

基于网络代价的流媒体缓存策略研究

廖建新 杨波 朱晓民 张昊

(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室 北京 100876)

摘要: 该文构造了一种新的流媒体缓存效用函数, 该函数综合考虑流媒体节目的流行度特性及传输网络的代价参数; 设计了一种针对多视频服务器、基于网络代价的流媒体缓存分配与替换算法(Network Cost Based cache allocation and replacement algorithm, NCB)。仿真实验结果显示, NCB 算法有效提高了缓存命中率, 降低了传送流媒体所消耗的总网络代价; 该算法在网络结构复杂、节目数量庞大的 Internet 流媒体应用环境中表现出较优越的性能。

关键词: 流媒体; 网络代价; 缓存分配与替换算法

中图分类号: TN919.85

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)09-2239-05

Study of Network Cost Based Cache Policy for Streaming Media

Liao Jian-xin Yang Bo Zhu Xiao-min Zhang Hao

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: By taking the popularity character of the media program and the cost of the transmission network into consideration, a novel caching utility function is proposed. A Network Cost Based streaming media cache allocation and replacement (NCB) algorithm is designed for multi-server streaming application. Simulation proves that, by employing the NCB algorithm, the cache hit rate can be improved obviously and the total network cost can be decreased effectively. In the Internet streaming application environment, where the network connections between content servers and caching proxy are heterogeneous, the amount of streaming programs is huge, the NCB shows good performance.

Key words: Streaming media; Network cost; Cache allocation and replacement algorithm

1 引言

视频流媒体是宽带IP网络和多媒体技术结合的产物。近年来, 围绕媒体内容的生成、存储、传输、缓存和接收, 已经开展了大量研究。流媒体缓存的作用是根据用户对视频节目访问模式所具有的集中特性, 利用位于用户网络中的代理服务器缓存热门节目, 以节省传输网络带宽消耗和内容服务器处理开销, 为用户提供有质量保证的媒体服务。

文献[1]提出了一种针对WEB环境的Hybrid替换算法, 其效用函数综合考虑了代理与服务器之间的带宽、时延、缓存对象的访问次数等因素。根据流媒体的存储特点, Lim等提出了一种最小效用优先缓存算法SCU^[2], 以特定时间段内缓存提供的数据量与已缓存内容占用空间大小的比值作为效用函数, 基于等长段为单位实施缓存替换。文献[3]将视频

对象进行等长分段、分级编码构成基本缓存单位, 缓存效用函数中考虑了以下因素: 节目内/外部流行度、用户带宽分布以及不同编码层流行度等。文献[4]提出了一种滞后分段和主动预取的替换算法, 有效提高了缓存命中率并避免了节目播放期间产生的停顿。文献[5]以节目的流行度和节目的总长度乘积作为效用函数, 设计了一种基于流行度比例的缓存替换算法PP, 并提出一种优化的缓存分配算法。算法SBC^[6]以段为基本缓存单位, 提出了将节目内容按时间长度指数级递增方式分段, 段的效用函数以该段上次访问时间和段在节目中的位置为依据, 并使用最短缓存门限参数将节目分割为两个区域分别适用相应的替换策略。

这些替换算法的共同特点是: 这些算法以节目的用户点播统计特性(如: 节目的流行度、节目片段的重要程度、节目的上次点播时间等)来构造效用函数, 并未考虑多个内容服务器和代理服务器之间的网络链路状况差异; 或者说它们都假定一个代理服务器为单个内容服务器提供缓存服务。然而, 在一个实用的大型流媒体系统中, 节目通常分布在多台内容服务器上存储, 这些内容服务器与代理服务器之间的传输链路具有不同的性能和费用参数; 在用户网络中通常只有一台

2006-02-20 收到, 2006-07-19 改回

国家杰出青年科学基金(60525110), 新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0111), 高等学校博士学科点专项科研基金(20030013006), 电子信息产业发展基金项目(基于3G的移动业务应用系统)和电子信息产业发展基金重点项目(下一代网络核心业务平台)资助课题

代理服务器为多个视频服务器上的内容提供缓存服务, 散布在网络上的多个内容服务器与代理之间的网络带宽、时延、费用等参数各不相同。

针对上述问题, 本文提出了一种基于网络代价的流媒体缓存分配与替换策略, 在效用函数中综合考虑了节目的点播特性(如: 节目流行度、段流行度等)和缓存代理与源服务器之间的网络代价(如: 负载、时延、费用等)差异; 在缓存分配与替换算法中, 根据效用值采用最佳匹配(Best-fit)与最先匹配(First-fit)相结合的方法, 使用缓存代理有效降低了流媒体传输网络的总体代价。

