

一种改进的分层多播拥塞控制方案

张 牧¹, 王 攀²

(1 贵阳学院 计算机科学系, 贵州 贵阳 550005; 2 南京邮电大学 江苏省通信与网络技术工程研究中心, 江苏 南京 210003)

摘 要: 针对分层多播接收者的可用带宽异构性问题, 提出了一种自适应动态分层多播拥塞控制算法 (ADLM). ADLM 自适应地运用最优层速率分配算法来满足接收者的异构性, ADLM 可以根据网络情况变化动态地调整分层的数量以及每一分层的层速率. 仿真实验表明, 该拥塞控制策略比分层组播控制常用的典型策略 (RLC) 更有效地利用网络带宽, 解决网络带宽的异构性问题, 同时 ADLM 是 TCP 友好的, 较好地改进了分层多播拥塞控制的性能.

关键词: 分层多播; 算法; TCP 友好

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)05-0018-05

Improved Layered Multicast Congestion Control Scheme

ZHANG Mu¹, WANG Pan²

(1 Department of Computer Science, Guiyang University, Guiyang 550005, China;

2 Jiangsu Province Engineering Research Center of Telecommunication & Network Technology,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: This paper introduced a dynamic layered multicast scheme, ADLM, to address layer multicast receivers' heterogeneity in available bandwidth. ADLM uses an optimal layer rate allocation algorithm which can maximally satisfy each receiver's available bandwidth. Through a novel feedback aggregate algorithm, ADLM dynamically determines the number of layers and the rate of each layer. Simulation results show that ADLM strategy can use network bandwidth more effectively than the RLC strategy, it also solves the problem of network bandwidth heterogeneity. And ADLM is TCP friendly, it can greatly improve the utility performance of layered multicast.

Key words: layered multicast; algorithm; TCP friendly

1 引言

异构性是 Internet 的固有特征, 接入网络的多样性以及端系统处理能力的差异是这种异构性存在的根源, 并且随着 Internet 规模的不断扩大, 异构性问题将更加突出. 多播的提出为异构网络环境部署多媒体多播应用提供了可行的方案, 其中数据分层多播技术以多种速率传输既满足了不同用户间的异构性和不同需求, 又避免了冗余数据传输带来的带宽浪费, 成为多播研究领域中的一个热点.

一种很有代表性的分层多播拥塞控制方案是收方驱动的分层多播传输协议 (RLM)^[1], 发送者在几个层上传输数据, 每层使用独立的多播组发送, 接收者可以同时从多层上接收数据, 如果接收者在一段时间内没有经历拥塞, 它将继续加入高一层的多播组. 如果发现包丢失, 接收者从它当前正在接收数据的最高层中退出, 在较低的层次上接收数据. RLM 在一定程度上解决了网络的异构性和动态性问题, 但其缺点在于网络带宽得不到充分利用, 没有考虑 TCP 友好性. RLC^[2]是继 RLM 后提出的满足 TCP

收稿日期: 2010-07-29; 修回日期: 2010-10-10

基金项目: 国家“八六三”基金项目 (2009AA01Z202, 2009AA01Z212); 江苏省自然科学基金项目 (BK2007603); 贵州省科技厅工业攻关项目 ((2008)3034); 贵阳市人才创新创新基金项目; 贵阳市科技局信息化专项项目

友好的分层多播拥塞控制算法,其新颖之处在于其在数据流中加入了同步点 SP (synchronization points), RLC 要求接受者只能在同步点才可以加入一个新的层次,每层的 SP 指数级递减,使相同瓶颈的接受者能同步地作出加入或离开的决策. RLC 的优势在于实现了 TCP 友好,但是静态的分层策略同样使得它不能很好适应网络的动态变化,并且在 RLC 中接收者的行为对路由器队列的长度非常敏感,不合适的队列长度可能误导接收者加入高层并产生大量的分组丢失. Byers 等人提出了动态分层机制 FLID-DL^[3],其核心是采用动态层的思想,即每一层的发送速率并不是固定不变的,而是周期性按照预先设置的模式变化. FLID-DL 协议是对 RLC 的显著提高,它不必经历长时间的离开间隔,使带宽在各层上分布更灵活. FLID-DL 的缺点是不能很好适应网络可用带宽的变化,不能显著提高网络带宽利用率和吞吐量. 基于丢失延迟的自适应算法 MLDA^[4]是由 Dorgham Sisalem 等人提出的,它结合了基于发送方与接收方拥塞控制两个概念,使用由实时传输协议 RTP 提供的 RTCP 来反馈消息,接收者通过 RTCP 向发送方报告它的接收速率. 发送方不断地调节各个层次的带宽来适应接收者的报告值,接收者独立地调整它们的层次数目以达到恰当的接收速率,这样 MLDA 综合了基于发送方与接收方拥塞控制两个概念. 然而为了计算速率,RTT 不得不在接收者处测量,这无疑增加了 MLDA 算法的复杂性,另外该算法还要求应用程序必须能将数据分布至动态的层次.

