

文章编号: 1001-0920(2007)08-0869-04

一种基于遗传算法的半动态应用层多播协议

程 鹏, 吴秋峰, 戴琼海
(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘 要: 将半动态应用层多播通信分解为静态起始和动态维护两种阶段交替出现的过程. 在起始阶段, 采用基于遗传算法的多播路由机制构建优化的静态多播树; 在维护阶段, 采用拓扑维护机制、路由性能监控机制和路由更新机制, 对多播拓扑的动态进行快速响应. 仿真结果表明, 该协议同时具备优化多播树性能和快速维护多播拓扑的能力, 改善了通信过程中多播树的整体性能.

关键词: 多播; 应用层多播; 半动态多播; 多播路由; 遗传算法

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

An unitary dynamic application layer multicast protocol based on genetic algorithms

CHENG Peng, WU Qiufeng, DAI Qionghai

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Correspondent: CHENG Peng, E-mail: chengpeng00@mails.tsinghua.edu.cn)

Abstract: Application layer multicasting process is divided into two phases, starting phase and maintaining phase. Based on system modeling and performance evaluating analysis, a protocol based on genetic algorithms is proposed to handle the both phases. During the starting phase, routing scheme based on genetic algorithms is used to optimize the overall performance of original multicast tree under several constraints. During the maintaining phase, topology recovery scheme, performance watching scheme and route updating scheme are proposed to quickly handle the frequent topology dynamics. Numerical simulations show that, compared to existing protocols, the proposed protocol improves the performance of original multicast tree and the average performance of multicast tree during the multicast process.

Key words: Multicast; Application layer multicast; Unitary dynamic multicast; Multicast routing; Genetic algorithms

1 引 言

多播通信协议将数据源发出的信息同时发送到多个用户. 近年来, 多播中的信息复制与转发机制逐渐从网络层设备转移到应用层节点上, 这样的机制被称为应用层多播^[1-4]. 应用层多播协议将多播组成员组织到两个拓扑中: 网状的控制拓扑和树状的数据拓扑. 数据拓扑是控制拓扑的子集, 通过应用层多播路由算法建立.

典型的应用层多播通信是动态的, 多播组成员在通信过程中并不恒定. 根据多播组成员的网络状态是否恒定, 还可将动态应用层多播通信进一步区分为半动态和全动态两种: 前者中多播组成员虽然发生变化, 但每个成员的网络状况不变; 后者中的多

播组成员和网络状况都发生变化. 半动态应用层多播过程是实际应用中最常见、最具代表性的通信环境.

应用层多播协议可分为两类: 一类侧重于对多播组的变化进行快速响应, 采用简单的路由规则^[1-3], 放弃了对多播树性能的优化; 另一类应用层多播协议将多播路由归纳为多个指标约束下的优化问题, 采用启发式算法进行路由求解^[5-7]. 这类协议能取得较好的路由, 但系统开销较大, 适用于多播组成员在通信过程中固定的静态多播过程^[8]. 半动态应用层多播过程既需要经过优化的多播树, 又需要能快速进行基础设施维护, 而现有的这两类多播协议并不能完全满足半动态多播的需求.

本文将半动态应用层多播通信过程划分为静态

收稿日期: 2006-04-20; 修回日期: 2006-07-07.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60432030).

作者简介: 程鹏(1979—), 男, 山西阳泉人, 博士生, 从事多播自适应控制和复杂媒体网络的研究; 吴秋峰(1936—), 男, 江苏宜兴人, 教授, 博士生导师, 从事企业网络与集成制造等研究.

起始阶段和动态维护阶段,将文献[5]提出的基于遗传算法的静态应用层多播路由算法应用于多播起始阶段的路由优化.针对多播维护阶段的拓扑变化,设计了拓扑维护机制、路由性能监控机制和路由更新机制,从而构成了完整的半动态应用层多播协议.仿真实验表明,本文提出的协议既能综合考虑多方面的性能并进行初始多播树的优化,又能在多播组发生变化时迅速对多播树进行维护和更新.