本文组织结构如下: 第2节针对基于流媒体对象的特点, 构造了一种新的缓存效用函数, 给出了基于网络代价的流媒体缓存分配与替换算法(Network Cost Based (NCB) cache allocation and replacement algorithm); 第3节使用仿真实验对该算法进行了验证和分析; 第4节总结了NCB算法的特点并展望了下一步研究方向。

2 基于网络代价的缓存算法

2.1 网络代价的评估参数

在本文中, 将代理服务器与内容服务器之间的网络特性(如: 网络负载、带宽、时延、费用等)用网络代价抽象描述, 网络代价既可以是其中一个参数的值, 也可是多个参数的函数值。为了评价代理服务器与内容服务器之间的网络代价, 首先定义字节传输代价(Byte Transmission Cost, BTC)。设流媒体系统中由 m 台流媒体内容服务器构成服务器集合, 记作 $SRV = \{Srv_1, Srv_2, \dots, Srv_m\}$, 某台服务器 Srv_k ($0 < k < m+1$)到缓存代理Proxy的字节传输代价用 $BTC(k)$ 表示。将从内容服务器 Srv_k 到代理服务器Proxy所经过的链路集合记为 L_k , 在链路 L 上传输一个字节所消耗的代价为 $NC(L)$, 则定义服务器 Srv_k 与Proxy之间的字节传输代价 $BTC(k)$ 如式(1)所示。定义 BTC_{max} 为服务器集合 SRV 中到Proxy的最大字节传输代价, 如式(2)所示。

$$BTC(k) = \sum_{l \in L_k} NC(l) \quad (1)$$

$$BTC_{max} = \text{Max}_{0 < k \leq m} (BTC(k)) \quad (2)$$

2.2 缓存效用函数的选取

本文提出的替换算法中, 缓存效用函数计算主要考虑如下几个方面因素:

(1)节目的流行度分布^[3]: 视频点播业务中用户对节目的请求通常具有集中特性, 大量用户点播请求往往集中在少数节目上。对统计结果的分析表明, 可以用Zipf(N, θ)分布近似描述用户对节目的点播特点。其中: N 为系统中总的节目数; θ 为倾斜因子, 该值越小, 节目的集中程度就越明显。设系统中共有 n 个节目, 记做 $PRG = \{Prg_1, Prg_2, \dots, Prg_n\}$, 则第 i 个节目 Prg_i ($0 < i < n+1$)的点播概率 $PP(i)$ 用式(3)计算。

$$PP(i) = (1/i^{1-\theta}) / \sum_{x=1}^n (1/x^{1-\theta}) \quad (3)$$

(2)节目片段的流行度分布^[7]: 在节目播放过程中, 用户可能在不同的时段停止观看, 若将一个视频节目按照时间长度分段, 则最开始的段具有最高流行度; 随着段序号的增加, 段流行度递减。设将视频对象 Prg_i 按照时间顺序分为等时间长度的 s 个段 $SEG(i) = \{Seg_1, Seg_2, \dots, Seg_s\}$, 称 Seg_i 为 Seg_{i+1} 的前段($0 < i < s$), 用内部流行度向量 $B = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{s-1}]$ 表示各段相对于前段的流行度比值, 即 $Popularity(Seg_j) / Popularity(Seg_{j+1}) = \beta_j$, ($0 < j < s, \beta_j > 1$); 文献[6]给出了20个等长段划分后各段的内部流行度向量 B_{20} 。在第 i 个节目 Prg_i 被点播的前提下, 其第 j 段的点播概率 $PS_i(j)$ 表示为式(4):

$$PS_i(j) = 1 / \prod_{y=1}^{j-1} \beta_y \quad (4)$$

(3)节目的网络代价比: 采用从内容服务器 Srv_k 向代理服务器Proxy传输一个字节的平均代价 $BTC(k)$ 与 BTC_{max} 的比值来衡量位于服务器 Srv_k 上的节目耗费网络代价的大小程度, 称作节目的网络代价比。

