

一种 Ad Hoc 多播网络中的缓存优化策略

陈 卓^{1,2}, 陈黎霞²

(1. 重庆理工大学计算机科学与工程学院, 重庆 400054; 2. 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 成都 611731)

摘 要: 为实现 Ad Hoc 多播网络中丢失数据的源端恢复或本地恢复, 定义分组缓存效率和剩余缓存效率指标。在分析缓存效率最优问题的基础上, 提出一种缓存优化策略 OCT, 通过分布式缓存算法使系统尽可能逼近理论最优值。实验结果表明, OCT 能有效提高多播传输的可靠性, 减少丢失数据的恢复时间。

关键词: Ad Hoc 网络; 丢失恢复; 多播传输; 缓存策略; 缓存效率

A Cache Optimization Strategy in Ad Hoc Multicast Network

CHEN Zhuo^{1,2}, CHEN Li-xia²

(1. College of Computer Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Communications,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

【Abstract】 To realize the lost data source recovery or local recovery of Ad Hoc multicast networks, this paper defines grouping cache efficiency and remaining cache efficiency index. On the analysis of the optimal cache problem, it presents a caching optimization strategy Optimal Cache Time(OCT), through the distributed cache algorithm make the system as approximation of the theory optimal value. Experimental result shows that OCT can obviously improve the performance of multicast network and decrease the latency of data loss recovery.

【Key words】 Ad Hoc network; loss recovery; multicast transmission; cache strategy; cache efficiency

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.17.018

1 概述

Ad Hoc 网络中的可靠多播传输的目标是尽可能使所有的多播数据能传递给接收者, 实现数据的可靠传输。如果将一定量的缓存空间分配在源节点或中间节点上存储数据, 以备未来可能进行的重传请求, 就可实现丢失数据的源端恢复或本地恢复, 从而达到多播协议的可靠性目标。丢失数据恢复通常分为源端恢复和本地恢复, 其中源端恢复是保证数据恢复的最后保障, 而本地恢复可以减轻网络负担, 减少网络中数据的传输。因此, 通过源端恢复和本地恢复相结合的方法, 可以显著地提高丢失恢复的性能。而由于节点资源、缓存空间有限, 只有有限的分组能够存储在源节点或修复节点中, 因此优化缓存设计是研究的重点^[1-4]。

在当前研究中, 关于缓存策略的研究主要为 3 类: FIFO, P-FIFO, TBCP^[5-6]。FIFO 遵循先入先出原则, 在高速网络中, 过早地删除分组使得丢失恢复性能很低。P-FIFO 和 TBCP 都是为了解决分组过早删除的问题。P-FIFO 通过一定概率随机地挑选一个已存分组进行删除从而接受新分组。

本文重点研究缓存策略对整个丢失恢复机制的性能影响, 从模型建立和性能分析的角度进行讨论, 提出一种优化的数据缓存策略 OCT。

2 最优缓存模型

本文首先给出一个 Ad Hoc 网络中最优缓存的一般模型。假设在缓存策略中, 已有一定量的缓存空间分配给一个特定的多播组。缓存系统不对分组存在偏见, 所有到达的分组具有相同的优先级被存储。认为被丢弃的分组的缓存时间为 0。定义 t_i 为分组 i 的缓存时间, 定义效用函数 $U_i(t_i)$ 为缓存分组 i 对整个丢失恢复机制的性能贡献。这样, 缓存策略的设计目标是将丢失恢复缓存的缓存效用 U_B 最大化, 可以描述为:

$$\text{Maximize } U_B = \sum_i U_i(t_i) \quad (1)$$

满足:

$$\sum_i (s \times t_i) \leq s \times B \times T$$

其中, s 表示分组大小; B 表示以分组为单位的缓存空间; T 表示缓存系统的工作时间。将具有相同缓存时间的分组归为一类, n_k 表示第 k 类的分组数量。相应地, 设计目标

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2008ZX03004); 重庆市教委科技基金资助项目(KJ120825)