2 应用层多播路由性能评价

在任意时刻,都可将网络归纳为有向图 $M(H, P, c)$,该有向图由一个包含 $|H|$ 个终端的非空集合 H 和一个包含 $|P|$ 条单播路径的非空集合 P 构成, $P \subseteq H \times H$.这些单播路径称作元路径. N 为网络层路由器的集合, E 为这些路由器之间链路的集合, $E = \{e_i | i \in N, i \in E\}$, $E \subseteq N \times N$.

记 t 时刻应用层多播组节点集合为 H' ,对应的元路径集合为 P' , $H' \subseteq H, P' \subseteq P$.应用层多播路由算法的目标是建立一棵覆盖 H' 中所有节点的树 T' ,即给定 G, H', P' ,求 $T'(H', P')$, $F \subseteq P'$. T' 应在开销、应用层业务负载分布和网络层业务负载分布3方面的约束下建立.

分别采用如下3个函数评估多播树在这3方面的性能:

$$f_1 = 1 - C(T)/C(M), \quad (1)$$

其中 $C(M)$ 是 M 中所有元路径的开销之和.

$$f_2 = \begin{cases} \max_h \text{rat } d_T(h), & \text{if } \max_h \text{rat } d_T(h) < 1; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $d_{\max}(h)$ 为终端 h 的度数上限, $d_T(h)$ 为 h 在 T' 中的度数, $\text{rat } d_T(h) = d_T(h)/d_{\max}(h)$.

$$f_3 = \begin{cases} \max_e \text{rats}_T(e), & \text{if } \max_e \text{rats}_T(e) < 1; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $s_{\max}(e)$ 和 $s_T(e)$ 分别为树 T' 中链路 e 被重复使用的次数上限和实际被重复使用的次数, $\text{rats}_T(e) = s_T(e)/s_{\max}(e)$.

多播树的综合性能评价函数为上述3个函数的加权之和,即

$$f = \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3. \quad (4)$$

综合性能评价函数对3方面性能的侧重程度可通过AHP算法^[9]给出的权值设置体现.

文献[5]中设计了基于遗传算法的静态应用层多播路由机制,将每棵多播树描述为一个染色体,根据式(4)给出的函数考察染色体的适值,通过种群进化对多播树性能进行优化.其仿真结果显示,较之DT协议中使用的Compass路由^[1,10]和ALMI协议中使用的双向共享树路由^[2],文献[5]提出的路由

算法能全面改进多播树在这3方面的性能.

3 应用层多播维护阶段协议设计

基于遗传算法的静态应用层多播路由机制适用于多播起始阶段,而多播维护阶段的协议则需应对多播组成员动态变化频繁的特点.如果在多播通信中始终采用文献[5]中的算法进行路由,那么多播拓扑的每次变化都需重新启动启发式多播路由算法,这会造成极大的系统开销,无法对拓扑的变化作出及时反应.

本节设计了综合考虑开销和应用层业务负载分布两方面性能的拓扑维护机制,采用式(4)给出的性能评价函数监控任意时刻的多播树性能.协议采用集中控制方式,设立会聚节点对多播通信进行管理.

3.1 节点加入多播树时的拓扑维护机制

当原先不属于多播组的节点 h_{new} 希望加入多播组时,首先应向协议会聚节点提出加入申请.会聚节点从多播树中的根节点开始,逐层寻找 h_{new} 的父节点.

定义多播树第 j 层的节点集合为 $L_j, L_j = \{m_i | i = 1, 2, \dots, |L_j|\}$,为 L_j 中每个元素定义变量

$$F(m_i) = d_{\max}(m_i) - d_T(m_i) - 1, \quad (5)$$

这一变量称为 m_i 在 h_{new} 加入时的可用度,描述 m_i 是否有度数可提供给 h_{new} .

如果 L_j 内有节点在 h_{new} 加入时的可用度为正数,则取其中与 h_{new} 距离最近的一个作为 h_{new} 的父节点;否则,会聚节点离开第 j 层,前往第 $(j+1)$ 层搜索.如果当前多播树内所有节点都没有多余的度数可提供给 h_{new} ,则取树中与 h_{new} 距离最近的节点作为 h_{new} 的父节点.

