

基于蚁群算法的 QoS 多播路由优化算法*

许毅, 李腊元

(武汉理工大学, 湖北 武汉 430063)

摘要: 蚁群算法是一种新型的随机优化算法, 能有效地解决 QoS 受限的多播路由问题。基于蚂蚁具有找到蚁巢与食物之间的最短路径原理工作, 并在分析多约束 QoS 的多播路由的基础上, 提出了一种具有全局优化能力的多播路由算法(OQMRA), 仿真实验表明了该算法是合理的和有效的。

关键词: 蚁群算法; 多播路由; QoS 约束

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1001-3695(2005)01-0183-03

An Optimizing of QoS Multicast Routing Based on Ant Colony Algorithm

XU Yi, LI La-yuan

(Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430063, China)

Abstract: Ant colony system is a new optimization algorithm and effectively solves the problem of multicast routing with QoS constraints. This paper mainly presents a globally-optimizing multicast routing algorithm (OQMRA) based on the ant colony's ability of finding the shortest path between their nest and the food source in the process of looking for food and analyzing multicast routing with multiple QoS constraints. Simulation results show that the algorithm is valid and effective.

Key words: Ant Colony Algorithm; Multicast Routing; QoS Constraints

1 引言

蚁群算法(Ant Colony Algorithm)是最近几年由意大利学者 M. Dorigo 提出的一种新型的模拟进化算法。该算法不依赖于具体问题的数学描述, 具有全局优化能力和本质上的并行性, 同时比遗传算法、模拟退火算法等早期进化算法具备更强的鲁棒性、求解时间短、易于计算机实现等优点, 已被应用于高度复杂的组合优化问题、通信网络的路由选择问题。蚁群算法是一种随机搜索算法, 与其他模拟进化算法一样, 通过由候选解组成的群体的进化过程来寻求最优解。

多播路由优化的目标是找到一种算法或策略, 在给定的网络和多播需求的情况下, 寻求一种链路连接方式, 使网络资源能够得到有效利用。近年来, 各国学者经过探索提出了一些快速有效的算法, 如基于最短路径的 Dijkstra 算法, 即计算源节点到各目的节点的最短路径; 求最小网络代价应用的斯坦利(Steiner)树路由算法, 计算多播树(Multicast Tree)使其在任意一对源和目的节点之间都存在通路, 并使其代价(Cost)最小。算法都是以服务质量(QoS)指标中的带宽、延时、延时约束和包丢失率等为优化选路准则, 提出了各种多播路由算法。

本文采用的蚂蚁算法是一种启发式算法, 该算法在求解旅行商问题(TSP)中取得了较好的实验结果。TSP 问题就是在给定的多个城市中寻找一条闭合的路径, 此路径要历经每个城

市且仅经过一次, 最后返回起始城市, 要求此路径长度最短。可以看出, QoS 多播路由问题与 TSP 问题相似, 因此可以用求解 TSP 的蚂蚁算法来求解 QoS 多播路由问题。同时, 通过路径选择的多样性保证全局的有效搜索, 使算法更快、更有效地找到全局最优解。大多数人已提出的 QoS 多播路由算法都只考虑了一个或两个限制, 并且都需要在每个节点保留整个网络状态。本文提出了一种新颖的基于蚂蚁算法的全局分布式优化路由算法, 考虑了五个路由限制, 并结合多播路由选择的具体要求构造新颖的全局优化蚂蚁算法来加以解决, 仿真实验证明了该方法是有效的。

2 QoS 多播路由模型

QoS 多播路由的目的就是在分布的网络中寻找最优路径, 要求从源节点出发, 历经所有的目的节点, 并且满足所有的约束条件, 达到花费最小或达到特定的服务水平。QoS 多播路由问题是 NP 完全问题。一个网络可表示成一个加权图 $G = (V, E)$, 其中, V 表示节点集, E 表示连接节点的通信链路集^[1]; $|V|$ 和 $|E|$ 分别表示该网络中的节点数和链路数。为不失一般性, 只考虑这样的一类图, 即在该类网络中, 一对节点之间最多只有一条链路, 链路旁的参数可用于描述该链路当前的状态。设 $p(s, t)$ 表示从源节点 s 至端节点 t 的路径, $T(s, M)$ 表示多播树, $s \in V$ 为一棵多播树的源节点, $M \subseteq V - \{s\}$ 为该多播树的端节点或叶节点集。设 \mathbf{R} 为正实数集, \mathbf{R}_+ 为非负实数集。对于任意链路 $e \in E$, 可定义某些 QoS 特征值(Metrics): 延迟函数 $\text{delay}(e): E \rightarrow \mathbf{R}^+$, 代价函数 $\text{cost}(e): E \rightarrow \mathbf{R}^+$, 带宽函数 $\text{bandwidth}(e): E \rightarrow \mathbf{R}^+$, 延迟抖动函数 $\text{delay-jitter}(e): E \rightarrow \mathbf{R}_+$ 。对于任意节点 $n \in V$, 也可定义某些 QoS 特征值(Metrics): 延迟

