

具有层间冗余链路的应用层组播及其性能分析

龙白滔¹, 孙立峰¹, 陈文萍², 钟玉琢¹

(1. 清华大学计算机科学与技术系人机交互与媒体集成研究所, 北京 100084; 2. 中国人民大学信息学院, 北京 100872)

摘 要: 本文讨论了应用层组播环境下拥塞对扩展树性能的影响, 提出了使用层间冗余链路来增强扩展树稳定性的方法, 并且通过提出的统计链路模型和相关度模型, 对该方法进行了理论分析和性能评价. 数字仿真结果说明了统计链路模型有效地描述了应用层组播环境中发生的拥塞, 即使在高拥塞链路概率的情况下, 层间冗余链路的方法也能以较小的网络延迟代价, 显著地增强扩展树的稳定性. 本文提出的统计链路模型也可用来深入了解应用层组播的动态行为, 或者设计相应的拥塞控制算法.

关键词: 应用层组播; 统计链路模型; 层间冗余链路

中图分类号: TP3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 11-1844-05

Application-Layer Multicast with Inter-Level Redundant Links and Performance Analysis

LONG Bai-tao¹, SUN Li-feng¹, CHEN Wen-ping², ZHONG Yu-zhuo¹

(1. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Information, The Chinese People University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper investigates the impact of congestion on the performance of spanning trees in Application-layer Multicast (ALM) environments and proposes using redundant links between adjacent levels to enhance the stability of spanning trees. We analyze this approach by developing a simple statistical link model which describes congestion occurring in spanning trees and by introducing a dependency-degree factor which models the dependence between adjacent links. The numerical simulation results indicate that the statistical link model well describes the congestion occurring in spanning trees for ALM, and that even in case of high congestion probability, the redundant links scheme can significantly enhance spanning trees' resilience to congestion at a low cost of additional network delay. The proposed statistical link model is generic and can be utilized not only to further understand the dynamics in ALM, but also to design algorithms of congestion control for ALM.

Key words: application-layer multicast; statistical link model; inter-level redundant link

1 引言

IP 天然组播的先天不足, 限制了其在 Internet 上的广泛部署^[1]. 而作为另一种可选方案, 应用层组播 (Application-layer Multicast: ALM) 获得了广泛研究. 目前, 最普遍的方法是应用层实体自组织形成一个逻辑的覆盖网络, 并且使用单播传输服务沿着覆盖网络的边进行数据传输. 每个应用层实体只需要与临近的覆盖网络节点进行通讯. 因此, 这种邻近节点之间的数据转发在应用层实现了天然组播的数据转发功能.

目前 ALM 算法大概分为三类. 第一类算法首先构造一个网格 (或者图), 例如 RMX^[2] 和 ESM^[3], 并由此产生扩展树, 数据沿着扩展树传输. 在计算扩展树时需要在覆盖网络上运行一个路由协议, 因此增加了覆盖网络的复杂性并且限制了其应用规模. 第二类算法直接构造一棵单源的扩展树, 例如

NICE^[4], ZIGZAG^[5], Overcast^[6], Yoid^[7] 和 ALMI^[8], 所有应用都使用这棵树来传播数据. 使用单棵树的缺点是单个应用失效可能引起覆盖网络的分割. 在上述二类算法中, 节点之间互相关发送探测包测量网络层延迟, 测量结果被用来构造为网络层拓扑优化的覆盖网络. 第三类算法则将覆盖网络构造成具有某些特性的图, 例如 hypercube^[9] 和 Delaunay triangulation^[10,11], 这些特性使得在计算扩展树时无需运行路由协议. 其缺点是采用这类算法构造的扩展树相对网络层拓扑来说可能不是最优.