综上所述, 定义式(5)表示存储在内容服务器 Srv_k 上节目 Prg_i 的第 j 个视频片段(用 $Seg(i, j)$ 表示)被代理服务器Proxy上缓存的效用函数 $CU(i, j, k)$, 其中 $Size(i, j)$ 代表 $Seg(i, j)$ 占用的存储空间大小。

$$CU(i, j, k) = \frac{PP(i) \cdot PS_i(j) \cdot BTC(k)}{Size(i, j) \cdot BTC_{max}} \quad (5)$$

2.3 缓存分配与替换算法

使用上节定义的效用函数, 我们提出一种基于网络代价的流媒体缓存分配与替换算法NCB。该算法的思想是将最佳匹配(Best-fit)与最先匹配(First-fit)结合, 目的是在较小计算开销下, 利用有限的缓存空间有效降低流媒体传送系统的总体网络代价。

假定缓存代理Proxy的存储空间容量为 C_{all} , 其中可用的空闲空间容量为 C_{free} , 将所有已经在代理服务器Proxy上缓存了的节目片断集合记为 D , 则NCB算法就转化为最优化问题。本文采用如下的启发式方法实现NCB缓存分配和替换策略: 为 D 中的每个节目片断建立一个四元组构成的缓存信息项{片断标识SegID, 效用函数值CU, 存储空间大小Size, 替换标志Flag}; 按照下述规则组织缓存信息项以构成缓存信息表(Cache Information Table, CIT): (1)将节目片断按照效用值CU为关键字升序排列; (2)将缓存信息项按照效用值CU分组, 具有相同CU值的项目位于同一组, 组内按照空间大小Size为关键字升序排列。初始时, 缓存信息表CIT为空, 对于客户点播的每个节目, 代理服务器都试图将其缓存。当代理服务器Proxy接收到一个新的节目片段后, 如果还有足够的空闲空间存放该段, 则直接缓存该段; 若空间不足, 则

比较新段和 D 中段的最小效用值 MinCU , 若待缓存段的效用值高于 MinCU , 则淘汰 D 中效用值小的段, 留出空间来缓存新段。

图1所示的NCB是一种性能与效率综合考虑的缓存算法, 当用于缓存新段的空间不足而需要淘汰一些效用值较低

```

NCB_Caching(来自服务器 $\text{Srv}_k$ 的待缓存节目段 $\text{Seg}_{i,j}$ )
{
    //对于长度过大或效用值过低的段不予缓存
    if (Size( $\text{Seg}_{i,j}$ ) > CacheThreshold || CU( $\text{Seg}_{i,j}$ ) < MinCU)
        return FAILURE;
    //直接分配
    if ( $C_{\text{free}} \geq \text{Size}(\text{Seg}_{i,j})$ ) {
        在Proxy上缓存段 $\text{Seg}_{i,j}$ ;
         $C_{\text{free}} = C_{\text{free}} - \text{Size}(\text{Seg}_{i,j})$ ;
        将 $\text{Seg}_{i,j}$ 信息按规则插入缓存信息表CIT;
        return SUCCESS;
    }
    //寻找待换出的段
    finish = FALSE;
    while (finish == FALSE) {
        //单段采用最佳匹配(Best-fit)策略
        在CIT第1个CU组 $G1$ 中寻找第1个段 $\text{Seg}_x$ 使
         $\text{Size}(\text{Seg}_x) + C_{\text{free}} \geq \text{Size}(\text{Seg}_{i,j})$ ;
        if (找到 $\text{Seg}_x$ ) {
             $\text{Seg}_x$ .Flag = 待换出;
            finish = TRUE;
        }
        //对多段采用最先匹配(First-fit)策略
    } else {
         $C_{\text{avl}} = C_{\text{free}}$ ;
        while (!NULL(CIT) && ( $C_{\text{avl}} < \text{Size}(\text{Seg}_{i,j})$ )) {
            在CIT表中找到第1个未标记且CU小于 $\text{Seg}_{i,j}$ 的段 $\text{Seg}_y$ ;
             $\text{Seg}_y$ .Flag = 待换出;
             $C_{\text{avl}} = C_{\text{avl}} + \text{Size}(\text{Seg}_y)$ ;
        }
        if ( $C_{\text{avl}} \geq \text{Size}(\text{Seg}_{i,j})$ )
            finish = TRUE;
    } // else
} // end while
if (finish == FALSE) {
    清除所有的 Flag = 待换出的段;
    return FAILURE;
}
//执行替换
while (!NULL(CIT)) {
    对每个已缓存段 $\text{Seg}_z$ 
    if ( $\text{Seg}_z$ .Flag == 待换出) {
        将 $\text{Seg}_z$ 从缓存中淘汰;
        缓存碎片合并;
        从CIT中删除 $\text{Seg}_z$ 信息项;
         $C_{\text{free}} = C_{\text{free}} + \text{Size}(\text{Seg}_z)$ ;
    }
    为 $\text{Seg}_{i,j}$ 分配缓存;
    将 $\text{Seg}_{i,j}$ 的信息项按规则插入CIT表;
     $C_{\text{free}} = C_{\text{free}} - \text{Size}(\text{Seg}_{i,j})$ ;
    修改当前缓存的效用函数的最小值  $\text{MinCU}$ ;
}
return SUCCESS;
}

