

基于正交实验及双种蚁群的 QoS 组播路由算法^①

王力军¹, 田 静², 李 健¹, 闻 涛¹, 洪 涛¹

¹(中国石油大学(华东)规划建设处, 青岛 266555)

²(中国石油大学(华东)教育发展中心, 东营 257061)

摘 要: 本文算法在建立组播树时, 采用双种蚁群算法, 一组从源结点向目的结点搜索, 另一组从目的结点向源结点搜索。蚂蚁搜索路径时根据 QoS 参数影响度的大小修改信息素更新规则, 从而建立满足多 QoS 约束的最优组播树。QoS 参数影响度的确认通过正交实验统计方法, 根据要搜索路径的规模, 选择合适的正交表。实验证明该算法能有效的利用各 QoS 资源, 较快的得到较优解。

关键词: 正交实验; 双种蚁群; 信息素; QoS; 组播

QoS Multicast Routing Algorithm Based on Orthogonal Experiment and Dual Population Ant Colony Algorithm

WANG Li-Jun¹, TIAN Jing², LI Jian¹, WEN Tao¹, HONG Tao¹

¹(Planning and Construction Administrative office, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266555, China)

²(Education Development Center, China University of Petroleum (East China), Dongying 257061, China)

Abstract: The Dual Population Ant Colony Algorithm is used to establish the multicast tree. One group searches from source to destination and the other from destination to source. The pheromone update rule is modified by the effect of QoS parameters and the optimal tree which meets QoS parameters is found. The effect of every QoS parameter is confirmed by orthogonal experiment of statistical. According to the scope of the search paths, a suitable orthogonal table of the orthogonal experiment is implemented. The experimental results show that the proposed algorithm can make full use of QoS resources and get the better result rapidly.

Keywords: orthogonal experiment; Dual Population Ant Colony Algorithm; pheromone; QoS; multicast

1 引言

QoS 路由选择的目的是在满足每个路由的 QoS 需求同时生成一棵包括所有组播组成员的最小组播生成树^[1]。不同业务有不同的 QoS 约束, 如带宽、延时、延时抖动、费用等。基于多个不相关可加度量的 QoS 路由问题是 NP 完全问题^[2]。现有的启发式算法, 如 BSMA^[3], DVMA^[4], MRPMQ^[5]等, 不是过于复杂, 就是计算复杂度太高。针对这些问题, 目前一般采用蚁群算法来求解。

蚁群算法, 是近几年提出的一种新的优化方法。该算法不依赖于具体问题的数学描述, 具有很强的全

局优化能力和本质上的并行性, 在求解旅行商 TSP 问题中得到较好的结果, 是解决 NP 完全问题的有效方法^[6]。但该算法需要较长的搜索时间; 而且该方法容易出现停滞现象, 不能对解空间进行全面的搜索, 在计算过程中容易造成大量无效搜索或陷入局部最优问题。文献[7]在使用 Dijkstra 算法的基础上利用蚁群算法优化路径组合, 以期找到满足某种特性的组播树, 但利用贪心算法寻求路径的方法耗费大量计算时间, 在效率上难以满足要求。双种群蚁群算法 (Dual Population Ant Colony Algorithm, DPACA) 在基本蚁群算法的基础上, 引入了两个具有相同的状态转移概

① 收稿时间:2010-09-17;收到修改稿时间:2010-10-25

率和信息素更新机制的蚁群并行地对一个问题展开各自的独立搜索，两个蚁群搜索中彼此既相互独立，又相互定期沟通，通过定期交换优良解和信息，从而保证求解过程中解的多样性，抑制求解过程中早熟和停滞现象的出现。

用正交表安排多因素实验的方法，称为正交实验设计法。其特点为：①完成实验要求所需的实验次数少。②数据点的分布很均匀。③可用相应的极差分析方法、方差分析方法、回归分析方法等对试验结果进行分析，引出许多有价值的结论。使用正交设计方法进行试验方案的设计，就必须用到正交表。正交表可查阅有关参考书^[8]。

本文采用统计方法中的正交实验统计，根据搜索路径的大致范围，选择正交表 $L_9(3^4)$ ，确定各 QoS 参数影响度的大小，并按影响度大小依次排序。根据各路径 QoS 参数影响度的大小，结合双种蚁群算法建立满足多 QoS 约束的最优组播树。

