第9卷 第4期 电路与系统学报 Vol.9 No.4
2004 年 8月 JOURNAL OF CIRCUITS AND SYSTEMS August, 2004

文章编号：1007-0249 (2004) 04-0142-04

一种基于时延信息的多 QoS 快速自适应路由算法*

纪竹亮， 戴连奎

（浙江大学 智能系统与决策研究所，浙江 杭州 310027）

摘要：本文在分析现有自适应蚁群算法局限性的基础上，提出了一种基于时延的自适应多 QoS 路由算法，它在满足带宽和时延波动约束条件下，直接利用前一周期的时延信息来更新路由表，以作为当前寻找路径的依据。仿真和分析结果表明，该算法具有快速准确的特点，能够及时协调网络拥塞和资源有效利用两者间的矛盾。

关键词：自适应路由；蚁群算法；分布式流量控制；QoS

中图分类号：TP393 **文献标识码**：A

1 引言

当今因特网中信息包的丢失主要是由网络的拥塞引起的。自适应算法被认为是解决网络拥塞的一种非常有潜力的算法。文献[1]提出了一种旨在充分利用网络资源的基于智能体的路由算法。该算法延伸了蚁群算法的思想，在限制带宽和跳数的前提下达到有效利用网络带宽的目的。文献[2]也在保证网络QoS的前提下扩展了蚁群算法。文献[3]在实现负载平衡的前提下提出了将智能体分为两类：一类称为负载智能体（load agents）利用Dijkstra[4]算法负责寻找最短路径，另一类视为策略智能体（strategy agents）用以审查网络状况从而控制负载智能体的数量。文献[5]介绍了基于蚁群的路由控制算法（Ant-based Control，ABC）算法。该算法的实现是通过蚂蚁在路由过程中留下的信息素来更新相应节点中的路由表以实现自适应路由的，该算法在不同的网络状况下具有自适应性和较强的鲁棒性。文献[6]针对实时应用，将蚂蚁算法运用到多播路由协议中，在时延的约束下算法可以达到费用较优。本文在分析现有蚁群算法的局限性的基础上，提出基于时延的自适应路由算法，能够根据网络的实际状况，及时协调网络拥塞和资源有效利用之间的矛盾，并实现了最优路径与网络流量分配之间的折衷。

2 问题描述

通常可以将网络看作一个直通图 $G=(V,E)$，其中 V 表示网络节点集，E 表示链路集。对于任意一链路 $e\in E$，假定其链路延迟为 $d(e)$。则从信源节点 s 到目的节点 d 的一条路径 $p(s,d)$ 总共所用时延为：

$$D(p)=\sum_{e\in p}d(e) \tag{1}$$

其中，$p\in P(s,d)$，$P(s,d)$ 表示网络的路径集。同时，路径 $P(s,d)$ 需要满足下面的两个条件：

1）带宽条件为：
$$\min_{e\in P}(B(e)-B_0)\geq 0 \tag{2}$$

2）时延波动条件为：
$$\tau(p)\leq(1+K)\min_{p\in P}\tau(p) \tag{3}$$

其中 B_0 为带宽约束值，$\tau(p)$ 为从节点 s 前往目的节点的时延，K 为允许的相对时延波动因子。本文就是在满足带宽约束和时延波动约束条件的若干条路径中以概率方式进行寻径，从而达到均衡网络可用资源的目的。

3 自适应蚁群算法[1],[5],[6]的分析

网络中每个路由器中都维持着一张路由表，因为节点的状态是动态变化的，所以资源并不是被静态分配的，这就要求路由表中的值也应该动态地变化。下面式（4）为 ABC 算法[5]所提出的路由表的更新公式：

* 收稿日期：2003-05-26 修订日期：2003-10-23

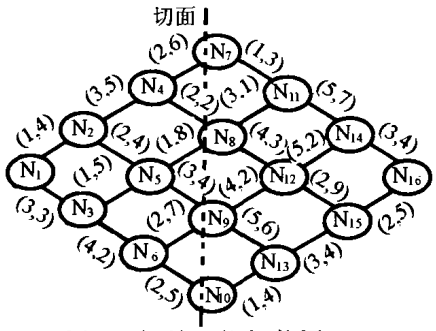


图 1　初始网络拓扑图

$$R_{i,d}^{i+1}(t+1)=\frac{R_{i,d}^{i+1}(t)+\delta_{i,d}^{i+1}(t)}{1+\delta_{i,d}^{i+1}(t)} \tag{4}$$

其中，$R_{i,d}^{i+1}(t+1)$ 代表蚂蚁（即数据包）在新一个周期中从节点 i 跳往节点 $i+1$ 的信息素值，经过归一化后即为跳往节点 $i+1$ 的概率，初始化时令 $R_{i,d}^{i+1}(0)=0$；d 为目的节点，t 为上一周期，$\delta_{i,d}^{i+1}(t)$ 为信息素变化因子，其定义式为：

$$\delta_{i,d}^{i+1}(t)=a/\min T_{i,d}^{i+1}(t)+b \tag{5}$$

这里 a，b 都是常系数，通常取 a=1，b=0；$\min T_{i,d}^{i+1}(t)$ 表示蚂蚁从节点 i 经过节点 $i+1$ 到达目的节点的诸多路径中所用时延的最小值。归一化为式（6）：

$$R_{i,d}^{i+1}(t+1)=\frac{R_{i,d}^{i+1}(t+1)}{\sum_{j\in n}R_{i,d}^{j}(t+1)} \tag{6}$$

