

RMFS: 一种支持用户交互的流媒体调度方案

智英建 汪斌强

(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)

摘要: 基于组播的流调度算法能够有效降低服务器和网络带宽消耗。但研究表明, 在用户进行 VCR 交互操作情况下, 这些算法的性能将急剧恶化。该文提出一种有效支持用户交互的视频点播系统流调度方案: 常规组播固定调度 RMFS。RMFS 采用基于请求类的接纳控制策略, 并通过流合并机制来合并单播流。分析了 RMFS 方案的最佳组播间隔、最佳请求阈值和最小服务器容量需求。仿真结果验证了分析模型的正确性和 RMFS 方案的可行性。

关键词: 常规组播; 用户交互; 调度; 流合并; 服务质量

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1470-05

RMFS: A Streaming Media Scheduling Scheme Supporting User Interactivity

Zhi Ying-jian Wang Bin-qiang

(National Digital Switching System Engineering & Technology R&D Center, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Multicast based stream scheduling algorithm can reduce server and network bandwidth consumption efficiently. But recent studies have indicated that user VCR interactive operations can severely penalize the scalability of these stream protocols. A new stream scheduling scheme, called Regular Multicast Fixed Scheduling (RMFS), is proposed to support interactive playback control in video-on-demand system. RMFS adopts the class-based admission control mechanism to admit client requests and consolidates the unicast stream through stream merging mechanism. The optimal multicast interval, the optimal request threshold and server channel capacity requirements for the RMFS scheme are all analyzed. Extensive simulation results verify the correctness of the analytical model and the feasibility of the presented RMFS.

Key words: Regular multicast; User interactivity; Scheduling; Stream merging; Quality of Service(QoS)

1 引言

实时播放和高带宽要求使得流媒体应用面临巨大挑战。为了降低带宽消耗, 研究者提出了许多基于组播的流合并算法^[1,2]。流合并算法要求客户能够同时接收两条视频流, 使得访问相同视频的不同客户最终共享同一个组播流。但这种方法存在的一个共性问题是无法有效支持用户的 VCR 交互操作。研究表明^[3], 基于组播的流调度算法在用户交互情况下性能将急剧下降。为了减轻这一问题, 可以根据特定协议的特点进行优化^[3]或者采用更复杂的动态合并算法^[4], 但一方面增加了系统实现复杂度, 另一方面方案不具有通用性。利用客户侧缓存^[5]只能提供受限的 VCR 操作, 降低了用户体验质量。备用信道方案^[6]采用专门的信道服务于客户的交互请求, 但当客户交互请求强度较大时, 造成资源浪费。最近, 文献[7]提出了支持 VCR 交互的静态全流调度方案 SFSS。SFSS 使用在线模拟的方法来获得常规组播流的最佳间隔, 时间消耗较大。此外, SFSS 在开启新组播流的同时,

接纳全部正在等待的新客户请求, 而没有考虑系统能否满足这些客户潜在的交互请求, 难以保证交互请求的服务质量。

本文提出了一种有效支持用户交互的常规组播固定调度 RMFS(Regular Multicast Fixed Scheduling)方案。RMFS 采用基于类的接纳控制策略, 通过固定调度常规组播流来保证流合并中目标组播流的存在, 降低了服务器资源消耗。所提方案能够支持零延迟播放, 保证高优先级的交互请求的服务质量。仿真结果验证了 RMFS 的可行性。

2 常规组播固定调度方案 RMFS

RMFS 方案分为请求接纳和请求合并两个阶段。请求接纳主要进行接纳控制; 请求合并主要是为接纳的请求确定补丁流长度及合适的常规组播(Regular Multicast, RM)流, 从而达到流合并的目的。

2.1 请求接纳

RMFS 方案将服务器端的请求分为 3 种: 服务器每隔 T 时间产生的常规组播流请求(Multicast Request, MR); 已经被接纳的客户发出 VCR 操作产生的交互请求(Interactive Request, IR); 新到达系统等待服务的客户产生的接纳请求(Admission Request, AR)。

常规组播流的调度间隔对系统性能影响很大。为保证常规组播流的存在以便能够合并由于服务 AR 和 IR 产生的单播流, 服务器预留 $[L/W]$ 个信道来接纳 MR 请求。

