居节点的请求个数。那么根据前面的定义可以计算出 s_1 以及 $p_{i,1}$ 。由于节点之间需要交互各自统计的信息,而节点在请求流媒体的过程中将不断地向邻居发出对流媒体片段的请求,因此我们把节点间交互的信息 q 、 ρ 附带在本节点向邻居发出的流媒体片段的请求消息中,此交互信息在邻居节点转发流媒体片段的请求时去掉,从而避免了网络中大量的信息交互通信量,减少了网络信道拥塞概率。

4.2 缓存替换算法

当节点参与某一流媒体 P2P 模式分发时,节点按照 4.1 节中描述的方式定时统计本地信息 ρ 和 p_i 。我们采用主动缓存模式,其缓存算法的流程如下:

1. 采用泛洪方式查找某一流媒体片段 i ,从跳数最少的节点获取该流媒体片段,并记录此跳距 H_i 。

2. 如果节点自身有空闲缓存空间,则缓存片段 i ,且转入步骤 7。否则进入步骤 3。

3. 按照式(2)计算此流媒体片段期望的最小跳距 $H_{i,\min}$ 以及 $\Delta H_i = H_i - H_{i,\min}$ 。

4. 如果 $\Delta H_i > 0$,进入步骤 5,否则转入步骤 6。

5. 计算已缓存片段当前期望的最小跳距 $H_{j,\min}$,比较已缓存片段 $\Delta H_j \times p_j$ 和当前片段 $\Delta H_i \times p_i$ 的值,若已缓存的片段中存在片段 j 的 $\Delta H_j \times p_j$ 比当前获取的片段的 $\Delta H_i \times p_i$ 小,则缓存当前片段 i 替换已缓存片段中 $\Delta H_j \times p_j$ 值最小的片段 j ,否则不替换任何缓存内容。转入步骤 7。

6. 若缓存的片段中存在 $\Delta H_i < 0$ 的片段,则比较这些片段与当前获取的片段的跳距,若存在片段 j 的跳距 H_j 小于当前获取的片段的跳距 H_i ,则缓存当前片段 i 替换已缓存片段中 H_j 最小的片段 j ,否则不替换任何缓存内容。

7. 结束。

5 仿真实验及性能分析

我们采用仿真不同网络规模的无线 Ad Hoc 网络来比较采取最小化网络总体有效传输距离的启发式缓存算法与文[6]中自适应按需缓存算法(Adaptive on-demand replication)在流媒体分发过程中的启动时延以及网络总体传输代价方面的性能。流媒体分发的启动时延以及网络总体传输代价以流媒体片段在无线网络中的传输跳数作为衡量指标。仿真环境设置如下:流媒体文件分为 20 个等长的片段,仿真开始时各片段随机的在网络中的某一个节点上缓存一份。各节点从流媒体文件的起点开始访问流媒体,访问流媒体文件的长度服从 zipf 分布。节点参与 P2P 流媒体分发的到达率服从泊松分布。启发式算法中加权因子 α 取值为 0.2。我们采用 NS2 作为仿真工具,分别仿真 80,120,160,200,240,280,320 个节点参与 P2P 流媒体分发的性能。