收稿日期: 2004-02-03; 修返日期: 2004-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60172035, 90304018); 湖北省自然科学基金资助项目(2000J154); 全国教育科学规划重点课题(AYA010034)

函数 $\text{delay}(n): V \rightarrow \mathbf{R}^+$, 代价函数 $\text{cost}(n): V \rightarrow \mathbf{R}^+$, 延迟抖动函数 $\text{delay-jitter}(n): E \rightarrow \mathbf{R}_+$, 包丢失函数 $\text{packet-loss}(n): V \rightarrow \mathbf{R}_+$ 。设 $T(S, M)$ 表示一棵多播树, 则有下列关系:

$$\text{delay}(p(s, t)) = \sum_{e \in p(s, t)} \text{delay}(e) + \sum_{n \in p(s, t)} \text{delay}(n) \quad (1)$$

$$\text{cost}(T(s, M)) = \sum_{e \in T(s, M)} \text{cost}(e) + \sum_{n \in T(s, M)} \text{cost}(n) \quad (2)$$

$$\text{bandwidth}(p(s, t)) = \min \{ \text{bandwidth}(e), e \in p(s, t) \} \quad (3)$$

$$\text{delay-jitter}(p(s, t)) = \sum_{e \in p(s, t)} \text{delay-jitter}(e) + \sum_{n \in p(s, t)} \text{delay-jitter}(n) \quad (4)$$

$$\text{packet-loss}(p(s, t)) = 1 - \prod_{n \in p(s, t)} (1 - \text{packet-loss}(n)) \quad (5)$$

QoS 多播路由问题主要涉及的元素有: 网络 $G = (V, E)$, 多播源节点 $s \in V$, 多播端节点集 $M \subseteq \{V - \{s\}\}$, $\text{delay}(\cdot) \in \mathbf{R}^+$, $\text{delay-jitter}(\cdot) \in \mathbf{R}_+$, $\text{cost}(\cdot) \in \mathbf{R}^+$, $\text{bandwidth}(\cdot) \in \mathbf{R}^+$ 和 $\text{packet-loss}(\cdot) \in \mathbf{R}_+$ 。实际上, QoS 多播路由问题是寻找一棵多播树 $T(s, M)$, 有下列 QoS 约束条件: ① $\text{delay}(p(s, t)) \leq D$; ② $\text{bandwidth}(p(s, t)) \geq B$; ③ $\text{delay-jitter}(p(s, t)) \leq J$; ④ $\text{packet-loss}(p(s, t)) \leq L$ 。

满足以上四个条件, $\text{cost}(T(s, M))$ 最小。其中, D 是延迟约束, B 是带宽约束, J 是延迟抖动约束, L 是包丢失约束。

模型中假设所有的多播终点的带宽约束相同, 而延时、延迟抖动和包丢失率约束可以互不相同, 网络结构模型中各边的特性用四元组 (d, j, b, c) 描述, 节点用四元组 (d, j, l, c) 表示。

3 基于蚁群算法的 QoS 多播路由优化算法 (OQMRA)

蚂蚁算法是一种基于种群的模拟进化算法。经过大量研究发现, 蚂蚁具有寻找蚁穴和食物源之间最短 (最优) 路径的能力, 这种能力是靠其在所经过的路径上留下的一种挥发性分泌物即信息素 (Pheromone) 来实现的。蚂蚁在一条路上前进时选择该路径的概率与这条路径上信息素的强度成正比。对于最短路径, 选择它的蚂蚁越来越多, 导致更多的信息素积累, 吸引更多的蚂蚁, 从而形成了一种正反馈, 这样, 最短路径将会很快被绝大多数蚂蚁发现。蚂蚁个体之间交流信息与相互协作达到搜索食物的目的^[2]。