2 多约束QoS的组播路由模型

用无向图 $G=(V,E)$ 表示网络模型，其中 V 表示网络中节点集， E 表示网络链路集。 $T=(V1,E1) \in G$ 是当前的组播树， $st \in (V-V1)$ 是希望加入组播组的目的结点。设 $p=p(sc,dt)$ 为从源节点 sc 到目的节点 dt 的一条路径， e 为路径 p 上的一条链路，即 $e \in p$ 。树 T 中任一边 e 对应四个正实数 (De, DJe, BWe, Ce) 。其中， De 、 DJe 、 BWe 和 Ce 分别表示 e 的传输延时、传输延时的抖动、可用带宽和代价。常用的 QoS 指标进行数学表示如下^[9]：

1) 时延： $delay(p) = \sum_{e \in p} delay(e)$ ， $delay(e)$ 为链路 e 上的时延；

2) 延时抖动： $delay-jitter(p) = \sum_{e \in p} dj(e)$ ， $dj(e)$ 为链路 e 上的延时抖动；

3) 带宽： $bandwidth(p) = \min\{b(e)\}$ ， $b(e)$ 为链路 e 上的带宽；

4) 成本： $cost(p) = \sum_{e \in p} cost(e)$ ， $cost(e)$ 为链路 e 上的成本；

多约束的 QoS 组播路由问题就是对于要加入到树上的结点 d ，寻找一条满足以下条件的路径 $p(s,d)$ ：

1) 延迟约束，即： $delay(p) \leq D$ (1)

2) 延迟抖动约束，即： $delay-jitter(p) \leq DJ$ (2)

3) 带宽约束，即： $bandwidth(p) \geq B$ (3)

4) $\min(cost(p))$ (4)

这里， D 、 DJ 、 B 分别是组播树的延时约束、延时抖动约束、带宽约束， s 是组播树上的任意一点。

3 基于正交实验及双种蚁群的QoS组播路由算法

树 $T=(V1,E1)$ 的各个节点到节点 v 的链路中，QoS 约束满足程度最大的链路为节点 v 到树 T 的相对最优链路记为 (u,v) ， $u \in V1$ 为 v 在 T 中的最优连接节点。为了最大程度的满足 QoS 约束，根据各 QoS 参数影响度的不同，使不同的路径信息素挥发度发生变化。各 QoS 参数影响度大小的判断采用统计方法中的正交实验统计方法。

3.1 信息素更新调整规则

根据搜索路径的规模，拟采用 $L_9(3^4)$ 正交表，其中 9 表示将要搜索的数量，4 表示四个 QoS 参数因子，3 表示把搜索的路径的优劣分为三个水平。记录蚂蚁要搜索路径的参数值分别为 y_i ($1 \leq i \leq 9$)。分别对因子 D 使用 1 水平，2 水平，3 水平的三次实验结果相加^[10]。相加公式为：

$$k_1^D = 1/3(y1 + y5 + y9) \tag{5}$$

$$k_2^D = 1/3(y2 + y6 + y7) \tag{6}$$

$$k_3^D = 1/3(y3 + y4 + y8) \tag{7}$$

$$d_1 = k_1^D - k_2^D \tag{8}$$

$$d_2 = k_1^D - k_3^D \tag{9}$$

$$d_3 = k_2^D - k_3^D \tag{10}$$

计算各因子水平效应的差值：

$$R_D = \max\{|d1|, |d2|, |d3|\} \tag{11}$$

R_D 反映了因子 D 的变化对选择路径的影响。同样算出 R_A 、 R_B 、 R_C 。 R_A 、 R_B 、 R_C 、 R_D 的大小反映了因子的重要程度。按照 R_A 、 R_B 、 R_C 、 R_D 数值大小的顺序排列，最大的放在第一个，对试验结果的影响最大，信息素挥发程度最小，依次类推。信息素更新规则为：