文中提出一种基于最优层速率分配算法的分层多播拥塞控制方案:自适应动态分层多播拥塞控制算法(ADLM). 提出 ADLM 的目的是有效提高网络带宽的利用率和吞吐量,ADLM 是一种自适应的、收方驱动的拥塞控制算法,发方根据收方提供的反馈信息及时地调整分层的数量和每一分层的层速率,提高网络带宽的利用率和吞吐量.

2 自适应动态分层多播拥塞控制算法(ADLM)

2.1 背景知识

对于异构的媒体,如音频或视频,由于它们的媒体特性不同,因此其编码方式不同. 对同种媒体,为了满足接收者异构性的要求,通常也常用特别的编码方式来形成多个子码流信号,接收者通过选择这些子码流信号来达到异构性服务的目标. 分层编码

就是以上编码技术中的一种. 如图 1 所示,分层编码将数字化媒体信息分解为多个子码流,子码流也叫层(layer). 分层编码将信源信息分层成多个离散的层,对低层子码流解码得到的是质量较低的信息;在收到多个子码流时候,解码器将这些子码流组合解码得到质量更高的信息. 在图中 L_0 叫基本层(base layer),它提供信源信息最基本的特征,其他层叫增强层(enhancement layer),它们在 L_0 基础上提供渐进的接收质量. 也就是说 L_0 对信息的恢复影响最大,对高层子码流的解码依赖于低层的子码流信息. 基本层和各增强层之间具有顺序关系,为了接收层,必须先接收前层,较低的层比较高的层具有更高的优先级.

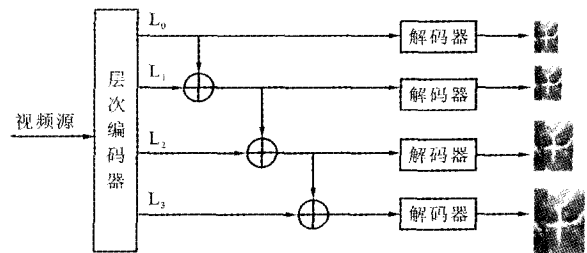


图1 分层编码的编解码原理图

分层编码技术最先应用在分组语音传送,如 CVSD 算法^[5],是一种抗信道误码非常好的语音编码算法. 在语音编码中,低层信息中包含了语音信号中最重要的比特位. 随后分层编码技术应用到图像和视频传输领域,由于图像和视频的信息量比语音的信息量要大得多,因此,视频压缩编码技术是多媒体信息技术应用的研究重点^[6].

我们用视频编码为例说明分层编码的主要思想:对于采样得到的视频帧序列 $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, 分层编码的目的是找到一种编码方式 E , 将帧信息映射到 L 个离散子码流中,即

$$E: C_k \rightarrow \{F_k^1, F_k^2, \dots, F_k^L\}$$

在接收者则需要一个相应的解码方式 D 来部分或者全部恢复原始帧信息,假设接收到 M 层 ($M \leq L$), 则有

$$D: \{F_k^1, F_k^2, \dots, F_k^M\} \rightarrow C_k^M$$

根据分层编码特点,当满足 $0 \leq M \leq N \leq L$ 时,存在一个适当的误差表示函数 d 满足以下关系式:

$$d(C_k, C_k^M) \geq d(C_k, C_k^N)$$

在理想状况下,若提供灵活可变的分层编、解码方式,那么信息源可以被划分为尽可能多的层以满足接收者的服务要求,理论上如果 M 个接收者有 K 种同的接收带宽 ($K \leq M$), 那么信息源划分为 K 层