图1(a)描述了新成员加入多播树的过程,其中多播树根节点的度数上限为3,其他节点的度数上限为2.当 h_{new} 加入多播树后,它会选择除父节点之外的若干多播组成员建立元路径,加入控制拓扑.

3.2 节点退出多播树时的拓扑维护机制

当节点 h_{quit} 退出多播树时,记 h_{quit} 子节点集合为 $P, P = \{q_i | i = 1, 2, \dots, |P|\}$.为 P 中每个元素定义两个变量,即

$$A(q_i) = \max(d_{\max}(q_i) - d_T(q_i) - (|P| - 1), 0),$$

$$D(q_i) = \min_{j \in P} d(q_i, q_j) / |P|. \quad (6)$$

变量 $A(q_i)$ 为 q_i 在 h_{quit} 退出多播树时的可用度,描述 P 中元素 q_i 是否有足够的度数提供给除自己外 P 中所有其他元素;变量 $D(q_i)$ 为元素 q_i 与集合 P 的距离.

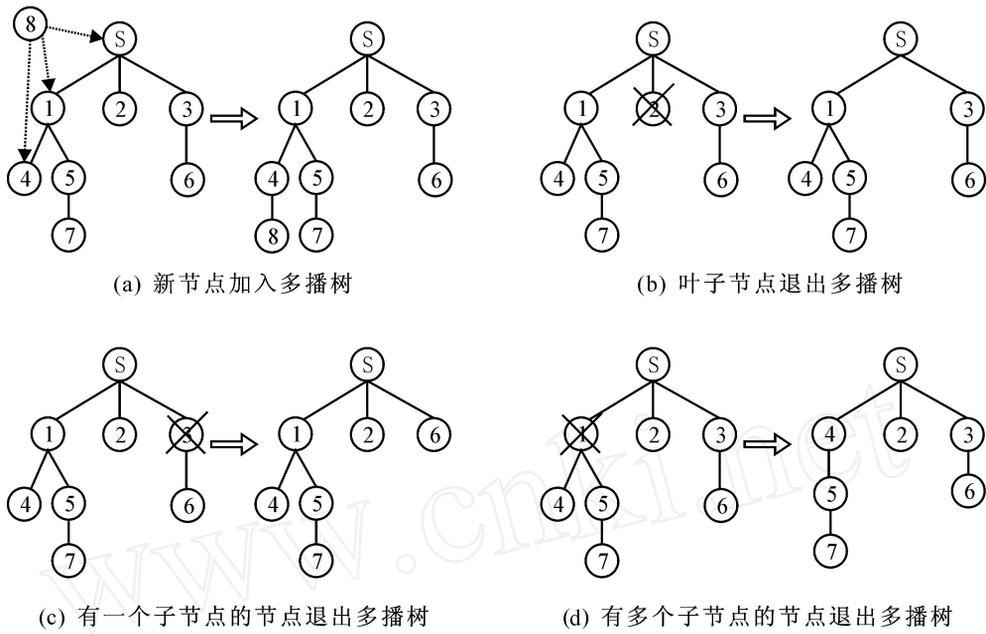


图 1 拓扑维护机制

如果 P 中存在 h_{quit} 退出多播树时可用度为正的节点, 则取其中可用度最大的节点代替 h_{quit} 在多播树中的位置; 否则, 选择与 P 距离最小的节点. 这一规则可表述为

取 w 代替 h_{quit} 在多播树中的位置,

$$\text{if } \max(A(q_i)) > 0,$$

$$\text{then } w = \arg \max_i (A(q_i));$$

$$\text{otherwise } w = \arg \min_i (D(q_i)). \quad (7)$$

特别地, 如果 h_{quit} 为叶子节点, 则 P 为空集, h_{quit} 退出多播树对其他节点没有影响, 如图 1(b) 所示. 如果 h_{quit} 只有一个子节点, 那么该子节点将代替 h_{quit} 在多播树中的位置, 子节点之下的数据拓扑保持不变, 如图 1(c) 所示. 图 1(d) 描述了拥有多个子节点的节点退出多播组时的状况, 其中多播树根节点的度数上限为 3, 其他节点的度数上限为 2.