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho(x)) * \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \tag{12}$$

x 代表四种 QoS 参数的 R_A 、 R_B 、 R_C 、 R_D 。其中影响度最大的值为 1，其它依次为 2，3，4。

3.2 基于正交实验双种群算法

1) 输入路由请求的起点、目的节点集、最大时延、时延抖动、最小带宽和费用； $NC=0$ ， NC 是循环计数

器。

2) 初始化网络。判断网络中各条链路是否满足带宽约束, 如果不满足, 则本次路由请求不考虑该链路。

3) 初始化 tabu_{k1} 、 allowd_{k1} 和 tabub_1 。将源节点加入禁忌表 tabu_{k1} , 将网络中除源节点外的所有节点加入允许走过的节点集合 allowd_{k1} , 将 m 只蚂蚁放在源节点上。本次搜索的前次搜索所获得的最优路径及各路径被选中的概率存于表 tabub_1 。

4) 初始化 tabu_{k2} 、 allowd_{k2} 和 tabub_2 。将目的节点加入禁忌表 tabu_{k2} , 将网络中除目的节点外的所有节点加入允许走过的节点集合 allowd_{k2} , 将 m 只蚂蚁放在目的节点上。本次搜索的前次搜索所获得的最优路径存于表 tabub_2 。

5) 对于每只蚂蚁根据概率选择公式(13), 由当前节点 i 选择下一个节点 j , 将节点 j 插入 tabu_{k1} 中。同理, 对于由目的节点向源节点出发的蚂蚁选择的下一节点插入 tabu_{k2} 中。

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{(ij)}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{u \in \text{allowed}_k} [\tau_{iu}(t)]^\alpha [\eta_{iu}]^\beta} & \text{if } j \in \text{allowed}_k \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\tau_{ij}(t)$ 是指 t 时刻 (i,j) 边上的信息素的浓度; α 为轨迹的相对重要性 ($\alpha \geq 0$); β 为能见度的相对重要性 ($\beta \geq 0$); $\text{allowed}_k = \{0, 1, \dots, n-1\}$ 表示第 k 个蚂蚁下一步可以选择的节点集;

$\eta_{ij} = \left[(D-d_{ij})^A + (Dj-dj_{ij})^B + b_{ij}^C \right] / (c_{ij})$, 其中 d_{ij} 、 dj_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 分别是边 (i,j) 上的延时、延时抖动、带宽和费用。A、B、C 是它们所占的比重。

(6) 根据每只蚂蚁的行走路径按公式(12)改变路径上的信息素的量。其中

$$\rho(x) = -0.1x + 0.8 \quad (14)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (15)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} Q/D(i,j) & \text{若蚂蚁 } k \text{ 经过链路 } (i,j) \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (16)$$

$\rho(x) \in (0,1)$ 为蒸发因子, $\Delta\tau_{ij}^k$ 为蚂蚁 k 在链路 (i,j) 上留下的信息量。 $D(i,j)$ 为第 k 只蚂蚁的总路径长, Q 为常数。

$$\text{NC} = \text{NC} + 1;$$

7) 如果 $\text{NC} < \text{NCmax}$, 清空所有 tabu_{k1} , tabu_{k2} 表,

转到第 2 步。否则输出最小代价组播树。

4 仿真实验

实验采用 8 节点网络图模型进行仿真^[11], 如图 1 所示。其中, 1 为源节点, 7 为目的节点。链路的特性用四元组 (时延, 时延抖动, 带宽, 费用) 来描述。约束函数为四维向量 $f = \{D, DJ, B, C\}$ 。QoS 加权系数 $A = B = C = 1$ 。

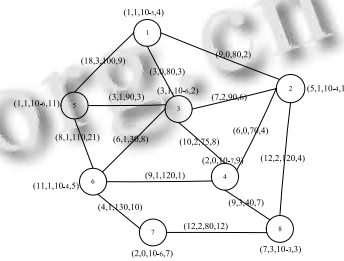


图 1 网络结构图

4.1 本文算法迭代次数

表 1 描述了在不同的参数选择下, 本文算法的迭代次数。

表 1 算法迭代次数

α	β	m	本文算法/次
0.1	3	26	14
0.3	2	20	12
0.5	4	29	16
0.7	1	20	13
0.9	5	36	17

α 为信息素启发因子, 表示轨迹的相对重要程度。 α 越大表示蚂蚁选择以前经过路径的可能性越大。 β 为期望启发因子, 表示能见度的相对重要性。 β 较小, 易使算法陷入局部最小解; β 较大, 则收敛较慢。 ρ 表示信息素的挥发率。由实验结果, 令 $\alpha = 0.3$, $\beta = 2$, $Q = 100$, $m = 20$, 仿真 20 次。