通常各种 ALM 算法中, 端用户之间使用传统的 TCP 或者 TCP 友好协议实现拥塞控制. 在扩展树中, 任何应用层链路的拥塞必定影响到其下游或者兄弟链路, 而现有的各种 ALM 算法都没有系统定量地考察这种影响. 本文的一个贡献在于提出了扩展树的统计模型, 并且利用这个模型定量分析了网络

收稿日期: 2003-12-23; 修回日期: 2004-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 60273008); 国家高技术研究发展计划 (863) (No. 2002AA119040)

拥塞对扩展树稳定性的影响。此外,现有的各种 ALM 算法或多或少考察了网络异常情况下(例如组成员异常退出等)算法的适应性。其实 ALM 中,每个发送-接收对之间存在一条独立的单播链路。利用这个特性,可以使用应用层的冗余链路来增强 ALM 算法对拥塞的适应性。本文的另一个贡献在于提出了使用节点到其父兄节点之间的层间冗余链路(Inter-Level Redundant Link: INTER-RL)来增强 ALM 算法对拥塞的适应性。

2 组播树网络性能评价指标

定义 1 在应用层组播环境中,如果一棵深度为 m 的组播树中分布了 $T(m)$ 个组播节点, (m) 表示发生拥塞时,一个或多个组成员离开对组播树节点数量带来的变化。 $E((m))$ 表示 (m) 的均值,本文定义组播树的稳定性因子 $F_s(m) = E((m))/T(m)$ 。

定义 2 在应用层组播环境中,一棵深度为 m 的组播树中分布了 $T(m)$ 个组播节点,链路具有单位网络延迟, $D(m)$ 表示所有不受拥塞影响的节点的网络延迟和。 $E(D(m))$ 表示 $D(m)$ 的均值,本文定义组播树的标准网络延迟 $F_D(m) = E(D(m))/T(m)$ 。

定义 3 在应用层组播环境中,一棵深度为 m 的具有冗余链路的组播树分布了 $T(m)$ 个组播节点,组播树切换至冗余链路引入单位切换延迟, $D_T(m)$ 表示所有不受拥塞影响的节点感受的切换延迟和。 $E(D_T(m))$ 表示 $D_T(m)$ 的均值,本文定义具有冗余链路组播树的标准切换延迟 $F_{D_T}(m) = E(D_T(m))/T(m)$ 。

显然, $F_s(m)$ 越高,组播树稳定性越差。也即,随着 $F_s(m)$ 增加,拥塞对组播树的影响会越来越大,更多的节点离开组播树。当然我们也可以定义稳定性因子越大组播树越稳定,其代价是 $F_s(m)$ 表达式稍微复杂一些。 $F_{D_T}(m)$ 越大,节点将因为拥塞的影响感到更长的网络的延迟。 $F_{D_T}(m)$ 表示冗余链路为增强组播树的稳定性而引入的单位开销。请注意本文定义的“标准网络延迟”含义与传统的“传输延迟”有差异。

3 组播树统计模型

为了解具有 INTER-RL 组播树中的拥塞,本文建立下面的会话模型:组成员包括 1 个发送端和多个接收端,分组沿最短路径转发至每个接收端;发送端位于树的根节点,叶子节点和承担接收-转发任务的中间节点都是接收端,每个接收端除了与自己的父亲节点建立实际的单播链路(图 1 实线所示)进行数据传输,同时与父亲节点的兄弟节点建立一条备份链路(图 1 虚线所示);在没有拥塞发生时,工作链路负责数据传输;一旦拥塞发生,传输立

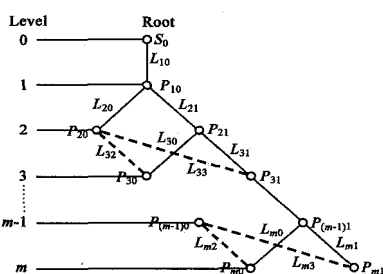


图 1 具有层间冗余链路的非平衡二叉树(深度 m)

刻由工作链路切换到备份链路;如果每层中的两条备份链路都发生拥塞,则发生拥塞链路以下所有节点同时离开组播树。特别地,当发生拥塞却没有节点离开的时候,链路切换会时常发生。因此,发生切换的链路以下的所有节点可能因此感受到瞬态的网络延迟。为了简化模型分析,本文只考虑有限深度的 INTER-RL 非平衡二叉树模型(图 1)。本文主要研究链路拥塞与组播树网络性能的关系,而拥塞与拥塞瓶颈的深度密切相关,因此仅仅考虑二叉树是合理的。