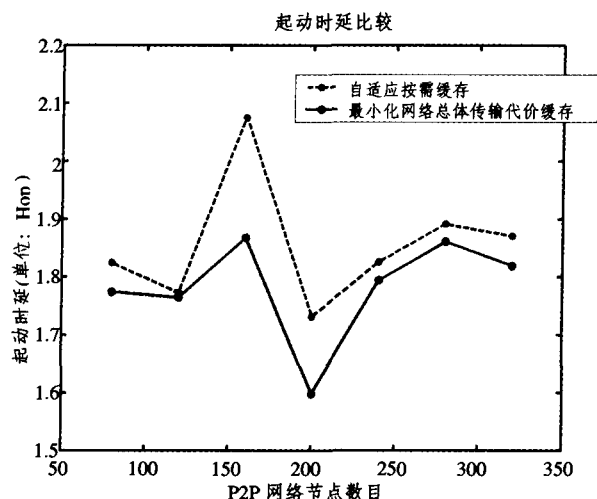


图1 两种不同缓存算法在不同网络规模下产生的启动时延比较

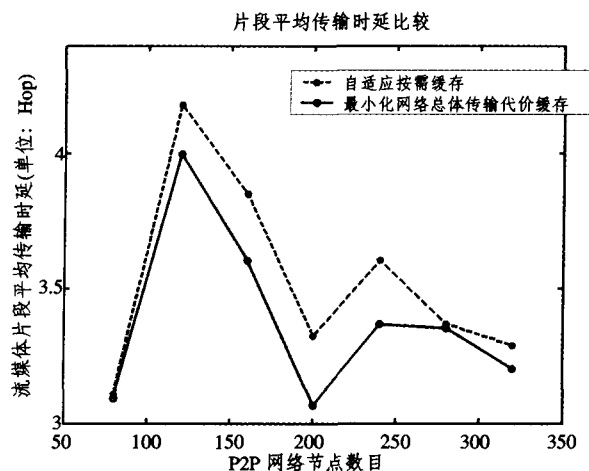


图2 两种不同缓存算法在不同网络规模下片段平均传输代价比较

4 Web QoS 技术的应用

Web QoS 属于应用层的 QoS,它量度的是用户在与 Web 站点进行交互时所感受到的服务性能。因为网络基础设施的差异,影响 Web QoS 的因数很多,特别明显的是下载时间、交易时间(如银行结算、股票交易、网上购物等)、服务器的可用性、遇到的错误(如失败的连接、丢失的页面或组件、中断的链路、交易失败)等等^[6]。从我校的数字化校园建设中,通过对 Web 日志分析和学校师生的流动特性,我们从 2 个方面提出了提升 Web QoS 的实践方案,如图 3。

其一是区分服务对象的机制和策略。依托电信运营商的网络,校园网学校通过北电网络 Contivity 5000 VPN 设备建立一套 VPN(Virtual Private NetWork)虚拟专用网络。通过建立一个穿过公用网络的安全、稳定的隧道来实现临时的、安全的快速点对点接入园区局域网,从而提高网络的传输质量和可靠性,降低网络时延和丢包率,从而为校外住户、分校用户、出差远程办公用户、远程工作者以及新用户(客户、供应商和合作伙伴)提供一种直接、快速访问园区局域网 Web 服务的目的。

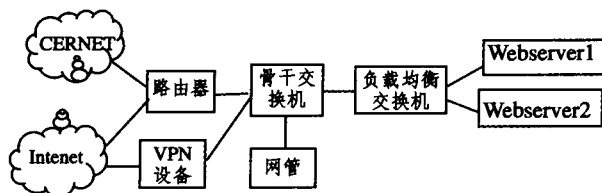


图 3 具有 VPN 和负载均衡功能的 Web QoS 示意图

其二是针对 Web 服务系统架构的设计机制和策略。就是在校园网教育数据center里通过复制服务器内容技术建立

Web 服务器集群来增强本地处理能力,同时通过北电网络 Alteon Web SWItch 184 提供 Web 服务器负载均衡服务、QoS、内容加速等,实现了负载分担和带宽管理的功能,另外,Web 服务器集群内部使用的 IP 地址采用 192.168.0.x,通过负载均衡器实现内外地址的转换也提升了 Web 服务系统的安全性。

结束语 Web 挖掘技术是数据挖掘技术和 WWW 应用的结合,Web 日志分析是 Web 挖掘技术的一个组成部分,Web QoS 技术是应用层的 QoS,基于 Web 日志分析的 Web QoS 的成功应用,在网站建设和电子商务中起到了重要作用。

目前,Web QoS 控制技术的研究已经越来越多地受到网络研究者和著名公司的重视,IBM 公司也推出了支持 Web QoS 控制机制的名为“WebSphere”的软件平台。SUN 公司推出了 JES(Java Enterprise System)软件平台并进行了部分开源,HP 公司已经推出了在 Web 服务器中支持 QoS 控制机制的名为“WebQoS”的服务质量软件,同时 Cisco 公司、Nortel 公司正在推出具有 7 层交换功能的内容交换机、链路均衡器和高速缓存服务器等。