直观上, IR 应该比 AR 具有更高的优先级。基于此, 本文采用基于类的接纳控制策略^[8]。该策略不仅考虑当前服务器资源占用状态而且还考虑客户请求的内在属性。为方便计, 把 IR 和 AR 分别称为第 1 类和第 2 类请求。第 1 类和第 2 类请求占用的服务器信道数目不能超过其对应的信道阈值 l_1 和 l_2 。假设第 k 类($k=1,2$)请求当前占用的信道数为 n_k , 服务器用于服务这两类请求的信道总容量为 N , 则一个第 k 类请求被服务器接纳, 当且仅当满足下列条件

$$\left. \begin{aligned} n_1 + n_2 &\leq N - 1 \\ n_k &\leq l_k - 1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

对于基于类的接纳控制机制的分析可参考文献^[8]。

2.2 请求合并

当一个 IR 或 AR 被接纳后, 为该请求发起一个单播补丁流, 同时定位合适的组播流 RM 来完成流合并。RMFS 方案采用基于逻辑开始时间的方法确定合适的 RM 流, 进而确定补丁流的长度。

视频流的实际开始时间定义为开始传输该视频流的实际时间。假设流的实际开始时间为 t_r , 流的视频播放起点为 p_r , 则该流的逻辑开始时间 t_v 定义为 $t_v = t_r - p_r$ 。图 1 中, PS2 流的实际开始时间为 t_4 , 逻辑开始时间为 $t_4 - p_3$, 即 t_3 。直观上, 流(或其延长线)与 x 轴的交点即为流的逻辑开始时间。

服务器记录系统中所有尚未结束的常规组播流的逻辑开始时间, 这些逻辑时间的集合记为 T 。当服务器接纳某请求(AR 或 IR)后, 为该客户发起一条从请求播放点开始的逻辑开始时间为 t_v 的补丁流来保证客户的实时播放。为合并该流, 系统需要定位一个 RM 流, 其逻辑开始时间 T_i 应该早于 t_v 且距 t_v 的间隔最小, 即 $T_i = \{T_j | \min\{t_v - T_j\}, T_j \leq t_v, T_j \in T\}$ 。如果存在满足条件的 RM 流, 则客户在接收补丁流的同时立刻加入该 RM 流接收并缓存数据, 且补丁流的长度为 $t_v - T_i$ 。如果没有满足条件的 RM 流, 则该补丁流从请求的播放点开始直至视频结束。

图 1 中, 假设客户 A 在 t_1 时刻到达系统, 服务器发起一条长度为 t_1 的单播补丁流 PS1 满足客户实时播放, 同时客户加入目标组播流 RS1 接收并缓存数据。在时刻 W 时, 服务器产生一个 MR 请求, 一条新的组播视频流 RS2 被触发。在 t_4 时刻假设客户 A 发出跳退(JB)请求, 交互请求的播放点为 p_3 。服务器发起一个从播放点 p_3 开始的补丁流 PS2 保证客户的连续播放。同时, 服务器根据 PS2 的逻辑开始时间 t_3 定位目标组播流(本例中为 RS1)。客户在接收 PS2 流的同时, 接收并缓存 RS1 中的数据。PS2 流的长度为 $t_3 - 0 = t_3$ 。

3 方案分析

分析中采用两个 QoS 评价指标: IR 阻塞率 P_{B1} 和 AR

阻塞率 P_{B2} 。假定系统期望的 P_{B1} 和 P_{B2} 分别低于 P^1 和 P^2 。 P_{B1} 是主要的评价指标。

3.1 客户交互强度

客户交互强度(Client Interactive Intensity, CII)定义为一次会话中客户发出有效 VCR 操作的平均次数。采用图 2 所示的 VCR 交互模型。该模型以播放状态为核心, 到播放(PLAY), 前跳(JF), 后跳(JB), 暂停(PAUSE), 终止(ABORT)状态的转移概率分别为 P_n, P_f, P_b, P_p 和 P_a , 且 $P_n + P_f + P_b + P_p + P_a = 1$ 。进入播放或暂停状态后, 播放和暂停时间分别服从参数为 μ_n 和 μ_p 的指数分布。对于 JF 和 JB, 跳转距离分别服从参数为 μ_f 和 μ_b 的指数分布。基于图 2 所示的交互模型, 所谓有效 VCR 操作包括 JF, JB 和 PAUSE。