3.1 虚链路和随机链路模型

为了论述方便,本文引入如下定义。

定义 4 一个相关,具有 INTER-RL 且深度为 m 的非平衡二叉树由节点集合 P 、工作链路集合 L 和备份链路集合 \bar{L} 组成,且满足以下条件:

条件 1.所有的节点和链路在图 1 中有标记, P 表示可能拥塞节点的集合。

$$P = \{P_{10}, P_{20}, P_{m0}, P_{m1}\}, P = \{S_0\} \cup P$$

$$L = \{P_{10}, P_{20}, P_{21}, \dots, L_{m0}, L_{m1}\},$$

$$\bar{L} = \{L_{32}, L_{33}, \dots, L_{m2}, L_{m3}\}, \bar{L} = L \cup \bar{L}$$

条件 2. $0 < p_{ij} < 1 (0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq 3)$ 表示链路 L_{ij} 发生拥塞的概率。

条件 3.所有深度相同的链路(包括工作链路和备份链路)互不相关。

在 INTER-RL 组播树中,下游链路不仅与最近邻的上游链路相关,还与紧邻的备份链路相关;并且最近邻上游链路与备份链路属于同层链路。这种多重相关性导致失去文献[12]中上下游链路拥塞状态的马尔可夫特性。为了能继续使用马尔可夫模型分析 INTER-RL 组播树,本文引入“虚链路”的概念。

定义 5 由定义 4 定义的树中,数据分组可以通过任何一条深度为 i 的链路,进入和离开深度为 i 的虚链路 \bar{L}_i 。拥塞状态用随机变量 $X_i (X_i)$ 表示,满足 $X_i (X_i) \in \{0, 1\}$ 。

因为使用了冗余链路,任何一条深度为 k 的链路连通,就可以保证数据从第 $k-1$ 层到 $k+1$ 层的可达性。对于没有冗余链路的非平衡二叉树,任何一条深度为 k 的链路阻断,就能破坏这种可达性。可见冗余链路的使用确实增强了组播树对拥塞发生的抵抗性。

定理 1 定义 5 中虚链路 \bar{L}_i 的拥塞概率 \bar{L}_i 和使用备份链路的概率 \bar{L}_i 分别满足公式(1)和(2)。易知 $p_{ij} < p_{i1}$ 增加的备份链路确实降低了虚链路发生拥塞的概率。

$$Pr\{X_i = x_i\} = \begin{cases} p_i = \prod_j p_{ij}, & x_i = 1; \\ 1 - \prod_j p_{ij}, & x_i = 0; \end{cases} \quad (1)$$

$$= [p_{k0}(1 - p_{k2}) + p_{k1}(1 - p_{k3}) + p_{k0} \cdot p_{k1}(1 - p_{k2}) \cdot (1 - p_{k3})] / (1 - p_{ij}) \quad (2)$$

证明 见文献[13]中的定理 1 证明。

虚链路的物理意义在于,虚链路的连通性其实代表了数据通过深度为 i 的工作链路或备份链路的集合,到达下层链路可能性。简单的说,深度为 k 的虚拟链路代表了所有深度为 k 的链路对应用层统一表现的连通性。因此,容易看出,虚拟链路仅与最近邻上游虚拟链路相关,满足下面的表达式:

$$\begin{aligned} Pr\{X_k = x_k | X_{k-1} = x_{k-1}, X_{k-2} = x_{k-2}, \dots, X_1 = x_1\} \\ = Pr\{X_k = x_k | X_{k-1} = x_{k-1}\} \end{aligned} \quad (3)$$

我们只需要考虑上游虚拟链路的相关性, 因为对组播树拥塞的分析无需考虑下游虚拟链路. 因此, 只要已知最近上游虚拟链路的拥塞状态, 下游虚拟链路的拥塞概率分布函数就与最近邻上游虚拟链路之外的链路无关.

这是我们期望得到的近邻深度链路之间的离散马尔可夫特性, 因此我们得到[1]中已有的命题.

命题 1 在定义 5 中, 随机变量序列 $\{X_1, X_2, \dots, X_{k-1}, X_m\}$ 定义了一个 2 态马尔可夫链.