就可以满足所有接收者的异构性服务要求. 但在实际应用中, 产生这些分层需要滤波器, 而分层编码中所用的滤波器的数目一般是固定的, 所以分层的数量也是固定的, 精确匹配所有接收者的服务需求的分层编码方案是不可能的. 按照这个分层编、解码思想, 利用分层编码器可以将信息源信息分解为一系列离散的层, 在网络传输中, 这些分层可以通过同一路径或者不同路径到达接收者. 在接收方, 利用解码器恢复信息, 恢复的信息质量与在有效时间内接收到的层数量有关.

2.2 ADLM 算法

文中规定 ADLM 算法中接收者的可用带宽依据经典的 TCP 友好经验公式^[7] 计算, 一方面它对发送者和网络没有特殊要求, 另一方面计算得到的可用带宽满足 TCP 友好. 该公式如下所示.

$$T = \frac{S}{RTT \sqrt{\frac{2P}{3} + t_0 \min(1, 3\sqrt{\frac{3p}{8}})p(1 + 32p^2)}} \quad (1)$$

ADLM 算法的动态性有两个方面的含义, 一是每一层的层速率是动态调整的; 二是分层的数量也是动态调整的. 在介绍 ADLM 算法前, 先定义一些参数.

n : 多播中接收者的数量

L : 编码算法所允许的最大分层数量

w : 实际分层数量

$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 接收者可用带宽的集, 按带宽递增顺序排列

Q_m : 加入第 m 层的接收者可用带宽的集 $1 \leq m \leq w$

$|Q_m|$: Q_m 的势

(q_m, c_m) : c_m 为可用带宽为 q_m 的接收者的数量

G_r : 编码粒度

r_m : 第 m 层的编码速率 $1 \leq m \leq w$

r_b : 算法允许的基本层最小层速率

ADLM 算法中基于吞吐量的最优化层速率分配问题如下:

定义 1 假设多播组中有 n 个接收者, q_m 是从发送者到第 m 个接收者的瓶颈链路带宽, 所有接收者分为 w 组, 那么, 系统吞吐量为

$$\sum_{m=1}^w r_m \cdot |Q_m| \quad (2)$$

因此, 最优化层速率分配问题可以转化为使式 (1) 的值最大化问题, 给定 Q 和最大允许分层数 L ,

找到一种接收者的化分 $Q_1, Q_2, \dots, Q_w$, 使得 $\sum_{m=1}^w r_m \cdot |Q_m|$ 的值最大化:

$$T(w) = \sum_{m=1}^w r_m \cdot |Q_m| \quad (3)$$

最优化层速率分配问题因此可以转化为使得 $T(w)$ 的值最大化问题.

我们对目标函数 (3) 进行如下的分析:

定理 1 在分层多播中, 接收者可用带宽 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, $R' = \{R_1, R_2, \dots, R_w\}$ 为最优吞吐量层速率分配解, 则 $R' \subseteq Q$.

证明: 若存在某个 R_i , 满足 $R_i \in R' \cap R_i \notin Q$. 对于 $R' = \{R_1, R_2, \dots, R_{i-1}, R_i, R_{i+1}, \dots, R_w\}$, 我们假设除 R_i 外的其他元素都属于 R , 即 $R_k \in Q$ 且 $k \neq i$. 我们可以找到某个 R'_i , 使得 R'_i 为 Q 中最小的大于 R_i 的元素, 即 $R'_i = \min\{q_i \mid q_i > R_i \cap q_i \in Q\}$. 在 R' 中用 R'_i 代替 R_i 得到 R'' , 显然 R'' 比 R' 更优, 因为 R'' 不会改变接收者的接收层次, 却能使得系统吞吐量更大, 这与 R' 是最优吞吐量层速率分配解矛盾.

证毕.

定理 2 在分层多播中, 对于任一可行层速率分配解 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_w\}$, 增加实际分层数 w 不会改变原来各层次的系统吞吐量. 如果系统吞吐量发生了变化, 则导致系统吞吐量改变的只能位于新增加的层次上.