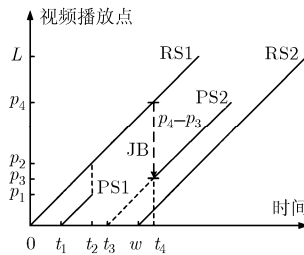


图1 流合并原理

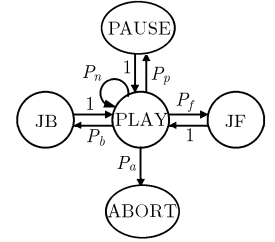


图2 客户交互模型

命题 客户交互强度 CII 由客户交互模型参数及访问的视频长度 L 完全确定。

证明 假设 X_1 和 X_2 分别为会话正常结束(无 ABORT 动作)和中途终止(有 ABORT 动作发生)情况下客户进入各状态的总次数。首先计算 X_1 。采用类似文献^[9]的分析方法, 假设会话过程中进入 PLAY, JF, JB 和 PAUSE 的次数分别为 x_n, x_f, x_b 和 x_p 。依照交互模型, 有

$$\left. \begin{aligned} x_n \mu_n + x_f (\mu_n + \mu_f) + x_b (\mu_n - \mu_b) + x_p \mu_n &= L \\ x_n : x_f &= P_n : P_f \\ x_n : x_b &= P_n : P_b \\ x_n : x_p &= P_n : P_p \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式(2)求解可得到 x_n, x_f, x_b 和 x_p 的值。由此可得 $X_1 = x_f + x_b + x_p + x_n$ 。计算 X_2 。ABORT 的发生服从几何分布, 即第 i 次($i=1,2,\dots,X_1$)出现的概率为 $p(i) = q(1-q)^{i-1}$, 其中 $q = P_a$ 。实际上, $p(i)$ 也是客户进入各状态总次数为 i 次的概率, 由此可得 $X_2 = \sum_i i p(i)$ 。由于 ABORT 操作发生的概率为 $P = \sum_i p(i)$ 。因此, 客户交互强度可由下式决定:

$$CII = [P X_2 + (1 - P) X_1] (P_f + P_b + P_p) \quad (3)$$

3.2 最佳组播间隔

最佳组播间隔定义为在一定的客户到达率、客户交互强度和阻塞概率条件下, 使得系统资源消耗率最小的组播时间间隔。客户请求到达服从参数为 λ 的泊松分布, 即 $\lambda_2 = \lambda$,

则 IR 的到达率 λ_1 满足 $\lambda_1 = (1 - P_{B2})\lambda C II$ 。假定客户缓存足够大,且客户执行另一个交互操作前已经合并到常规组播流。系统每隔 W 时间单位调度一个常规组播流,则单播补丁流的平均长度为 $W/2$,系统总的资源消耗率 R 为

$$R = rL/W + (1 - P_{B2})\lambda_2 W(r/2) + (1 - P_{B1})\lambda_1 W(r/2) \quad (4)$$

其中 r 为视频流速率。式(4)右边第1项为常规组播流的消耗,第2项为服务接纳请求的消耗,第3项为交互请求产生的消耗。对式(4)求关于 W 的导数并令结果为零,可得最佳组播间隔为

$$W_{opt} = \sqrt{\frac{2L}{\lambda(1 - P_{B2}) + \lambda(1 - P_{B1})(1 - P_{B2})C II}} \quad (5)$$

3.3 RMFS服务器容量需求

RMFS 服务器容量需求定义为在一定的客户到达率和客户交互强度条件下,满足系统 QoS 设计参数所需的最小服务器信道数目。RMFS 服务器容量需求 C 由两部分构成:服务 MR 的信道 C^0 以及服务 IR 和 AR 的信道 C^* 。由此, RMFS 信道容量需求可以归结为如下优化问题:

$$\min C, \text{ s.t. } P_{B1} \leq P^1, P_{B2} \leq P^2.$$

采用如下步骤来求解该优化问题。

步骤1 令 $P_{B1} = P^1, P_{B2} = P^2$, 由式(5)计算最佳组播间隔 W , 则 MR 请求所需容量 $C^0 = \lceil L/W \rceil$ 。