3.3 适值监控与路由更新

多播路由库更新: 当有新节点加入时, 需为新加入的节点建立路由库, 并对原有的路由库进行整理, 以反映新建立的元路径对于原有可选路由的影响. 当有节点退出多播组时, 也需进行类似的工作. 在更新路由库时, 那些当前正被多播树使用的路由必须被保留下来.

多播树适值更新: 多播拓扑每次发生变化后都需计算该时刻控制拓扑中所有元路径的开销之和 $C(M, t)$, 进而根据更新后的路由库计算出该时刻多播树在 3 方面的适值分别为 $f_1(t), f_2(t), f_3(t)$, 多播树的总适值为 $f(t)$.

启动离线更新路由方案: 当某一时刻多播树的

适值已达到某一预定的条件时, 协议将重新启动基于遗传算法的多播路由算法, 取算法的输出作为新的多播路由方案, 实现多播树的更新.

4 仿真实验

4.1 仿真设置

采用与文献 [5] 相类似的仿真环境. 仿真网络拓扑由 GT-ITM^[11] 工具生成, 分布在 100×100 的平面上. 底层网络中包括 1 个主干子网, 8 个主干路由器、8 个接入子网和 64 个接入路由器. 终端数量为 50 个, 每个终端都通过一个 4×4 的局域网与一个接入路由器相连. 两个路由器之间的链路开销设置为两者之间的距离, 终端与路由器之间的链路开销为 1. 两两终端之间元路径存在的概率为 0.4. 遗传算法种群规模为 10. 所有终端的度数上限为 4. 主干网路由器之间的链路被使用次数上限设为 10; 接入网路由器之间的链路被使用次数上限设为 4; 主干网路由器与接入网路由器之间的链路被使用次数上限设为 8.

测试中的起始多播组包含了 20 个终端节点. 多播进行过程中, 多播组外的节点每一时刻以 0.1 的

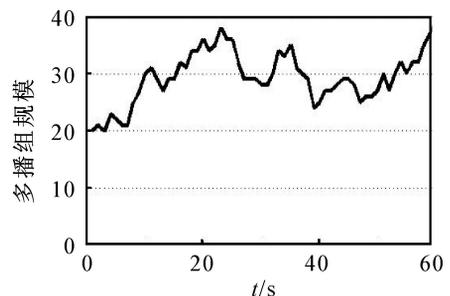


图 2 仿真多播组规模

概率加入多播组,多播组内原有的节点则在每一时刻均以 0.05 的概率退出多播组.多播通信过程设定为 60 s.图 2 描述了根据上述设定进行的一次多播通信中多播组规模变化情况.

4.2 仿真结果

遗传算法中的种群规模设定为 5,变异概率为 0.2,3 方面适值函数在综合适值函数中的权重按照文献[5]中由 AHP 算法给出的结果设置,且 $w_1 + w_2 + w_3 = 3$.建立初始多播树时遗传算法执行代数上限为 500 代,在通信过程中进行路由更新时的遗传算法执行 200 代.

当协议监控到当前的多播树适值下降到前一次通过遗传算法进行路由更新后(包括建立初始多播树)适值的 90% 时,启动路由更新机制.

在图 2 描述的通信过程中,分别采用本文提出的多播协议、DT 协议和 ALMI 协议得到的多播树综合适值和开销适值变化状况如图 3 所示.在该多播通信过程中,随着拓扑的变化,一共启动了 3 次路由更新操作,分别发生在第 14、38 和 58 s.由图 3 可以看出,本文提出的协议在多播通信的起始阶段就建立了性能良好的多播树,在多播通信过程中既能对拓扑的频繁变化作出迅速的响应,又能通过路由更新机制将多播树的性能维持在较高的范围之内.