定义 1 路径选择。在路径选择阶段, 节点 r 的第 i 只蚂蚁依据下述公式来选择节点 s :

$$p_i(r, s) = \begin{cases} \frac{[\tau(r, s)]^\alpha [\eta(r, s)]^\beta}{\sum_{u \in J_k} [\tau(r, u)]^\alpha [\eta(r, u)]^\beta} & s \in J_k(r) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中, $p_i(r, s)$ 代表在节点 r 的第 i 只蚂蚁选择的下一节点; $\tau(r, u)$ 是节点 r 和 u 在链路上的信息素总量; $J_k(r)$ 是与节点 r 相邻的节点集合; $\eta(r, u) = 1/d_{ru}$ 是启发式函数; α, β 是决定信息素总量与启发式函数之间的相对关系的。采用此定义来实现蚂蚁状态的转移可保证寻找优化路径时避免陷入局部优化。

定义 2 局部更新。对第 i 只蚂蚁, 如果对节点 r, s 是它选择的两个相邻节点, 信息素 $\tau(r, s)$ 用公式 $\tau(r, s) \leftarrow (1 - a_0) \cdot \tau(r, s) + \Delta\tau$ 来调节, 否则不调节。其中, $0 < a_0 < 1$, $\Delta\tau = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_k(r, s)$ 。当蚂蚁 k 使用 (r, s) 边时, $\Delta\tau_k(r, s) = Q/L_k$, 否则 $\Delta\tau_k(r, s) = 0$, L_k 是第 k 只蚂蚁的环游长度, Q 是常数。采用此方法, 蚂蚁可以更好地利用信息素信息, 若没有局部更新, 所有蚂蚁将在前一次的最好路径的有限相邻区域内搜寻。

定义 3 全局更新。对第 i 只蚂蚁, 如果对节点 r, s 是它选择的两个相邻节点, 信息素 $\tau(r, s)$ 按公式 $\tau(r, s) \leftarrow (1 - a_1) \cdot \tau(r, s) + a_1 \cdot F$ 来调节, 否则按公式 $\tau(r, s) \leftarrow (1 - a_1) \cdot \tau(r, s)$ 来调节, 其中 $0 < a_1 < 1$ 。此规则的目的是搜寻全局最优解。因此 F 的定义^[3]是:

$$F = F_2/F_1$$

$$F_1 = \sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^v C_{ij} \cdot P_{ij}^d$$

$$F_2 = A \cdot \sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^v f(k_{ij}) + H \cdot f(k_1) + E \cdot f(k_2) + G \cdot f(k_3)$$

$$k_{ij} = P_{ij}^d \cdot B_{ij} - B$$

$$k_1 = D - (\sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^v D_{ij} \cdot P_{ij}^d + \sum_i N_i^d \cdot D_i)$$

$$k_2 = J - (\sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^v J_{ij} \cdot P_{ij}^d + \sum_i N_i^d \cdot J_i)$$

$$k_3 = \prod_{i=1}^v (1 - N_i^d \cdot L_i) - (1 - L)$$

其中, C_{ij} 表示节点 i 到 j 边的费用; $P_{ij}^d = 1$ 表示节点 i 到 j 边的是第 d 只蚂蚁所选择的边, 否则 $P_{ij}^d = 0$; B_{ij} 表示节点 i 到 j 边的带宽; D_{ij} 表示节点 i 到 j 边的延时; D_i 表示节点 i 的延时; J_{ij} 表示节点 i 到 j 边的延时抖动; J_i 表示节点 i 的延时抖动; $N_i^d = 1$ 表示节点 i 是第 d 只蚂蚁所选路由的节点, 否则 $N_i^d = 0$; L_i 是节点 i 的丢失率; v 是网络的节点数目; A, H, E 和 G 是正的实数系数, 分别为 $f(k_{ij}), f(k_1), f(k_2), f(k_3)$ 的正权系数, 分别表示带宽、时延限制、时延抖动和包丢失率在函数中所占比重, 值由系统根据具体应用设定。 F_1 代表蚂蚁选择的路由总费用应最小即费用限制, F_2 代表 QoS 限制。通过上述定义可见, 如果所选路由的总费用最小, 同时 QoS 限制也满足要求, 那么最优蚂蚁进行信息素全局更新, 所选路由各链路上的信息素应该增加更多^[4]。