参考文献

- 1 CNNIC. 第 19 次中国互联网络发展状况统计报告. 2007-1-23
- 2 美国太阳微系统公司. Sun ONE Application Server 开发指南 [M]. 师炜. 北京:机械工业出版社,2003. 2~25
- 3 韩晓莉,李秉智. 个性化 Web 推荐服务研究[J]. 计算机科学, 2006(2):135~138
- 4 姜传菊. 网络日志分析在网络安全中的作用[J]. 现代图书情报技术, 2004(12):58~59
- 5 刘建国. Web 挖掘在电子商务中的应用[J]. 重庆工商大学学报, 2004(4):384~387
- 6 林闯. 服务质量(QoS)走进 Web. 计算机教育, 2004(1):38~40

(上接第 46 页)

图 1,图 2 分别为两种缓存算法在不同网络规模下 P2P 流媒体分发过程中节点获取流媒体前缀片段的平均传输时延以及所有片段的平均传输代价比较。最小化网络传输代价缓存算法在不同网络规模上无论是启动时延还是片段平均传输代价上都比自适应按需缓存算法小。由于网络规模不同,用户群聚度不同,流媒体片段局部流行度不同,因此此算法对流媒体分发性能改善程度也不同。从图 1,2 可知最小化网络总体传输代价启发式缓存算法能有效地减少流媒体在无线 Ad Hoc 网络中 P2P 模式分发的传输代价。

结论及研究展望 最小化网络总体传输代价启发式缓存算法与以往的无线网络流媒体分发缓存算法比较具有以下特点:1)以总体缓存资源有限为前提;2)结合考虑流媒体文件内部流行度;3)考虑无线 Ad Hoc 网络中节点传输流媒体的可靠性;4)由于采用泛洪搜索算法,间接的统计了流媒体片段的缓存密度,其缓存原则就是缓存实际缓存密度与期望缓存密度之差和片段流行度乘积最大的片段,因此,此算法在总体缓存资源有限的情况下将使得流行度越高的片段传输时延越小,流行度越低的片段传输时延相对较长,这样就降低了流媒体分发过程中的总体传输时延。

本算法目前没有考虑无线 Ad Hoc 网络节点传输流媒体可靠性的探测算法,而是假定节点可靠性已知,且所有节点可靠性相同,但实际节点失效概率与无线网络中节点的密度和网络负载相关,随着时间和空间的变化而变化。因此预测节

点失效概率将是我们下一步的研究方向之一。

本算法流媒体分发模型中,节点采用泛洪搜索算法寻找源节点,这样将给无线网络造成较大的通信负载,因此进一步研究有效的源节点搜索算法对减少无线网络通信负载,提高流媒体分发效率具有重要的意义。这也是我们下一步的研究方向之一。

参考文献

- 1 Yang Z K, Wang T, Du X, Liu W, Yu J. Investigation on the content popularity distribution under K-Transformation in streaming applications. In: Proc. IEEE TENCON 2005, Melbourne, Australia, Nov. 2005. 1659~1663
- 2 PPLive. <http://www.pplive.com>
- 3 TVAnts. <http://www.tvants.com>
- 4 GridCast. <http://www.gridcast.cn/index.jsp>
- 5 Ghandeharizadeh S, Krishnamachari B, Shanshan Song, Placement of Continuous Media in Wireless Peer-to-Peer Networks, IEEE Transactions on Multimedia, APRIL 2004, 6(2):335~342
- 6 Jin S. Replication of Partitioned Media Streams in Wireless Ad Hoc Networks. MM'04, New York, USA, Oct 2004. 396~399
- 7 Xiang Zhe, Zhang Qian, Zhu Wenwu, Zhang Zhensheng, Zhang Ya-Qin. Peer-to-Peer Based Multimedia Distribution Service. IEEE Transactions on Multimedia, APRIL 2004, 6(2)
- 8 Guo Lie, Chen Songqing, Zhang Xiaodong. Design and Evaluation of a Scalable and Reliable P2P Assisted Proxy for On-Demand Streaming Media Delivery. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2006, 18(5):669~682