作者简介: 陈 卓(1980—), 男, 讲师、博士研究生, 主研方向: 分布式网络; 陈黎霞, 硕士

收稿日期: 2011-09-19 **修回日期:** 2011-12-12 **E-mail:** chenzhuo@cqu.edu.cn

可以表达为:

$$\text{Maximize } U_B = \sum_i n_k U_k(t_k) \quad (2)$$

在给定 s 、 B 和 T 情况下, 可以将式(2)转变成:

$$\text{Maximize } \frac{U_B}{s \times B \times T} \quad (3)$$

在一定量缓存空间下, 定义每单位缓存空间和每单位缓存时间的平均缓存效用为缓存效率。相应地, 有:

$$Y_B = \frac{U_B}{s \times B \times T} \quad (4)$$

$$Y_i(t_i) = \frac{U_i(t_i)}{s \times t_i} \quad (5)$$

其中, Y_B 表示整个缓存的缓存效率; Y_i 表示单个分组 i 的缓存效率。结合式(3)~式(5)可以得到:

$$\text{Maximize } Y_B = \sum_k \left(\frac{n_k t_k}{B \times T} \cdot \frac{U_k(t_k)}{s \times t_k} \right) = \sum_k a_k Y_k(t_k) \quad (6)$$

其中, a_k 表示第 k 类的缓存占用度:

$$a_k = \frac{n_k t_k}{B \times T} \quad (7)$$

从式(7)可以发现, 缓存效率是衡量缓存策略的性能指标, 它将缓存策略的性能与缓存单个分组的性能联系起来。该性质可以使缓存系统做出更好的缓存决策。由于难以评估受益于本地恢复的接收节点数目, 因此将 U_i 简化为从缓存系统中恢复的数据总量。每个从缓存系统中恢复的分组对丢失恢复系统具有相同的贡献。缓存系统的设计目标就等价于最大化缓存系统的数据恢复率。所以, 丢失恢复延时和源端重传将会减少。通过使用从缓存系统中恢复的数据总量来简化 U_i 的值, 这使得设计和执行缓存策略时非常有效。

3 分组缓存效率和剩余缓存效率

基于第 2 节的缓存模型, 定义 2 个评价缓存策略的性能指标用于考察缓存策略。

(1) 分组缓存效率: 定义数据延迟(NAK)延时小于等于 t s 时的概率为数据重传请求分布函数 $F(t)$, 数据重传请求的概率密度函数为 $f(t)$ 。如果缓存一个分组时间为 t s, 则期望能在缓存系统中恢复的数据总量为:

$$U = q \cdot s \cdot F(t) \quad (8)$$

相应地, 缓存效率为:

$$Y = \frac{U}{s \cdot t} = q \cdot \frac{F(t)}{t} \quad (9)$$

从式(9)可以得到缓存效率仅与分组请求率和 NAK 延时有关。甚至, 能令分组缓存效率最大的 OCT(Optimal Cache Time) t_0 仅与 $F(t)$ 有关。

(2) 剩余缓存效率: 时间 τ 称为分组已存时间。如果分组已经被缓存另一个 $t - \tau$ 周期, 则称在 $t - \tau$ 时间内的缓存效率为剩余缓存效率。使用上面的定义, (τ, t) 周期内的缓存效用为:

$$U(\tau, t) = q \cdot s \cdot [F(t) - F(\tau)] \quad (10)$$

剩余缓存效率为:

$$Y(\tau, t) = \frac{U(\tau, t)}{s \cdot (t - \tau)} = q \cdot \frac{F(t) - F(\tau)}{t - \tau} \quad (11)$$

得到的最大剩余缓存效率(MRCE)函数如下:

$$A(\tau) = \max_t Y(\tau, t)$$

4 缓存优化规则

基于分组缓存效率和剩余缓存效率, 分别提出 2 个优化规则, 用于最优缓存策略。

优化规则 1 最优缓存策略应该总是试着缓存分组, 以使缓存效率最大。

优化规则 2 当缓存必须进行分组丢弃时, 具有最低 MRCE 的分组, 即使它是新到达的分组, 也将被丢弃。

在 Ad Hoc 网络中, 由于节点移动有新节点加入 RS 服务范围, 缓存管理系统又会出现多个 MRCE 的极值。在这种情况下, 有时不考虑后期网络的变化, 丢弃当前时刻的最老分组是最佳决策。通过基于分组缓存效率的最优缓存时间来寻找一种优化的缓存方法。首先研究推出时间 τ_0 和最优缓存时间 t_0 之间的关系。从剩余缓存效率的定义中, 得到如下关系:

$$Y(0, t) = \frac{\tau}{t} \cdot Y(0, \tau) + \frac{t - \tau}{t} \cdot Y(\tau, t) \quad (12)$$