```

图1 基于网络代价的缓存分配和替换算法

的段时, 我们使用两种机制: (1)首先试图从CU值最小的组 $G1$ 中找到一个满足新段缓存需要且Size值最小的段作为待淘汰段, 这是最佳适配(Best-fit)策略; (2)否则, 采用最先匹配(First-fit)策略依次从CIT表的队头选取待换出段。结合这两种策略的算法的优势体现在: (1)多数替换使用了最佳适配, 有效提高了缓存的利用率; (2)在单段替换不能满足需求时, 在极小运算复杂度下能够选择出待淘汰的段。

3 性能评价

3.1 模拟环境与评价指标

为了验证本文提出的基于网络代价的缓存策略, 本文设计了一种事件驱动型仿真平台, 通过一组事件模拟客户端的点播行为, 触发Proxy中缓存和替换动作, 记录各链路和服务服务器上的流量数据。仿真中使用如图2所示的网络拓扑结构, 两台视频内容服务器通过代理Proxy向客户群提供VoD服务, Srv_1 、 Srv_2 分别通过不同代价的链路连接到代理服务器Proxy。

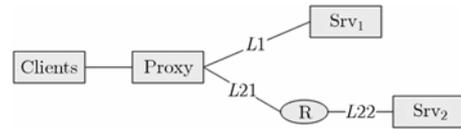


图2 仿真网络的拓扑示意图

内容服务器的存储方案是这样安排的: 将300个视频节目随机地分布在两个视频服务器上, 每个节目仅完整地存储于其中一台服务器上; 节目流行度的统计特征服从Zipf(300, 0.271)分布; 节目的时间长度服从90-120min之间的均匀分布; 每个节目按照播放时间长度为基准分成20个等长的片段, 以片段作为节目在代理服务器Proxy上缓存的基本单位。客户点播请求的到达率服从 λ 次/秒的Poisson分布。 α 表示缓存比例, 即Proxy的缓存容量与所有节目总体容量的比值。设 Cost_1 、 Cost_2 分别表示 Srv_1 、 Srv_2 与代理服务器Proxy之间的字节传输代价, $\mu = \text{Cost}_2 / \text{Cost}_1$ 为网络代价比, $\mu=1$ 意味着Proxy到 Srv_1 和 Srv_2 的网络代价相同, 即不考虑网络代价对缓存的影响的情况, 此时NCB算法就退化成了文献[6]中算法的特殊情形。点播行为对不同节目段的请求用内部流行度向量 B_{20} 描述。在不影响本文结论的前提下, 我们做如下假定以简化仿真环境: (1)网络属性和链路代价在一段时间内具有稳定性, 并且有相应的可靠手段准确获知; (2)不考虑缓存代理Proxy的磁盘和网络带宽限制, 假定网络和磁盘输入输出带宽足够大; (3)不考虑VCR操作对访问模式的影响, 所有的用户点播都从节目第1段开始; (4)不考虑代理和客户之间链路的传输延时。

为验证2.3节的替换算法, 选取文献[2]中提到的SBC算法作对比, 用字节命中率(Byte Hit Rate, BHR)和段命中率(Segment Hit Rate, SHR)两个指标衡量替换算法的性能。字节命中率BHR是指: 在特定的时间段内, 从缓存中获得服务的字节数与客户请求的总字节数的比值; BHR的大小反映

了缓存对用户请求的贡献程度。段命中率SHR是指当用户请求某个视频段时该片段在缓存中的概率,对于请求内容不在缓存中的段,用户直接从服务器上获得数据的时间较长,因此,SHR客观反映了用户请求的时延概率。