证明: 若增加分层数, 假设由 w 增加为 v . 我们首先考虑最简单的情况, 令 $v = w + 1$. 根据累积分层的特点, 有 $R_v > R_w$. 对于任一接收最大层次属于前 $w - 1$ 层的接收者 i 都有 $q_i < R_w$, 因为如果可用带宽 $q_i \geq R_w$, 则此接收者应加入第 w 层. 这样一来, 增加分层数并不会改变本来就位于前 $w - 1$ 层的接收者的接收层次. 因此, 在增加分层数后, 可用带宽小余 R_w 的接收者接收层次仍将保持不变, 而可用带宽大于 R_w 的接收者才有可能继续加入新层, 这时存在两种情况:

(1) 如果对于新加层的层速率 R_v , 都有 $q_i < R_v$, $1 \leq i \leq n$, 则没有接收者加入新层, 此时系统吞吐量不会改变.

(2) 对于新加层的层速率 R_v , 如果 $\exists q_i \geq R_v$, 则 q_i 加入第 v 层, 系统吞吐量增大, 但 v 层之前的层的吞吐量并未发生改变, 因为 v 层之前的各层层速率不变. 系统吞吐量变大位于新的层次第 v 层上.

因此, 不论是情况 1 或者 2, 定理 2 都成立.

同理,当 $v = w + k, k > 1$ 时,定理 2 同样成立。证毕。

根据定理 2 我们有下面的推理:

推理 1 在分层多播中,对于任一可行层速率分配解 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_w\}$, 增加实际分层数 w 会使系统吞吐量非递减地增大。

定理 3 在分层多播中,最大系统吞吐量必定在分层数 w 等于最大可分层数 $L (w = L)$ 时达到。

证明:根据推理 1, 增加实际分层数 w 会使系统吞吐量非递减地增大, 因此当实际分层数达到最大可分层数时, 系统吞吐量最大。

证毕。

为了得到合适的 w 值和每一分层的层速率, ADLM 算法步骤如下。

假设基本层的层速率是固定不变的, 如 $r_1 = r_b$, 算法共有四个步骤:

(1) 可用带宽相同的接收者化分到同一分组, 这个分组可以用二元组 (q_m, c_m) 来表示, c_m 为可用带宽都为 q_m 的接收者的个数。在删除满足 $q_m < r_b$ 条件的二元组后, 剩余的二元组按 q_m 的增序组成集 $\{(q_m, c_m)\}$ 。

(2) 如果 $q_1 - r_b < Gr$, 令 $c_b = c_1$, 删除 (q_1, c_1) 项。

(3) 如果 $q_{m+1} - q_m < Gr$, 那么

① 如果 $q_m \cdot (c_m + c_{m+1}) > q_{m+1} \cdot c_{m+1}$, 令 $c_m = c_m + c_{m+1}$, 删除 (q_{m+1}, c_{m+1}) 项;

② 如果 $q_m \cdot (c_m + c_{m+1}) < q_{m+1} \cdot c_{m+1}$ 并且 $q_m \neq r_b$, 令 $c_{m-1} = c_{m-1} + c_m$, 删除 (q_m, c_m) 项;

③ 如果 $q_m \cdot (c_m + c_{m+1}) < q_{m+1} \cdot c_{m+1}$ 并且 $q_m = r_b$, 令 $c_m = c_m + c_{m+1}$, 删除 (q_{m+1}, c_{m+1}) 项。

经过上面的步骤, 算法建立了一个按 q_m 的增序组成的集 $\{(q_m, c_m)\}_{1 \leq m \leq K}$ 。然后令 $c_m = \sum_{j=m}^K c_j (1 \leq m \leq K)$, 最后形成了一个新集 $\{(q_m, c_m)\}_{1 \leq m \leq K}$ 。

(4) 如果 $K > L$, 那么删除在集 $\{(q_m, c_m)\}_{1 \leq m \leq K}$ 中值最小的二元组 (q_m, c_m) 。重复前面的步骤, 直到 $K \leq L$ 。(注意 (q_1, c_1) 项不能被删除因为这是基本层)

3 仿真与分析

我们在 ns-allinone-2.26^[8] 仿真环境下对 ADLM 算法进行了仿真, ADLM 算法的目标是提高网络带宽的利用率和吞吐量, 算法因此需要发送者根据网络的实际情况动态地调整编码分层的数量