由下式:

$$Y(0, t_0) = \max_t Y(0, t) \quad (13)$$

可以得出:

$$Y(0, t) \leq Y(0, t_0), \forall t \geq t_0 \quad (14)$$

结合式(5)、式(6)得到:

$$Y(t_0, t) \leq Y(0, t_0), \forall t \geq t_0 \quad (15)$$

因为 $Y'(0, t)|_{t_0} = 0$, 结合式(11), 等价于:

$$q \cdot \frac{tF'(t) - F(t)}{t^2} \Big|_{t_0} = 0 \quad (16)$$

因此, 有:

$$F'(t_0) = \frac{F(t_0)}{t_0} \quad (17)$$

此外, 由下式:

$$Y(t_0, t) = q \cdot \frac{F(t) - F(t_0)}{t - t_0} \quad (18)$$

可以得出:

$$\lim_{t \rightarrow t_0} Y(t_0, t) = q \cdot F'(t_0) \quad (19)$$

结合式(4)、式(10)得到:

$$\lim_{t \rightarrow t_0} Y(t_0, t) = q \cdot \frac{F(t_0)}{t_0} = Y(0, t_0)$$

从式(8)~式(12), 得到:

$$A(t_0) = \max_t Y(t_0, t) = Y(0, t_0) = A(0)$$

5 实验结果与分析

本文使用 NS2^[7-8]作为仿真平台模拟不同缓存策略(包括 FIFO、TBCP、P-FIFO^[5-6]和 OCT)的性能, 并使用缓存匹配率和丢失恢复延时作为性能指标进行性能分析。在仿真中, 多播发送者先传输数据到 4 个接收者, 运行到 30 s 时, Recv5、Recv6 分别移入 RS2、RS3 的服务范围, 运行到 140 s 时, Recv1、Recv3 分别离开 RS2、RS3 服务范围。发送端产生的数据流服从泊松分布, 速率为 448 Kb/s。

每一个分组加上头部开销总长为 226 Byte。所有初始链路引起的传播延时为 20 ms, 丢失概率为 $p=0.01$ 。新生链路的链路延时为 30 ms, 丢失概率为 $p=0.01$ 。同时, 在末端链路上有 TCP 对话与该多播对话竞争, 所以, 每条末端链路有 2 个 TCP 对话和一个多播流。相应地, 分组会经历随机丢失和拥塞丢失。

本文使用上面的网络场景比较 OCT 对比 FIFO, P-FIFO 和 TBCP 的性能改进。图 1 给出 OCT、FIFO 和 TBCP 的缓存效率分析图。其中, TBCP 的定时器时间设置为从源端到最远接收者的 RTT 值^[2]。可以得到 OCT 总是达到最大缓存效率值。当 B/λ (λ 表示数据分组到达速率) 增加时, 无论网络如何变化, OCT 总能显著改进缓存系统的性能。

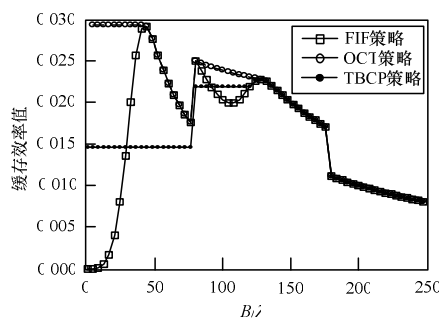


图1 缓存效率对比

图2为缓存策略的缓存匹配率。当缓存空间小于40时, OCT的性能显然比其他缓存策略好, 这是由于OCT的最优缓存时间设置造成的。OCT和P-FIFO之间的区别随着缓存空间的增大而降低, 当缓存空间超过50时, 差别几乎消失。由于OCT、P-FIFO和TBCP都尝试解决FIFO中的分组过早丢弃问题, 当在缓存空间较小时, OCT、P-FIFO和TBCP性能都比FIFO性能好。