与传统的马尔可夫链定义有所不同, 命题 1 中定义的马尔可夫链中, 随机变量并非按时间索引, 而是根据中间虚链路的序列号对随机变量序列 $\{X_1, X_2, \dots, X_{k-1}, X_m\}$ 进行索引.

由定义 4 和命题 1, 我们可以直接得到 INTER-RL 组播树拥塞瓶颈的概率分布.

定理 2 如果 $m < \infty$, 那么在定义 4 中定义的组播树中, 最多存在一个拥塞瓶颈, 且中间虚拟链路 \bar{L}_k 成为拥塞瓶颈的概率用 $d(\bar{L}_k, m)$ 表示, 组播树不发生拥塞的概率用 (m) 表示, 那么:

$$\begin{aligned} d(\bar{L}_k, m) &= \begin{cases} Pr\{X_1 = 1\}, & \text{if } k = 1; \\ Pr\{X_1 = 0\} \times Pr\{X_k = 1 | X_{k-1} = 0\} \times \prod_{i=1}^{k-2} [1 - (1-p_i)p_{i+1}], & \text{if } 2 \leq k \leq m; \\ Pr\{X_{i+1} = 0 | X_i = 0\}, & \text{if } 2 \leq k \leq m; \end{cases} \quad (4) \\ (m) &= Pr\{X_1 = 0\} \times \prod_{i=1}^{m-1} Pr\{X_{i+1} = 0 | X_i = 0\} \end{aligned} \quad (5)$$

证明 见文献[13]中定理 2 证明.

3.2 相关度模型

这里引入文献[12]中定义的, 目前已经在网络性能分析领域获得应用的相关度因子 $(\rho, 0, 1)$ 来得到一步转移概率 $Pr\{X_{i+1} = x_{i+1} | X_i = x_i\}$.

定义 6 对两个相关的链路拥塞状态 X_{i+1} 与 X_i , 如果 $Pr\{X_{i+1} = x | X_i = x\} > Pr\{X_{i+1} = \bar{x} | X_i = x\}$, 那我们说 X_i 与 X_{i+1} 正相关; 如果 $Pr\{X_{i+1} = x | X_i = x\} < Pr\{X_{i+1} = \bar{x} | X_i = x\}$, 我们说 X_i 与 X_{i+1} 负相关, 其中 $x \in \{0, 1\}$.

以定义 6 为基础, 下面的定理 3 建立两个随机变量的相关度模型, 同时还给出了一步转移概率 $Pr\{X_{i+1} = x_{i+1} | X_i = x_i\}$ 的数学表达式.

定理 3 考虑定义 5 中定义的马尔可夫链 $\{X_i\}$, 如果 $\{X_i\}$ 是正相关的, 用 $\rho = (\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_{m-1})$ 表示相关度矢量, $p = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ 表示虚链路拥塞概率矢量, 那么下面的结论成立:

结论 1: $\exists \rho_i \in [0, 1]$, ρ_i 是随机变量 X_i 和 X_{i+1} 之间的相关度因子, 那么 $Pr\{X_{i+1} = x_{i+1} | X_i = x_i\}$ 的表达式如下:

$$Pr\{X_{i+1} = 0 | X_i = 0\} = \begin{cases} 1 - (1 - \rho_i) p_{i+1}, & \text{if } p_i \geq p_{i+1}; \\ (1 - \rho_i) (1 - p_{i+1}) + \rho_i \left(\frac{1 - p_{i+1}}{1 - p_i} \right), & \text{if } p_i < p_{i+1} \end{cases} \quad (6)$$

$$Pr\{X_{i+1} = 1 | X_i = 0\} = \begin{cases} (1 - \rho_i) p_{i+1}, & \text{if } p_i \geq p_{i+1}; \\ (1 - \rho_i) p_{i+1} + \rho_i \left(\frac{p_{i+1} - p_i}{1 - p_i} \right), & \text{if } p_i < p_{i+1} \end{cases} \quad (7)$$