OQMRA 算法寻找最优多播路由的步骤如下:

(1) 初始化网络拓扑中的相应信息素, 给各个节点 (d, j, l, c) 的值和每条存在的边的 (d, j, b, c) 的值, 给出约束条件中的 D, J, B 和 L 值, 为每条边 (i, j) 边的信息浓度设置一个初始值 τ_{ij} 。然后从蚁巢 (源节点) 开始放出 M 只蚂蚁, 每个蚂蚁都执行步骤 (2)。

(2) 每只蚂蚁按照定义 1 的选择路径规则, 先从相邻节点集合随机地选择一个节点, 再通过重复应用状态选择规则来选择自己的路径。当该蚂蚁成功地完成路由选择后, 所选择的路由路径上的信息素根据定义 2 的局部更新规则进行更新。

(3) 对所有的蚂蚁重复步骤 (2), 直到 M 只蚂蚁都完成了各自的信息素局部更新为止。

(4) 选择全局最优的蚂蚁 (建立了具有最小费用并满足 QoS 限制的路由的蚂蚁), 然后根据定义 3 的全局更新规则, 对此蚂蚁所选的路由的各路径上的信息素进行全局更新。

(5) 上述步骤执行下去, 直到迭代次数完成为止, 获得满意的结果。

4 性能分析

(1) 蚂蚁数量的确定。蚂蚁数量是 OQMRA 算法重要的参数之一, 蚂蚁数量太少, 它们产生的信息素不能有效地弥补信息素蒸发, 不能反映出路由的行为; 蚂蚁数量太多, 不能显著地

提高结果的有效性,反而会加重网络的负担,使网络性能恶化。在 OQMRA 算法中定义蚂蚁的数量 M 等于网络节点数 N , M 只蚂蚁回到源节点,本次搜索结束^[5]。

(2) 复杂性分析。当网络节点数为 N , 给定顶点数为 W , 循环代数数为 X , 蚂蚁数目为 m 时, 算法初始化的复杂度为 $O(N^2 \cdot W)$; 每只蚂蚁的 MST 的复杂度为 $O(X \cdot m \cdot N^2)$, 更新 $\tau(t)$ 的复杂度为 $O(X \cdot m \cdot N^2)$; 算法总的复杂度为 $O(X^2 \cdot m \cdot N^2)$ 。

5 仿真实验

图1是仿真实验所使用的八个节点的网络拓扑(同文献[6])。其中1为源节点,2,4,5,7为目标节点;网络结构模型中各个边的特性用四元组 (d, j, b, c) 描述,节点用四元组 (d, j, l, c) ;其约束条件 $D=50, J=6, B=70, L=0.001$;其他参数选择: $\alpha=1, \beta=1, a_0=0.5, a_1=0.5, \tau_{ij}=100, A=0, H=10, E=15, G=20, M=20$ (蚂蚁数目)。这些参数都是通过大量仿真实验获得的,这样选取的参数可以获得较好的结果。

从图2可以看出, OQMRA 算法的代价曲线比遗传算法的代价曲线要平稳, 而且能更快地找到最优值(或近优值); 延时曲线虽然上下波动要略微大一些, 但平稳后的延时比遗传算法的小; 对于延时抖动的曲线, 两者相差不大。