基于网络代价的缓存分配与替换算法NCB采用式(5)定义的效用函数作为替换依据,有效降低了流媒体服务的网络代价。我们使用下述指标衡量网络代价的节省情况:网络代价增益(Network Cost Gain, NCG)、网络代价增益率(Network Cost Gain Rate, NCGR)。记 $HS(\mu, k)$ 为在一次仿真实验中由代理服务器Proxy代替 Srv_k 向客户群发送的总字节数,定义 $NC(\mu)$ 如式(6)所示,网络代价增益 $NCG(\mu)$ 如式(7)所示,网络代价增益率 $NCGR(\mu)$ 用式(8)表示。 $NC(1)$ 是不考虑网络代价对缓存影响情况下缓存对网络的贡献值,网络代价增益 $NCG(\mu)$ 体现了在代价比为 μ 时缓存对网络负载的减轻量,网络代价增益率 $NCGR(\mu)$ 反映在代价比为 μ 时缓存对网络负载的减轻程度。

$$NC(\mu) = HS(\mu, 1) + \mu \cdot HS(\mu, 2) \quad (6)$$

$$NCG(\mu) = NC(\mu) - NC(1) \quad (7)$$

$$NCGR(\mu) = NCG(\mu)/NC(1) \quad (8)$$

3.2 仿真实验结论

本文进行了8组实验,在每组实验中为 α 和 μ 选取不同的值,每次实验进行5个仿真小时,对仿真结果进行统计分析。图3给出了字节命中率(BHR)与缓存大小、网络代价比等参数的关系。可以看出,本文提出的NCB算法比SBC算法具有更高的BHR,以 $\mu=2$ 为例,NCB比SBC高出7%左右。随着网络代价比 μ 的增加,NCB算法的BHR呈现下降趋势,这是由于NCB算法将链路代价考虑在内, μ 值的增大使得位于 Srv_2 中的节目的缓存效用函数值提高,算法倾向于用 Srv_2 中流行度稍低的节目片断淘汰掉 Srv_1 中流行度较高的片断,从而导致字节命中率的降低,NCB算法的实质就是用字节命中率的降低来换取网络代价的增益。图4给出了段命中率(SHR)与缓存大小、网络代价比的关系,趋势与图3的BHR相同;SHR的降低,意味着部分用户请求会被延时。图5以对数坐标给出了规范化缓存增益与缓存大小及网络代价比的关系,随着 μ 的增加,网络增益值明显变大,这是以牺牲少量位于 Srv_1 上的热门节目换取了大量的 Srv_2 和Proxy之间网络开销的减小;在缓存比例 α 位于20%到30%之间时,缓存增益取最大值;当 $\alpha > 30\%$ 时,缓存增益将会下降。图6给出了网络代价增益率,在 α 小于25%时,网络代价增益率NCGR较优,这是由于当缓存空间变大时,候补进入缓存的视频片断被点播的概率较小,对网络代价增益的贡献减小。本文还比较了 $\alpha = 0.2, \mu = 4, \lambda = 0.2$ 的情况下,节目的集中程度(即Zipf分布的 θ 参数)对NCB算法性能的影响,如图7所示。随着 θ 值增大,各个节目的流行程度逐渐接近,在同样的空间限制下,Proxy的BHR会逐渐减少,Proxy以更高概率缓存来自 Srv_2 的节目片断,降低了通过网络访问