3.3 INTER-RL 组播树统计性能

将公式 (6) 和 (7) 代入公式 (4) 和 (5), 可以得到 INTER-RL 组播树拥塞瓶颈的概率分布的表达式. 那么虚链路成为拥塞瓶颈的概率和组播树不发生拥塞的概率分别为

$$\begin{aligned} d(\bar{L}_k, \rho, p, m) &= \begin{cases} p_i, & \text{if } k = 1; \\ (1 - p_i) (1 - \rho_{k-1}) p_k \cdot \prod_{i=1}^{k-2} [1 - (1 - \rho_i) p_{i+1}], & \text{if } 2 \leq k \leq m \end{cases} \quad (8) \\ (m, \rho, p, m) &= (1 - p_1) \cdot \prod_{i=1}^{m-1} [1 - (1 - \rho_i) p_{i+1}], \quad m \geq 2 \end{aligned} \quad (9)$$

定理 4 对定义 4 中定义的一棵深度为 m ($2 \leq m < \infty$) 的 INTER-RL 组播树, 有 $2m - 1$ 个用户分布在组播树中, 如果对 $0 < p_{ij} = p < 1$ 且 $0 < \rho_i < 1$, 令 $y = 1 - (1 - p)^4$, $z = 1 - (1 - p)^2$, 下面的结论成立:

结论 1: 虚链路 \bar{L}_k 成为拥塞瓶颈的概率 $d(\bar{L}_k)$ 、组播树不发生拥塞的概率 (m) 及虚链路 \bar{L}_k 使用备份链路的概率 (m) 分别为:

$$\begin{aligned} d(\bar{L}_k, \rho, p, m) &= \begin{cases} p, & \text{if } k = 1; \\ (1 - p) (1 - z), & k = 2; \\ (1 - p) (1 - y) \cdot z \cdot y^{k-3}, & 2 < k \leq m; \end{cases} \quad (10) \\ (m, \rho, p, m) &= (1 - p) \cdot z \cdot y^{m-2}, \quad m \geq 2 \quad (11) \\ &= \frac{2p - p^2 + p^3}{(1 + p)(1 + p^2)} \quad (12) \end{aligned}$$

结论 2: INTER-RL 组播树稳定性因子 $F_s(\rho, p, m)$ 有如下表达式:

$$F_s(\rho, p, m) = \begin{cases} p, & \rho = 1 \\ 1 - \frac{1 - p}{2m - 1} - \frac{2 \cdot z \cdot (1 - p) (1 - y^{m-1})}{(1 - y) (2m - 1)}, & \rho = 1 \end{cases} \quad (13)$$

结论 3: INTER-RL 组播树标准网络延迟 $F_D(\rho, p, m)$ 有如下表达式:

$$F_D(\rho, p, m) = \begin{cases} \frac{(1 - p)(m^2 + m - 1)}{(2m - 1)}, & \rho = 1 \\ \frac{z \cdot (1 - p) [5y - 4y^2 + y^3 - 2(m + 1)y^m + 2m \cdot y^{m+1}]}{y(y - 1)^2(2m - 1)} + \frac{(1 - z)(1 - p)}{(2m - 1)}, & \rho = 1 \end{cases} \quad (14)$$

结论 4: INTER-RL 组播树标准切换延迟 $F_{D_r}(\rho, p, m)$ 有如下表达式:

$$F_{D_r}(\rho, p, m) = \begin{cases} \frac{z \cdot (1 - p)(m - 2)}{(2m - 1)}, & \rho = 1 \\ \frac{z \cdot (1 - p)(y - y^{m-1})}{(1 - y)(2m - 1)}, & \rho = 1 \end{cases} \quad (15)$$

定理 4 的证明请参见文献[13]中的定理 4 证明.

4 数学评价

本文用模拟的方法来考察参数对系统性能的影响.