和每一分层的层速率, 另外 TCP 友好性也是动态分层多播拥塞控制算法的目标。仿真结果如下:

3.1 ADLM 的动态分层性能

我们用图 2 所示的网络拓扑图来对 ADLM 的动态分层性能进行仿真评估, 假设数据源每秒产生的数据量大于 10 Mb, 编码粒度 $Gr \geq 2$ Mb/s, 最大允许的分层数 $L = 6$ 。

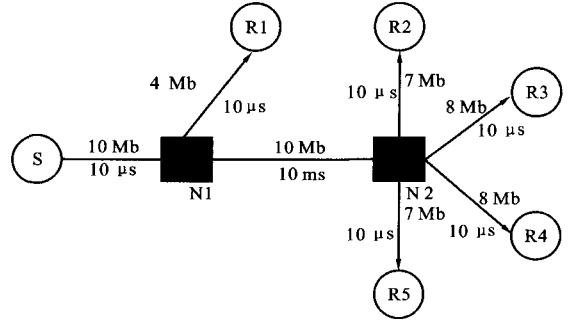


图 2 ADLM 的动态分层性能仿真实验拓扑图

在仿真实验中, 我们在 0~3 s 时间段内给中间结点 N1 和 N2 的链路上加一路带宽为 3 Mb/s 的会话, 在 3~7 s 时间段内给该链路加一路带宽为 6 Mb/s 和 3 Mb/s 间隔变化的会话, 两个速率持续的时间都为 1 s, 设置基本层速率 $r_b = 2$ Mb/s。

图 3 显示了 ADLM 算法在网络环境变化的情况下适时调节了分层数和每一层的层速率。基本层速率固定为 2 Mb/s, 在 0~3 s 时间段中, 受到了带宽恒定为 3 Mb/s 的会话影响, 链路可用带宽为 7 Mb/s, 数据源编码为 3 层: 基本层速率为 2 Mb/s, 增强层 1 的速率为 2 Mb/s, 增强层 2 的速率为 3 Mb/s。在 3~7 s 时间段中, 由于受到了带宽变化的会话影响, 链路可用带宽从 4 Mb/s 到 7 Mb/s 每秒间隔变化, 数据源固定产生 2 层 (基本层和增强层 1), 这 2 层的速率都为 2 Mb/s, 并且间隔一秒生成或者删除增强层 2, 该层的速率为 3 Mb/s。

3.2 ADLM 和 RLC 的吞吐量比较

我们做仿真实验对 ADLM 和 RLC 在同等条件下的吞吐量进行了比较, 实验所用的网络拓扑图如图 2 所示。我们在 0~3 s 时间段内为中间结点 N1 和 N2 的链路上加一路带宽为 3 Mb/s 的会话。在 3~7 s 时间段内给该链路加一路带宽为 6 Mb/s 和 3 Mb/s 间隔变化的会话, 两个速率持续的时间都为 1 s。对于 ADLM, 设定基本层速率为 2 Mb/s, 编码粒度 $Gr \geq 2$ Mb/s。对于 RLC, 我们假设基本层速率 $r_b = 1$ Mb/s, 因此增强层速率 $r_m = r_b * 2^{m-1}$, 分层数为 3 层。

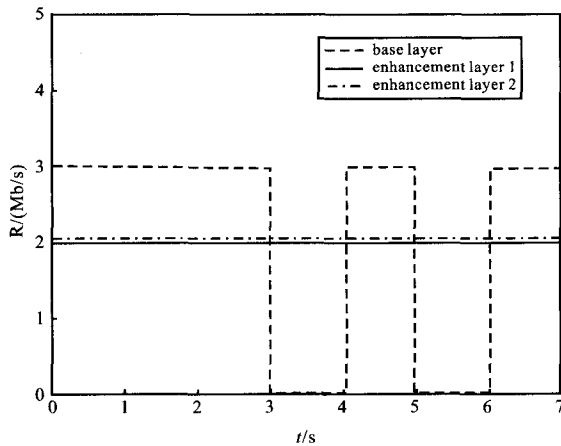


图3 ADLM的动态分层性能图

图4显示了ADLM和RLC在同等条件下的吞吐量性能比较,我们可以看出相比RLC,ADLM能获得较大的吞吐量,特别是在3~7s时间段中,ADLM在网络情况变化时比RLC能得到更大的吞吐量,ADLM的这个优点在于它能在适时根据网络情况调整分层数以及每一分层的数率。