步骤2 求解服务 IR 和 AR 的最小服务器容量 C^* 。具体流程见图3。

步骤3 RMFS 信道容量需求为 $C = C^0 + C^*$ 。

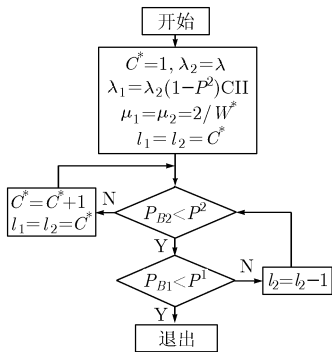


图3 计算信道数目

3.4 RMFS方案的适应性

在一定的客户到达率和客户交互强度条件下,当给定的信道数目小于所需的服务器容量 C 时,系统无法同时满足 IR 和 AR 的阻塞概率要求。因为 IR 优先级较高,需要调整系统的组播间隔 W 和请求类的阈值 l_1 和 l_2 , 使得在满足系统 IR 阻塞概率设计要求下, AR 阻塞率尽可能低。把 RMFS 方案这种通过调整 W, l_1 和 l_2 而满足 IR 服务质量要求的特性称为适应性。这种适应性可以归结为如下优化问题:

$$\min P_{B2}, \text{ s.t. } P_{B1} \leq P^1.$$

由于 W, l_1, l_2, P_{B1} 和 P_{B2} 之间相互依赖,很难求得问题的精确解。因此采用枚举技术来得到近似最优解。具体

地说,以 Δ 秒为步长枚举所有可能的组播时间间隔 $W, \lceil L/C \rceil \leq W \leq L$ 。这些枚举的组播间隔组成集合 S_W 。对于每个特定的组播间隔 W ,通过调整 AR 阈值 l_2 得到满足 IR 阻塞概率设计要求条件下最小的 AR 阻塞概率值,记为 $P_{B2}(W)$ 。令 $P_{B2min} = \min\{P_{B2}(W), W \in S_W\}$,则对应 P_{B2min} 的 W^*, l_1^* 和 l_2^* 即为所求。图4给出了 Δ 为 1s 的计算流程。

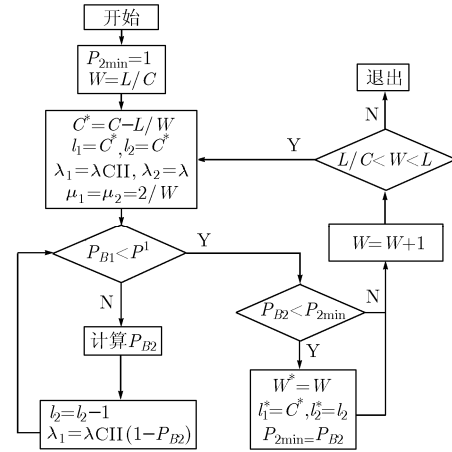


图4 确定最佳组播间隔及最佳阈值

4 仿真实验

由于补丁方案^[1]简单高效,容易实现,且是其它流合并方案的基础,本文基于补丁方案验证 RMFS 方案的可行性。仿真采用 NS2 工具,参数为 $L=7200s, P^1=0.01, P^2=0.02$ 。假设 $\mu_n = \mu_p = \mu_f = \mu_b = \mu, (P_f, P_b, P_p, P_a, \mu)$ 描述客户交互参数。4.1-4.4 小节假定客户侧缓存 $B \geq W, 4.5$ 小节研究客户缓存对系统性能的影响。图中用“calcu”和“simu”分别表示计算和仿真结果。

4.1 C II验证

考虑两种参数集: $(0.03, 0.03, 0.01, 0.01, \mu)$, 表示较低的客户交互强度,记为 LI; $(0.3, 0.3, 0.1, 0.01, \mu)$, 表示较高的客户交互强度,记为 HI。平均距离 μ 的变化范围为 300s-700s。实验设置 $C=100, W=1200s, l_1=94, l_2=94, \lambda=0.01$ (请求/s)。在计算 C II 时,当 X_1 不为整数时, X_2 和 P 分别用以下两式估算:

$$X_2 = ([X_1] - X_1) \sum_{i=1}^{\lfloor X_1 \rfloor} ip(i) + (X_1 - [X_1]) \sum_{i=1}^{\lfloor X_1 \rfloor} ip(i) \quad (6)$$

$$P = ([X_1] - X_1) \sum_{i=1}^{\lfloor X_1 \rfloor} p(i) + (X_1 - [X_1]) \sum_{i=1}^{\lfloor X_1 \rfloor} p(i) \quad (7)$$

从图5可以看出,总体来说,计算结果与仿真结果十分接近,在 C II 较低时,误差在 1% 以内,即使当 C II 较大时(C II > 10), C II 计算误差仍在 5% 以内。因此采用式(3)来估算 C II 是可行的。

4.2 确定最佳组播间隔和请求类阈值

设置 $C=60, \lambda=0.1$ (请求/s),客户交互参数集(0.1,0.1,0.05,0.05,500)。给定组播间隔 $W=290s, IR$ 阈值 $l_1=35$ 。变