图 2(a) 说明了当相关度因子 α 改变时, $d(\bar{L}_k, p, m)$ 相对于拥塞瓶颈深度的变化曲线。图中说明: (1) $d(\bar{L}_k, p, m)$ 是严格递减函数, 这是我们期望的属性, 因为拥塞瓶颈更容易出现在深度较浅(离源节点较近)的节点上。(2) 对于所有低于某临界深度 m^* 的拥塞瓶颈, 在 INTER-RL 组播树中具有更低的 $d(\bar{L}_k, p, m)$ 。相对较深的节点, 较浅节点的拥塞能影响更多的节点。因此我们期望浅节点具有较小的拥塞瓶颈发生概率。算法有效地将拥塞概率平衡到深层节点, 从而增强树的稳定性。(3) 链路相关度越高, m^* 越大。我们可以理解当

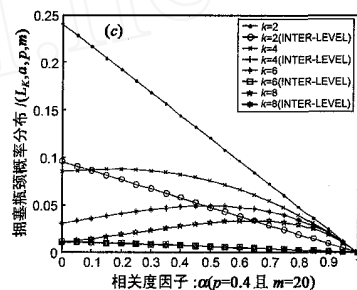
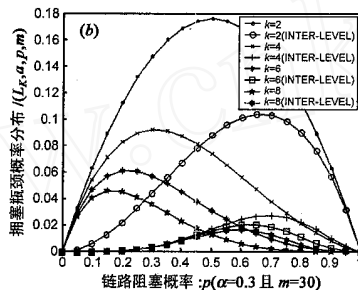
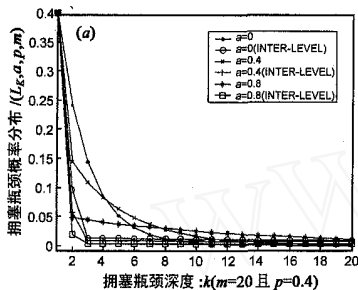


图 2 拥塞瓶颈概率分布

图 3(a) 给出对不同的 α , 组播树稳定性因子 $F_s(\alpha, p, m)$ 对 m 的变化曲线。观察到: (1) 链路的相关程度 直接影响到组播树的稳定性。越大, 组播树的稳定性因子越低, 拥塞发生时, 组播树受影响越小。(2) 随着组播树中用户数量的增加, 组播树变得越来越不稳定。(3) 随着和组播树深度变化, INTER-RL 组播树的稳定性因子大幅低于普通组播树, 说明 INTER-RL 方法有效性和广泛的适应性。

图 3(b) 给出对不同的 p , 组播树稳定性因子 $F_s(\alpha, p, m)$ 对 m 的变化曲线。观察到: (1) 在高拥塞网络中, 组播树的稳定性较差。(2) INTER-RL 组播树 $F_s(\alpha, p, m)$ 变化曲线明显比普通组播树平坦很多, 说明想对后者, 前者对不同树深度和拥

节点负载较多的子节点的时候, 链路具有较高的相关性。这说明算法对于高负载的网络环境是有效的。

图 2(b) 说明了 $d(\bar{L}_k, p, m)$ 与拥塞瓶颈深度成反比。观察到: (1) 对任意 k , 存在一个唯一最大值 $d^*(\bar{L}_k, p, m)$ 。(2) 同一对应的两条曲线在某临界拥塞概率 p^* 相交, 低于 p^* 所有拥塞概率, 冗余链路具有更低的拥塞瓶颈概率。可观察到, k 越小, p^* 越大, 说明算法对较浅的节点的高拥塞网络环境具有更强的适应性。这是我们期望的特性。

塞概率都有非常稳定的性能, 并且在低拥塞概率时, 前者变化曲线更平坦, 表现出更强的适应性。(3) p 非常明显地影响组播树稳定性。即使在比较低的链路拥塞概率下 ($p = 0.02$), 对于一定深度 ($m \geq 10$) 的普通组播树, 也有超过 50% 的用户离开组播树; 相同情况下, INTER-RL 将受影响的用户数控制在 20% 左右。

图 4(a) 给出对不同的 α , 标准切换延迟 $F_D(\alpha, p, m)$ 对 m 的变化曲线。观察到: (1) INTER-RL 方法延迟开销较小, 且性能稳定; 对于不同相关度, 深度超过 10 的组播树的 $F_D(\alpha, p, m)$ 收敛到 0.1 单位切换延迟。(2) 对比观察 $p = 0.2$ 时图 3(b) 曲线, 可知 INTER-RL 方法以约每节点 0.1 单位切换延迟