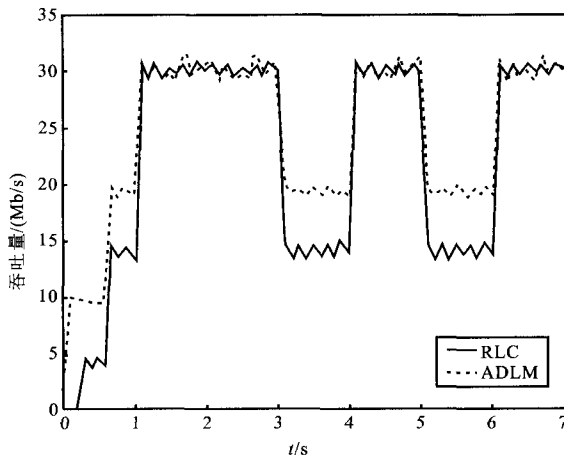


图4 ADLM和RLC的吞吐量比较

3.3 ADLM的TCP友好性

我们在拓扑(图5)上分别观察三个ADLM会话和三个RLC会话在完全相同条件下依次启动的吞吐量变化情况,三个会话分别是2-5,3-6,4-7,ADLM和RLC的结果分别如图6、图7所示。容易看出ADLM能够实现多播会话之间的公平性要求,而RLC却在条件完全相同的三个多播会话的吞吐量间造成很大的差别。

4 结束语

文中以多媒体多播应用为背景,提出了一种基于最优层速率分配算法的分层多播拥塞控制算法ADLM,并通过仿真实验对其进行了性能分析和验

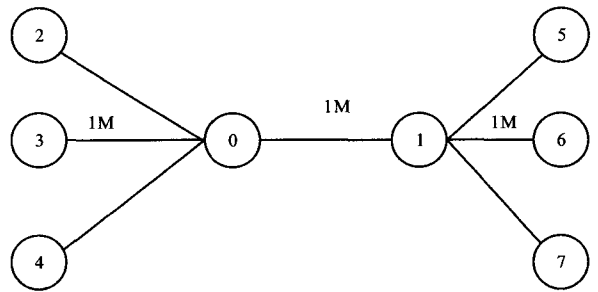


图5 多播会话间公平性实验拓扑图

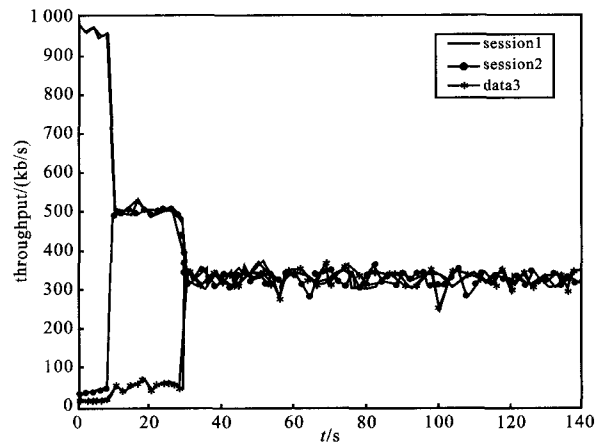


图6 ADLM实验结果图

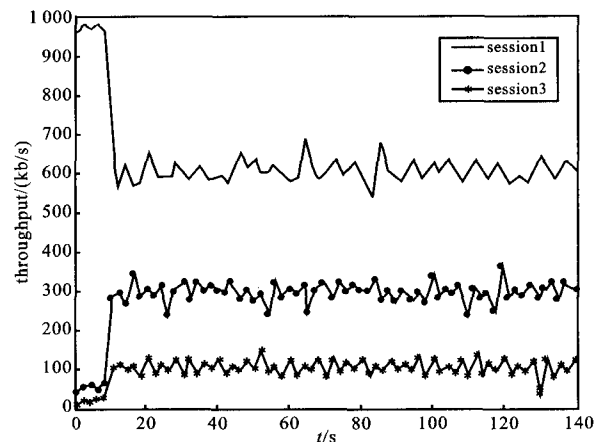


图7 RLC实验结果图

证,实验表明ADLM是TCP友好的,它可以明显提高网络带宽的利用率和网络吞吐量。进一步的工作将是在实际网络环境中实现该方案,并对ADLM的服务可定制性、可部署性等问题进行研究。

参考文献:

- [1] McCanne S, Jacobson V, Vetterli M. Receiver-driven layered multicast[C]// Proceedings ACM Sigcomm, Stanford, CA, Aug: ACM, 1996:117-130.