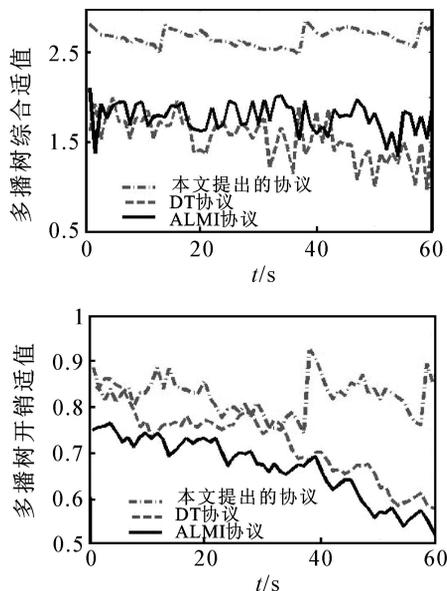


图3 单次仿真结果

单独考察在综合性能评价中权重最大的开销性能可以发现,采用本文提出的多播协议时,多播树的开销适值在拓扑变化过程中相对稳定,而采用 DT 协议和 ALMI 协议得到的多播树的开销适值在通信进行过程中出现了明显的下降趋势.

图 4 给出了按照 4.1 节的设置重复进行 10 次仿真的平均结果.采用本文提出的协议,在通信过程中平均启动 3.8 次路由更新操作,这些更新操作将

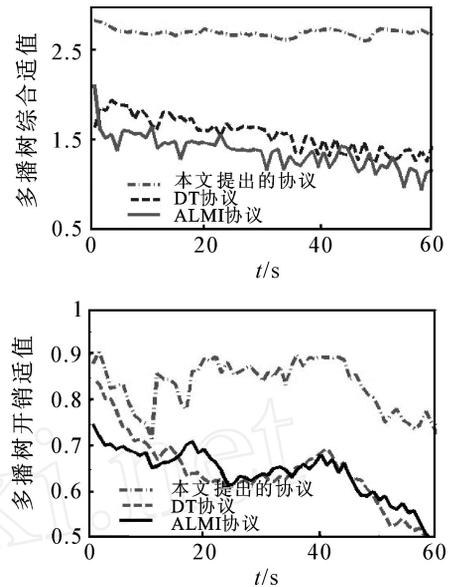


图4 多次仿真的平均结果

通信过程中多播树的适值保持在 2.50 以上,在整个通信过程中多播树的平均适值为 2.637.采取 DT 协议和 ALMI 协议构建的多播树性能在通信过程中呈现出降低的趋势,其多播树的平均适值为 1.493 和 1.722.具体考察多播树的开销性能,采用本文提出的协议构建的多播树在整个通信过程中的平均开销适值为 0.841,要明显优于采用 DT 协议和 ALMI 协议构建的多播树,后两者的平均开销适值分别为 0.707 和 0.658.

5 结语

本文将基于遗传算法的应用层多播路由机制应用于起始阶段的多播树建立,综合考虑了开销、应用层负载均衡和网络层负载均衡 3 方面的性能,建立了多播树的综合性能评价函数,得到了经过优化的起始多播树.针对多播维护阶段的特点,本文设计了多播拓扑维护机制、路由性能监控机制和路由更新机制,对多播树的性能进行实时监控,并通过不定期的路由更新维持多播树的性能.这些机制与针对多播起始阶段的起始拓扑建立机制组合起来,建立了一个完整的半动态应用层多播协议.

仿真实验表明,较之现有的基于几何规则的应用层多播协议^[1,2,10],本文提出的协议改进了初始多播树的性能,对多播过程中的拓扑变化能够迅速响应,维持多播拓扑的完整.由于多播树性能下降到一定程度后都会触发路由更新机制,从而大幅改进了路由性能.根据本文提出协议建立的多播树在半动态通信过程中的平均性能指标也有明显改进.

如果多播拓扑在通信过程中不发生变化,本文提出的协议就相当于在静态多播环境中建立起始多播路由的过程.