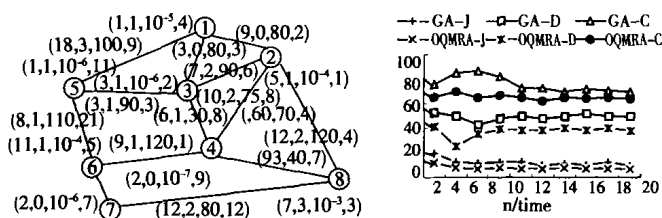


图1 网络拓扑结构和 QoS 参数

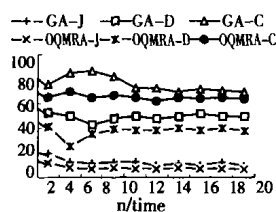


图2 GA 和 OQMRA 算法搜索中多播树代价、延时、延时抖动随代数变化曲线

为了简化,图2中省略了包丢失率的度量。因此 OQMRA

算法应用于多播路由中要优于遗传算法。

6 结论

针对 QoS 多播路由问题, 本文给出了带宽、延时、延时抖动和包丢失率约束以及代价最小的 QoS 多播路由模型, 并提出了一种启发式算法。通过实验证明, OQMRA 算法不仅可以有效地提高网络数据包的传输质量, 而且还可以大大节约路由选择时间, 很快找到最优解(或近优解)。同时, OQMRA 算法还可以实现全局优化, 为解决多约束的 QoS 多播路由问题提供一个新的思维方法。

参考文献:

- [1] 李腊元, 李春林. 动态 QoS 多播路由协议[J]. 电子学报, 2003, 9(9): 1345-1453.
- [2] Schoonderwoerd R, Hoolland O, Bruten J. Ant-based Load Balancing in Telecommunications Networks[J]. Adaptive Behavior, 1996, 5(2): 169-207.
- [3] 张素兵, 吕国英, 等. 基于蚂蚁算法的 QoS 路由调度方法[J]. 电路与系统学报, 2000, 3(1): 1-5.
- [4] Dorigo M, Gambardella L M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Travelling Salesman Problem[J]. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-66.
- [5] Dorigo M, Di Caro G. Ant Colony Optimization: A New Meta-Heuristic[C]. Washington DC: Proceedings of the Evolutionary Computation, 1999. 1470-1477.
- [6] 王征应, 石冰心. 基于启发式遗传算法的 QoS 组播路由问题求解[J]. 计算机学报, 2001, 24(1): 55-61.

作者简介:

许毅(1965-), 男, 湖北京山人, 博士研究生, 主要研究领域为计算机网络技术。

参考文献:

- [1] Rajat R Sud, James D. Requirements Management Tools: A Qualitative Assessment [EB/OL]. <http://www.ess.stsci.edu/fset/projects/Sabbatical/MSRReport.pdf>, 2001-05.
- [2] Michael S Robinson, Rusty Whitman, Mark Abernathy. Recommendation for a Requirements Management Tool [EB/OL]. <http://www.ess.stsci.edu/fset/projects/Sabbatical/RTMvsDOORS.pdf>, 2002-03.
- [3] Requirements Management Tool Market Survey [EB/OL]. <http://www.bestpractices.cahwnet.gov/Support%20Processes/Requirements%20Engineering/RM%20Tool%20Market%20Survey.pdf>, 2000-03.
- [4] 杨根兴, 金荣得, 宗宇伟. 软件需求的不确定性与解决途径[J]. 计算机应用与软件, 2002, 19(4): 17-19.
- [5] 马捷. 需求管理和需求跟踪的策略探讨[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [6] 何新贵, 等. 软件能力成熟度模型[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. 27-30.

作者简介:

杜源(1978-), 男, 硕士研究生, 主要研究领域为软件工程及工具, NET 平台应用等; 唐宁九(1960-), 男, 教授, 主要研究方向为软件工程。

(上接第174页)用,但它又很难自动化并且应用中的有些问题,如大型项目中信息的分类、索引、检索和使用几乎是它无法解决的。形式化和非形式化各有优缺点,如何取长补短,是未来的需求管理工具需要考虑的问题。需求跟踪信息的形式化和非形式化描述的紧密结合不但能够方便地捕获多种跟踪信息,也能帮助有效使用和重用捕获的需求信息。需求管理工具的使用使开发过程变得快捷、方便、准确、简单,这也是所有需求管理工具不断追求的目标。

3 结束语

软件需求作为一个需求工程越来越受到软件界的重视,软件需求的不确定性是客观的事实,每年由此导致的项目开发失败也是数不胜数。在我国,需求管理工具还处于一个空白阶段,不要说独立自主的开发,即使是现有先进需求管理工具的使用也是很少的。作为软件工程的重要组成部分,我国在这个领域的落后局面必将严重制约我国软件行业早日摆脱作坊式生产的步伐,阻碍软件企业朝规模化、正规化的发展。因此,软件需求工程的研究和需求管理工具的推广使用,乃至最终开发出适应我国软件业实际情况的、有我们自主知识产权的需求管理工具是我们的努力方向。