化 AR 阈值 l_2 , 分别用仿真和计算的方法得到相应 l_2 下的阻塞概率 P_{B1} 和 P_{B2} 。对得到的这些概率值分别做规格化处理, 即 $P_{B1}/P^1, P_{B2}/\min\{P_{B2}\}$, 所得结果如图 6 所示。可以看出, 计算结果和仿真结果几乎完全一致。AR 的最佳阈值 l_2 为满足 IR 阻塞概率要求, 且使得 P_{B2} 尽可能小, 在图示情形下, 最佳阈值 $l_2=8$ 。按照 3.5 节的分析和约定, 把上述最佳阈值 l_2 下对应的 AR 的阻塞概率称为给定组播间隔 W 下 AR 的阻塞概率, 记为 $P_{B2}(W)$ 。图 7 给出了归一化的 AR 阻塞率随组播间隔 W 的变化情况。可以看出, 最佳组播间隔的仿真结果为 290.0s。图 4 所示流程的计算结果为 $W=288s$, 与仿真结果较吻合。

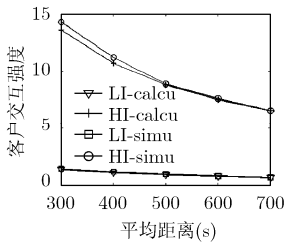


图 5 C II 与平均距离的关系

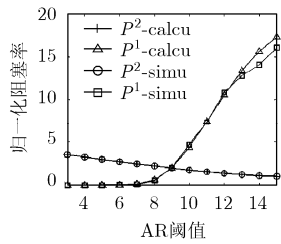


图 6 阻塞率与 AR 阈值的关系

从图 7 还可以看出, 不同的组播间隔对系统性能有较大影响。为进一步说明这一点, 图 8 给出了当给定参数集(CII, λ)下, RMFS 归一化的信道容量需求随组播间隔 W 变化情况的数字结果。可以看出, 3 种参数集情况下的最佳阈值分别约为 125.0s(SetA), 95.0s(SetB), 85.0s(SetC), 式(5)计算结果为 127.3s, 98.6s 和 85.5s。数据结果同时表明, 在客户阻塞率一定的情况下, 随着 CII 和 λ 的增大, 最佳组播间隔减小。

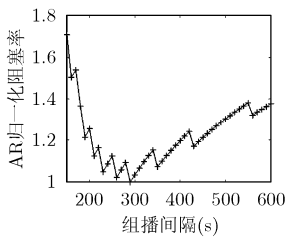


图 7 阻塞率与组播间隔的关系

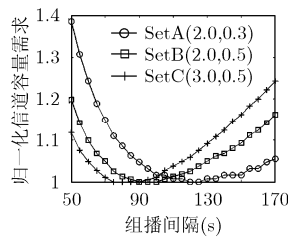


图 8 容量与组播间隔的关系

4.3 RMFS信道容量需求验证

给定客户交互参数集(0.03, 0.03, 0.01, 0.01, 500)和(0.3, 0.3, 0.1, 0.01, 500), 分别记为 LI 和 HI。图 9 给出了 RMFS 信道容量需求随客户到达率的变化情况。为便于比较, 图中还给出了由未采用 RMFS 的补丁方案的信道容量需求计算结果, 分别用符号“with”和“without”表示。可以看出, 计算结果和仿真结果吻合很好。另外, 在较低的交互强度下, 补丁方案的信道容量需求略高于 RMFS 方案。随着 CII 的

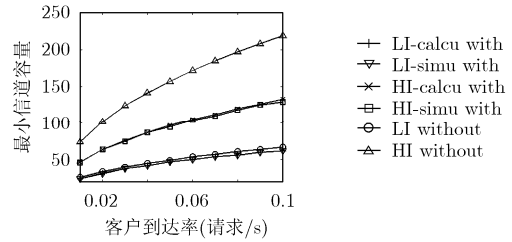


图 9 容量与客户到达率的关系

增大, 在图示情形下, 要取得相同的 QoS 指标, RMFS 方案能够至少节约 40%的信道容量。

4.4 RMFS的适应性

给定 $C=60, \lambda=0.05$ (请求/s)和 $\lambda=0.15$ (请求/s), 客户交互参数集(0.03n, 0.03n, 0.01n, 0.01, 500), $n=1-7$ 。图 10 所示为使系统满足 IR 阻塞率要求条件下 l_1 和 l_2 随 CII 变化的情况。当 CII 变化时, RMFS 能够通过动态调整 W, l_1 和 l_2 来保证 IR 的 QoS。随着 CII 的不断增大, AR 阈值不断下降, 保证能够有更多的信道为 IR 服务, 使得 IR 阻塞率这一主要性能指标始终能够满足系统设计的要求。