(下转第27页)

点,根据节点任务负载的不均匀性提出一种适用于无线传感器网络的 FB-DVS 算法.该算法通过 EDF 策略保证任务的实时性,并在反馈环节中根据已经执行完毕的历史数据对当前任务的执行时间进行修正,在保证整体任务实时性需求的前提下无线传感器网络节点工作在较低的频率和电压,从而减少节点能量消耗,延长无线传感器网络的生命周期.

参考文献:

- [1] 龚本灿,李腊元.基于生成树的无线传感器网络分布式路由协议[J].微电子学与计算机,2008,25(11):77-80.
- [2] 闵林,王飞飞,郭拯危,等.一种能量有效地无线传感器网络路由算法[J].微电子学与计算机,2010,27(5):66-69.
- [3] YC Lee, AY Zomaya, Minimizing energy consumption for precedence-constrained applications using dynamic voltage scaling[C]// Proceedings of 2009 9th IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid, Washington, DC USA; IEEE, 2009:92-99.
- [4] Chandrakasan A, Sheng S, Brodersen R. Low power cmos digital design[J]. IEEE Journal of Solid-State

Circuits, 1992(27): 473-484.

- [5] 王雪.无线传感器网络测试系统[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [6] Pouwelse J, Langendone K, sips H. Dynamic voltage scaling on a low-power microprocessor[C]// The Seventh Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Italy: ACM ISBN, 2001:251-259.
- [7] Pillai P, Shin K. Real-time dynamic voltage scaling for low-power embedded operating systems[C]// Proceedings of the eighteenth ACM symposium on Operating systems principles. USA: ACM, 2001:89-102.
- [8] Qadi A, Goddard S, Farritor S. A dynamic voltage scaling algorithm for sporadic tasks[C]// Proceedings of the 24th IEEE International Real-Time Systems Symposium. CanCun, Mexico: IEEE, 2003:52-62.

作者简介:

魏图明 男,(1985-),硕士研究生.研究方向为无线传感器网络能耗问题.

余思佳 女,(1978-),博士,讲师.研究方向为先进制造技术、制造业信息化理论及实践.

魏海龙 男,(1986-),硕士研究生.研究方面为无线传感器网络功耗管理.

(上接第22页)

- [2] Vicisano L, Rizzo L, Crowcroft J. TCP-like congestion control for layered multicast data transfer[C]// Proceedings IEEE INFOCOM, San Francisco, CA, Mar; IEEE, 1998:996-1003.
- [3] Byers J, Frumin M, Horn G, et al. FLID-DL: congestion control for layered multicast[C]// Proceedings of NGC 2000 on Networked Group Communication. NY, USA: ACM Press, 2000:71-81.
- [4] Sisalem D, Wolisz A. Mlda: a TCP-friendly congestion control framework for heterogeneous multicast environments[C]// IEEE Eighth International Workshop on Quality of Service (IWQoS 2000), Pittsburgh: IEEE, 2000:65-75.
- [5] 石念,陈向东,罗雪松.语音编码中的模糊增量调制算法[J].微电子学与计算机,2008,25(7):190-194.

- [6] 朱怀宏,姜永兵.一种基于块编码的压缩视频通信差控算法[J].微电子学与计算机,2008,25(9):69-71.

- [7] Padhye J, Firoiu V, Tow sley D, et al. Modeling TCP throughput: a simple model and its empirical validation [C]// Proceedings of ACM SIGCOMM '98. Vancouver, Canada: ACM, 1998:303-315.

- [8] NS: Network Simulator[EB/OL]. [2010-07-29]. Available: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.

作者简介:

张牧 男,(1980-),博士,副教授.研究方向为计算机网络.

王攀 男,(1979-),博士研究生.研究方向为下一代网络关键技术.