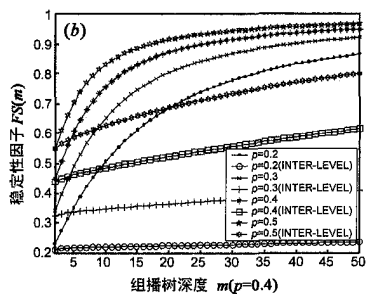
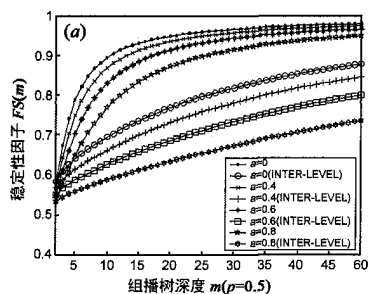
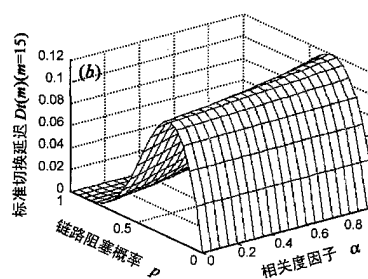
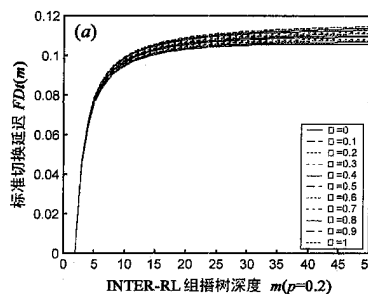
图 3 组播稳定因子随 m 的变化曲线

图 4 标准切换延迟变化

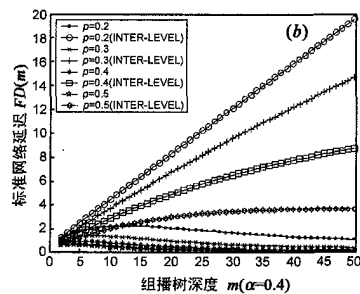
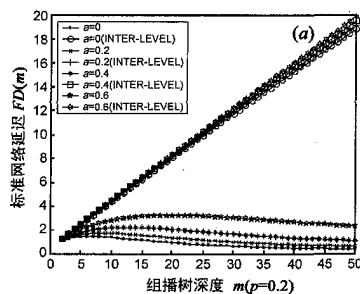


图 5 标准网络延迟变化曲线

的代价,换来高得多的组播树稳定性,这说明了该方法的有效性.

图 5(a), (b) 分别给出不同的 α 和 p , 标准网络延迟 $F_D(\alpha, p, m)$ 对 m 的变化曲线. 观察到: (1) INTER-RL 组播树始终有较大的网络延迟. 这是因为冗余链路使组播树稳定性增强, 减少拥塞发生, 更少的节点受到拥塞的影响, 因此 INTER-RL 组播树具有较大的网络延迟. (2) $F_D(\alpha, p, m)$ 相对 α 和 p 的变化曲线很稳定, 接近线性规律, 这是我们期望的特性. (3) 相关度的变化 $F_D(m)$ 对影响较小, 特别是 INTER-RL 组播树. $F_D(\alpha, p, m)$ 受链路拥塞概率影响较大. p 越大, 组播树越不稳定, 更多节点受拥塞影响离开组播树, 因此 $F_D(\alpha, p, m)$ 变小.

5 结论

本文考察了 ALM 中, 拥塞对扩展树的影响, 并讨论了使用层间冗余链路来增强扩展树稳定性的方法. 文中提出了一种统计链路模型并且定义了虚链路的概念, 以了解和表达 INTER-RL 组播树链路拥塞的相关性. 文中还引入了相关度因子模型, 评价了相邻应用层链路的相关程度. 通过这些模型, 得到了 INTER-RL 组播树中拥塞瓶颈概率、稳定性因子、标准网络延迟和标准切换延迟的表达式, 以量化和评价拥塞对 INTER-RL 组播树的影响. 模拟的结果表明, 统计链路模型很好描述了 ALM 扩展树中发生的拥塞, 也显示 INTER-RL 方法有效地增强了组播树对拥塞的适应性. 典型地, 当 $p = 0.2$, $\alpha = 0.4$ 时, 普通组播树约有 50% 的节点离开组播树, 而 INTER-RL 方法却能以较小的开销 (0.1 单位切换延迟), 将受拥塞影响而离开组播树的节点数目控制在 20% 左右.