4.2 与其它方法的结果比较

将本文算法分别与最小时延算法和最小成本算法进行比较, 结果如表 2 所示。寻找组播树所选中的路径的时延抖动和费用随迭代次数的变化情况如图 2 所示。在蚂蚁的搜索过程中, 两组蚂蚁分别选路, 增加路径被选择的可能性, 避免所以蚂蚁都选择一条路径陷入局部最优。同时, 在求解满足多约束 QoS 的路由

问题中,充分利用各个约束条件。与最小时延算法相比,虽然增加了时延,但降低了成本。比最小成本算法增加了成本,却也减小了时延。而且本文剩余带宽相对较大,减少了拥塞的可能性。

表2 几种算法性能比较

算法	路径	剩余带宽	平均延时	总成本	平均延时抖动
本文算法	13467	10,5,50,60	6.5	22	1
最小时延算法	13567	10,20,40,60	5	37	0.75
最小成本算法	12467	10,0,50,60	7	17	0.5

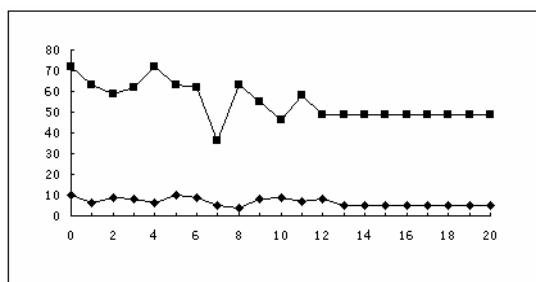


图2 费用和延迟抖动随迭代次数变化的情况

5 结论

本文在研究 QoS 组播路由算法的基础上,针对 QoS 多约束问题,提出了基于正交实验及双蚁群的算法。根据要搜索路径的规模,选择合适的正交表,确定各 QoS 参数影响度的大小。建立组播树时,在原有蚁群算法的基础上,采用双种蚁群算法,两组蚂蚁分别进行路径选择,避免陷入局部最小解。搜索过程中,根据各 QoS 参数影响度改变信息素挥发度。由于该算法综合考虑了多个约束条件,相对于最小时延算法增加了时延,相对于最小费用算法增加了费用,但整体性能则得到了提高。

参考文献

- 1 Chen S, Nahrstedt K. An overview of quality of service routing for next generation high speed networks: problems and solutions. IEEE, Network, 1998,12(6):64-79.
- 2 Wang B, Hou JC. Multicast routing and its QoS extension: problems, algorithms, and Protocols. IEEE Network, 2000, 14(1):23-36.
- 3 Zhu Q, Parrsa M, Garcia Luna Aceves J. A source based algorithm for delay constrained minimum cost multicasting. IEEE Computer Society. ed. Proc. of the IEEE IN FOCOM '95. Vo 1. 1. IEEE Press, 1995: 377-385.
- 4 Rouskas GN, Baldine I. Multicast routing with end to end delay and delay variation constraints. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1997,15(3):346-356.
- 5 Li LY, Li CL. A multicast routing protocol with multiple QoS Constraints. Journal of Software, 2004,15(2):2862-291.
- 6 Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Trans. Systems, Man, Cybernet.-Part B, 1996,26(1):29-41.
- 7 Zhang SB, Liu ZM. A distributed delay bounded constraint multicast routing algorithm based on ant algorithm. Journal of China Institute of Communications, 2001,3(22):70-74.
- 8 常兆光,王清河,杜彩凤.应用统计方法.北京:石油工业出版社,2009.
- 9 冉敏,高随祥,徐葆.一种基于蚁群系统的多约束 QoS 路由算法.计算机工程与应用,2005,7:142-144.
- 10 Hu XM, Zhang J, Li Y. Orthogonal Methods Based Ant Colony Search for Solving Continuous Optimization Problems. J. Comput. Sci & Technol, Jan. 2008,23(1).
- 11 Wang ZY, Shi BX. Solving QoS multicast routing problem based on heuristic genetic algorithm. Chinese J Computers, 2001,24(1):55-61.