(下转第 877 页)

参考文献(References)

- [1] Saaty T L. The analytic hierarchy process [M]. New York: McGraw Hill, 1980.
- [2] 骆正清, 杨善林. 层次分析法中几种标度的比较[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(9): 51-60.
(Luo Zheng-qing, Yang Shan-lin. Comparison of some scaling in AHP[J]. System Engineering and Practice, 2004, 24(9): 51-60.)
- [3] 吕跃进. 层次分析法标度系统评价研究[C]. 决策科学理论与方法. 北京: 海洋出版社, 2001: 50-58.
(Lv Yue-jin. Research of scaling system of AHP[C]. Decision Science Theory and Methodology. Beijing: Press of Ocean, 2001: 50-58.)
- [4] Saaty T L. Fundamentals of decision making and priority theory [C]. RWS Publications. Pittsburgh, 1994: 1-127.
- [5] 刘奇志. 层次分析积因子方法的特性及其理论基础[C]. 决策科学理论与方法. 北京: 海洋出版社, 2001: 19-33.
(Liu Qi-zhi. Characteristics and theory base of factored product method of AHP[C]. Decision Science Theory and Methodology. Beijing: Press of Ocean, 2001: 19-33.)
- [6] 李登峰. 模糊多目标多人决策与对策[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
(Li Deng-feng. Decisions and countermeasures for fuzzy multiobjectives and multitemen [M]. Beijing: Press of National Defense Industry, 2003.)
- [7] 张跃. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
(Zhang Yue. Methodology and application of fuzzy mathematics [M]. Beijing: Press of Coal Industry, 1992.)
- [8] 唐有文. 模糊层次分析法[J]. 青海师范大学学报, 2002, (3): 19-23.
(Tang You-wen. Fuzzy AHP[J]. J of Qinghai Normal University, 2002, (3): 19-23.)
- [9] 吴殿廷, 李东方. 层次分析法的不足及其改进的途径[J]. 北京师范大学学报, 2004, 40(2): 264-268.
(Wu Dian-ting, Li Dong-fang. Disadvantages of AHP and improvement approach [J]. J of Beijing Normal University, 2004, 40(2): 264-268.)
- [10] 马荣国, 杨立波. 一种基于模糊理论的 AHP 改进算法[J]. 长安大学学报, 2002, 22(2): 92-94.
(Ma Rong-guo, Yang Li-bo. Improved arithmetic of AHP based on fuzzy theory [J]. J of Chang'an University, 2002, 22(2): 92-94.)
- [11] Aczel J, Alsina C. Synthesizing judgments: A functional equations approach [J]. Applied Mathematical Modelling, 1987, 9(3): 311-320.

(上接第 872 页)

参考文献(References)

- [1] Liebeherr J, Nahas M, Si Weisheng. Application-layer multicasting with delaunay triangulation overlays [J]. IEEE J on Selected Areas in Communications, 2002, 20(8): 1472-1488.
- [2] Pendarakis D, Shi S, Verma D, et al. ALMI: An application level multicast infrastructure [C]. Proc of 3rd Usenix Symposium on Internet Technologies and Systems. San Francisco, 2001.
- [3] Ratnasamy S, Handley M, Karp R, et al. Application level multicast using content-addressable networks [C]. Proc of 3rd Int Workshop on Networked Group Communication. U K, 2001: 14-29.
- [4] Chu Y H, Rao S G, Zhang H. A case for end system multicast [C]. Proc of ACM Sigmetrics. Santa Clara, 2000: 1-12.
- [5] 程鹏, 吴秋峰, 戴琼海. 基于遗传算法的应用层多播路由方案 [J]. 控制与决策, 2006, 21(4): 381-385.
(Cheng Peng, Wu Qiu-feng, Dai Qiong-hai. Application layer multicast routing solution based on genetic algorithms [J]. Control and Decision, 2006, 21(4): 381-385.)
- [6] Shi S Y, Turner J S. Routing in overlay multicast networks [C]. Proc of IEEE INFOCOM. New York, 2002: 1200-1208.
- [7] Pan Yun, Yu Zhen-wen, Wang Li-cheng. A genetic algorithm for the overlay multicast routing problem [C]. Proc of ICCNMC 03. Shanghai, 2003.
- [8] Waxman B. Routing of multipoint connections [J]. IEEE J Select Areas Commun, 1988, 6(9): 1617-1622.
- [9] Saaty T L. The analytic hierarchy process [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [10] Kranakis E, Singh H, Urrutia J. Compass routing on geometric networks [C]. Proc of CCCG. Vancouver, 1999: 51-54.
- [11] Zegura E W, Calvert K, Bhattacharjee S. How to model an internet network [C]. Proc of IEEE Infocom 96. San Francisco, 1996: 594-602.