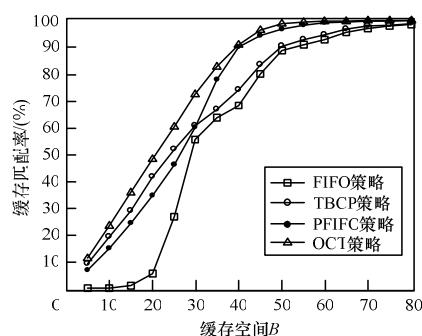


图2 缓存匹配率

当缓存空间增长到30时, 发现TBCP的性能衰退到FIFO, 这是由于TBCP中缓存时间控制机制的低响应度引起的。对于P-FIFO, 缓存概率的设置只对新到达的分组有效, 相应地, 对已存分组的缓存时间做了调整。然而, 缓存时间的调整对任意分组 i 的影响依赖于删除分组 i 时

需要额外的到达分组数量或者是分组 i 在队列中的位置。另外, 虽然P-FIFO下的缓存时间调整很迅速, 但是这只是对一小部分分组有效。通过性能仿真, 可以观察到OCT在一定的缓存空间下性能比其他缓存策略更优。因此, 通过比较分组缓存时间设置和分组的已存时间, 执行OCT缓存策略, 这样的设计是合理的。从另一角度也表明, 设计一个好的缓存策略, 能够降低可靠多播网络在丢失恢复延时恢复节点所需的缓存空间。例如, 为了使缓存匹配率达到90%, OCT和P-FIFO只需40个分组大小的缓存空间, 而FIFO需要50个~60个分组大小的缓存空间。

6 结束语

本文提出的最优缓存策略充分考虑了多播网络和Ad Hoc网络的特点, 并设计了缓存策略的通用模型。今后将把协作缓存技术与本文提出的最优缓存策略进行结合, 进一步提高Ad Hoc网络中数据的本地恢复能力。

参考文献

- [1] Sobeih A, Baraka H, Fahmy A. ReMHoc: A Reliable Multicast Protocol for Wireless Mobile Multihop Ad Hoc Networks[C]//Proc. of Consumer Communication and Networking Conference. Las Vegas, USA: [s. n.], 2004: 146-151.
- [2] Rajendran V. Reliable Multicasting in Ad Hoc Networks[D]. Santa Cruz, USA: University of California, 2003.
- [3] Feng Gang, Zhang Jingyu, Feng Xie. Buffer Management for Local Loss Recovery of Reliable Multicast[C]//Proc. of GLOBECOM'04. Dallas, USA: [s. n.], 2004: 1152-1156.
- [4] Jantan A, Hatem S A, Alsayh A. A New Scalable Reliable Multicast Transport Protocol Using Perfect Buffer Management[C]//Proc. of International Conference on Computer and Communication Engineering. Kuala Lumpur, Malaysia: [s. n.], 2008: 1201-1205.
- [5] Feng Gang, Yeung K L, Kheong S C. Optimal Cache Allocation and Probabilistic Caching for Local Loss Recovery in Reliable Multicast[C]//Proc. of ICC'00. New Orleans, USA: IEEE Press, 2000: 1401-1405.
- [6] Xie Feng, Feng Gang, Yang Xun. Optimizing Caching Policy for Loss Recovery in Reliable Multicast[C]//Proc. of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Barcelona, Spain: [s. n.], 2006: 23-29.
- [7] Network Simulator—NS2[EB/OL]. (2009-08-24). <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- [8] Tsai Ming-Fong, Shieh Ce-Kuen, Ke Chih-Heng, et al. Concurrent Multipath Transmission with Forward Error Correction Mechanism for Video Streaming in Wireless Networks[J]. Journal of Internet Technology, 2010, 11(4): 491-497.

编辑 陆燕菲