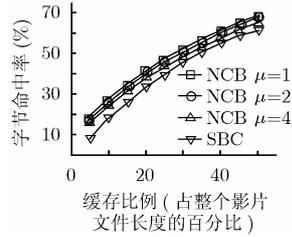


图3 字节命中率(BHR)与缓存大小的关系

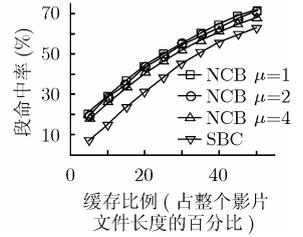


图4 段命中率(SHR)与缓存大小的关系

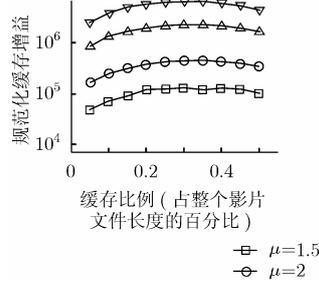


图5 规范化网络代价增益(NCG)与缓存大小的关系

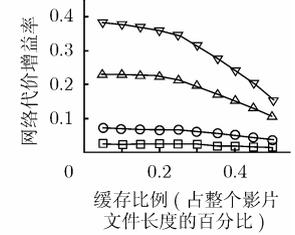


图6 网络代价增益率(NCGR)与缓存大小的关系

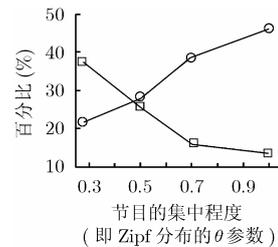


图7 节目流行程度对性能的影响

Srv_2 中节目片断的频率,从而节省了总体网络传输代价、增加网络代价增益比。此外,在 $\alpha = 0.2, \mu = 4, \theta = 0.271$ 的情况下,对 $\lambda \in \{0.05, 0.1, 0.2, 0.5\}$ 4种情况下对NCB算法性能的影响进行了评估,发现 λ 对BHR和NCGR的影响并不明显。

从上面的实验结果可以看出:NCB算法比较适合于缓存比例 α 较小、网络代价比 μ 较大的情况,目前基于Internet的流媒体应用环境恰好满足这样的特点:与总体节目大小相比缓存空间的容量非常有限,各服务器到代理之间的链路代价差异大。因此,NCB算法对于Internet流媒体应用具有较好的实用价值。

4 结束语

本文提出的基于网络代价的流媒体缓存算法NCB中,将网络代价引入缓存效用的计算中,适用于链路异构、节目内容庞大的Internet视频流媒体的缓存,缓存分配与替换算法复杂度小,对基于互联网的流媒体业务的缓存部署和优化具有一定参考价值。

本文的主要贡献包括:(1)构造了一种综合考虑节目统计特性和网络代价的缓存效用函数;(2)设计了一种优化网络代价的缓存分配与替换算法,该算法将最佳匹配和最先匹配策

略有有机结合, 有效提高了缓存的字节命中率, 并具有较小的运算开销; (3)引入了网络代价增益和网络代价增益率指标, 用于衡量网络开销的节省程度; (4)使用仿真实验验证了基于网络代价的缓存分配与替换算法的有效性, 说明该算法适用于 Internet 视频流媒体应用。

下一步的研究计划: (1)研究将网络传输抖动及时延参数引入 NCB 算法中, 有效提高流媒体业务的用户服务质量; (2)考虑基于分层、可扩展编码的缓存机制, 进一步提高 NCB 算法的性能。

参 考 文 献

- [1] Cao Pei and Irani Sandy. Cost-aware WWW proxy caching algorithms [A]. Proceedings of the 1997 USENIX Symposium on Internet Technology and Systems, Monterey, CA, 1997.12, 193-206.
- [2] Lim Eun-Ji, Park Seong-Ho, and Hong Hyeon-Ok, *et al.* A proxy caching scheme for continuous media streams on the Internet [A]. Proceedings of the 15th International Conference on Information Networking, Beppu, Japan, 2001.2: 720-725.
- [3] 刘宝锋, 张文军, 谷志奇. 基于代理服务器缓存的 Internet 分层视频点播[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(4): 645-648.
- [4] Chen Songqing, Wang Haining, and Zhang Xiaodong *et al.* Segment-based proxy caching for Internet streaming media delivery [J]. *IEEE Trans. on Multimedia*, 2005, 12(3): 59-67.
- [5] Wang Bing, Sen Subhabrata, and Adler Micah, *et al.* Optimal proxy cache allocation for efficient streaming media distribution [J]. *IEEE Trans. on Multimedia*, 2005, 6(2): 366-374.
- [6] Wu K L, Yu P S, and Wolf J L. Segment-based proxy caching of multimedia streams [A]. Proceedings of the 10th international conference on World Wide Web, Hong Kong, China, 2001.4: 36-44.
- [7] Acharya Soam and Smith Brian. An experiment to characterize videos stored on the web [A]. Proceedings of Multimedia Computing and Networking, San Jose, USA, 1998.1: 166-178.
- 廖建新: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动智能网、宽带智能网、下一代网络技术。
- 杨波: 男, 1973年生, 博士生, 研究方向为宽带通信网、流媒体技术。
- 朱晓民: 男, 1974年生, 副研究员, 中国电子学会高级会员, 中国通信学会高级会员, 主要研究方向为智能网、下一代业务网络、流媒体技术。
- 张昊: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为移动通信网、IMS。