4.5 客户端缓存影响

假设客户端缓存能够容纳 B 秒的数据。由于 RMFS 方案中最大的补丁流长度为 W 秒, 因此, 客户端缓存应满足 $B \geq W$ 。如果客户端缓存 $B < W$, 那么当需要的补丁流长度大于 B 时, 服务器需要为该客户发起一个从请求的视频播放点开始一直到视频结束的补丁流。在这种情况下, 补丁流长度增大, 占用信道更长的时间, 将降低系统性能。图 11 给出了 $C=24, W=879s, l_1=15, l_2=10, \lambda=0.01$ (请求/s)和客户交互参数集(0.03, 0.03, 0.01, 0.01, 500)下, AR 和 IR 阻塞率与客户缓存容量的变化关系。可以看出, 客户缓存的减小导致系统性能不断下降; 另一方面, W 大小的缓存已经足够, 再增大缓存对系统性能收益贡献不大。

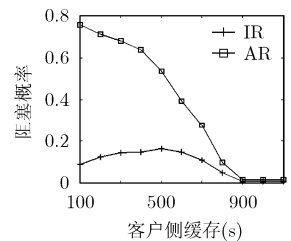
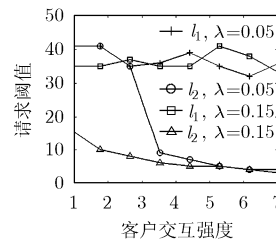


图 10 阈值与交互强度的关系 图 11 阻塞概率与客户缓存的关系

5 结束语

本文提出并分析了一种支持用户交互的常规组播固定调度方案 RMFS。RMFS 方案采用基于类的接纳控制机制, 并通过固定调度常规组播流来保证流合并中目标流的存在。文中对 RMFS 方案的最佳组播间隔, 请求类最佳阈值和所需服务器容量需求进行了分析。仿真结果证明了 RMFS 方案的

可行性。RMFS 支持零延迟播放, 可以应用到以补丁算法为代表的流合并调度算法中有效支持用户的 VCR 操作。

参考文献

- [1] Cai Y and Hua K A. Sharing multicast videos using patching streams. *Multimedia Tools and Applications*, 2003, 21(2): 125-146.
- [2] Hlavacs H and Buchinger S. Hierarchical video patching with optimal server bandwidth. *ACM Trans. on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, 2008, 4(1): 1-23.
- [3] Rocha M, Maia M, and Cunha I, *et al.* Scalable media streaming to interactive users. Proc. of ACM Multimedia, Singapore, November 2005: 966-975.
- [4] Ma H, Shin K, and Wu W. Best-effort patching for multicast true VoD service. *Multimedia Tools Applications*, 2005, 26(1): 101-122.
- [5] 单炜, 叶保留, 戴菡等. 支持VCR功能的扩展流合并算法 VCRSM的设计与实现. *计算机科学*, 2005, 32(3): 88-94.
Shan Wei, Ye Bao-liu, and Dai Han, *et al.* Design and implementation: An algorithm supporting VCR functions by extended stream merging. *Computer Science*, 2005, 32(3): 88-94.
- [6] Fonseca N L S and Rubinsztein H K S. Dimensioning the capacity of true video-on-demand servers. *IEEE Trans. on Multimedia*, 2005, 7(5): 932-941.
- [7] Wong Y W, Lee J Y B, and Li V O K, *et al.* Supporting interactive video-on-demand with adaptive multicast streaming. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2007, 17(2): 129-142.
- [8] Zhi Y J, Zhu Z J, and Ma X J, *et al.* Client-class based admission control for distributed video-on-demand systems. The IET Int. Conf. on Wireless, Mobile & Multimedia Networks, Hangzhou, China, November 2006: 1351-1354.
- [9] Ma H D and Shin K G. Performance analysis of the interactivity for multicast true vod service. Proc. of IEEE Conf. on Computer, Communication and Networks (IC3N), Arizona, USA, October 2001: 535-538.

智英建: 男, 1978年生, 博士生, 从事流媒体调度方面的研究.

汪斌强: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 从事宽带信息网络和核心路由器方面的研究.