在以后的工作中, 我们将本文的分析模型扩展到更一般化的平衡叉树模型中. 此外, 在 ALM 中, 兄弟节点之间的层内冗余链路也可用来增强组播树稳定性. 我们准备将这种分析模型扩展到具有层内冗余链路的扩展树中.

参考文献:

- [1] Diot C, Levine B N, Lyles B, Kassem H, Balensiefen D. Deployment issues for the IP multicast service and architecture[J]. IEEE Network, 2000, 1(14): 88 - 98.
- [2] Chawathe Y, McCanne S, Brewer E A. RMX: Reliable multicast for heterogeneous networks[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM[C]. Tel Aviv, Israel: IEEE Communication Society, 2000. 795 - 804.
- [3] Chu Y, Rao S, Zhang H. A case for end system multicast[A]. Proceedings of ACM SIGMETRICS[C]. Santa Clara, CA, USA: ACM Press, 2000. 1 - 12.
- [4] Banerjee S, Bhattacharjee B, Kommareddy C. Scalable application layer multicast[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM (ACM SIGCOMM '02)[C]. Pittsburgh, PA, USA: ACM Press, 2002.
- [5] Tran D, Hua K, Do T. ZIGZAG: An efficient peer-to-peer scheme for media streaming[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM[C]. San Francisco, CA, USA: IEEE Communication Society, 2003. 1 - 10.
- [6] Jannotti J, Gifford D, Johnson K L, Kaashoek M F, O'Toole J W. Overcast: Reliable multicasting with an overlay network[A]. Proceedings of the Fourth Symposium on Operating System Design and Implementation (OSDI)[C]. San Diego, CA, USA: USENIX Association, 2000. 197 - 212.
- [7] Francis P. Yoid: Extending the Internet Multicast Architecture[R]. USA: AT&T Center for Internet Research at ICSI (ACIRI), 2000.
- [8] Pendarakis D, Shi S, Verma D, Waldvogel M. ALMI: An application level multicast infrastructure[A]. Proceedings of the 3rd USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems (USITS)[C]. San Francisco, CA, USA: USENIX Association, 2001. 49 - 60.
- [9] Liebeherr J, Beam T K. HyperCast: A protocol for maintaining multicast group members in a logical hypercube topology[A]. Proceedings of First International Workshop on Networked Group Communication (NGC '99)[C]. Pisa, Italy: Springer Press, 1999. volume 1736, 72 - 89.
- [10] Liebeherr J, Nahas M, Si W. Application-Layer Multicast with Delaunay Triangulations[R]. USA: University of Virginia, 2001.
- [11] Wong W C, Chan S H. Improving delaunay triangulation for application-level multicast[A]. Proceedings of IEEE Globecom '03[C]. San Francisco, CA, USA: IEEE Communications Society, 2003.
- [12] Zhang X, Shin K G. Statistical analysis of feedback-synchronization signaling delay for multicast flow control[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM[C]. Anchorage, Alaska, USA: IEEE Communications Society, 2001. 1133 - 1142.
- [13] 龙白滔, 钟玉琢. 增强应用层组播环境中扩展树的稳定性[R]. 北京: 清华大学计算机科学与技术系, 2003.
- [14] 魏蛟龙, 张驰. Internet 拥塞控制和资源分配中的对策论分析框架[J]. 电子学报, 2003, 31(10): 1452 - 1455.

作者简介:



龙白滔 男, 1975 年出生, 1999 年毕业于清华大学计算机科学与技术系, 现为该系博士研究生, 主要研究方向是异构网络流媒体.

孙立峰 男, 1972 年出生, 2000 年毕业于国防科技大学, 获博士学位, 现为清华大学计算机科学与技术系讲师, 博士后, 主要研究方向为交互多视点视频, 异构网络流媒体.