其中 $j\in n$ 表示任一与节点 i 直接相连的节点；n 为与节点 i 直接相连的节点数（本文只考虑前向相连）。

下面以图 1 拓扑图为例来分析上述蚁群路由算法，图中连线上括号中的第一个数字表示该链路的时延，第二个表示带宽。为简化分析，认为链路正反向的时延和带宽一致。同时，假设链路带宽约束值 B_0 为 3，信源节点为 N_1，目的节点为 N_{16}。于是，在对网络的链路集遍历之后，带宽小于 3 的链路都将被剔除掉，从而得到如图 2 所示的网络。另外，经过初始化后，网络中的每个路由器，都保存着跟其直接相连的路由器和通过该相邻路由器前往目的路由器的最小时延相关信息。例如对于节点 N_1，其通过节点 N_2 到达目的节点 N_{16} 的最小时延是 12，而通过节点 N_3 到达目的节点的最小时延为 13。

表 1　N_1 信息素表

邻节点	概率值
N_2	0.52
N_3	0.48

表 2　N_1 更新后表

邻节点	概率值
N_2	0.99362
N_3	0.00638

假设 a =1，b=0，而 $R_{N_1,N_{16}}^{N_2}(0)=0$，则可利用（4）式计算其信息素为 0.077；同理，从节点 N_1 经 N_3 前往目的节点 N_{16} 的信息素为 0.071。归一化后可以得到如表 1 所示的信息素表。

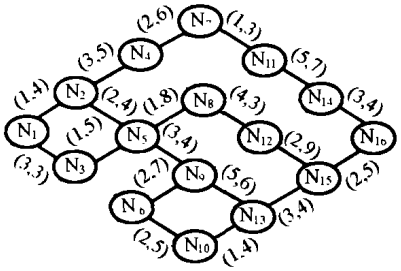


图 2　简化后网络拓扑图

经过初始化之后，链路中每当有数据包经过，则其信息素增加。事实上，当系统稳定时，由于蚁群算法的正反馈自寻优能力，若网络中各链路时延不变，则经过一段时间后，几乎所有的蚂蚁都会选择最小时延的路径。表 2 所示为经过 1000 次迭代后节点 N_1 的信息素表。可见，通过 N_2 前往目的节点的概率接近 100%。

现在考虑最优路径发生拥塞的极端情况。假设 $T=\infty$，即蚂蚁所选择的路径中存在拥塞或者中间某个路由器发生了故障导致时延无穷大。此时，按理想情况，在下一周期中通过该段链路前往目的节点的节点 i 的信息素 $R_{i,d}^{i+1}(t+1)$ 应降为很小以防止以后的信息包再沿着该路径发送从而导致严重的丢包现象。然而，由（4）式可知，$R_{i,d}^{i+1}(t+1)$ 将会与前一周期的信息素值相等，即，网络中某一链路在前一周期信息素值很强时，即使在当前情况下该链路中发生了拥塞，在下一个周期该链路的信息素还将保持较强，这与期望的结果不符。

4　改进的自适应算法

考虑到蚁群算法存在的问题，本文在满足带宽约束条件的路径中将根据以下算法进行路径选择。

1）限制时延的波动范围。即信息包到达任一中间节点时，都会比较从其下一相邻节点前往目的节点的所有满足带宽约束的可行路径，找到时延最小的通往目的节点的路径 $P(i,d)$，将该路径的时延设定为 $\min\tau_i$，选择所有时延不大于 $(1+K)\min\tau_i$ 的路径；

2）对于网络中的任一节点 i，假设与其直接相连同时满足带宽和时延波动约束的相邻节点为 $j_1, j_2, \ldots, j_n$，目的节点为 d。则节点 i 中维持着经过其各个相邻节点发往目的节点 d 的概率 $P_{i,d}^{j_1}$，$P_{i,d}^{j_2}$，…，

表3 N_1概率表

邻节点	概率值
N_2	0.52
N_3	0.48

表4 N_1更新后表

邻节点	概率值
N_2	0.48
N_3	0.52

$P_{i,d}^{j_n}$的一张表。这些概率值由下式计算得到：

$$P_{i,d}^{j+1}(t+1)=\frac{1/\tau_i(t)}{\sum_{j=1}^{n}(1/\tau_j(t))} \tag{7}$$

其中$P_{i,d}^{j+1}(t+1)$表示在新的周期中信息包从节点 i 经过节点 i+1 发往目的节点的概率，$\tau_i(t)$表示上一周期由节点 i 经节点 i+1 前往目的节点的所用的最小时延，n 表示直接与节点 i 相连的节点个数。由上式可知，$P_{i,d}^{j+1}(t+1)$的大小会随着时延的大小而直接迅速变化。

现仍以图 2 所示拓扑图为例，其初始化过程与蚁群算法相似。假设信源节点为 N_1，目的节点为 N_{16}，时延波动因子 $K=1/4$。从 N_1 经过 N_2 前往 N_{16} 的最好路径所用时延为 12，而从 N_3 前往 N_{16} 的最好路径所用时延为 13，经过（7）式计算可得到如表 3 所示的概率选择表。对比表 3 和表 1，可以发现，初始化后，本文算法与蚁群算法维持的路由表一样。

与蚁群算法不同的是，若网络中各链路的时延不变，依本文提出的改进算法进行计算，网络中节点的概率选择表将保持不变。如果考虑时延发生变化的情形，比如在某时刻连接 N_1 和 N_2 的链路的时延由 1 变成了 3，而其他条件不变，则由（7）式计算可得表 4 所示的概率选择表。即这时候 N_1 选择 N_3 的概率大于 N_2，这与通过 N_2 前往目的节点所用最少时延比通过 N_3 前往目的节点所用最少时延大相符合。对比表 4 和表 2，可以看出，本文的改进算法对路由表选择概率的调节更为稳定，也更为合理，能够更好地避免拥塞的发生。

5 算法研究及结论

本文仿真网络拓扑图如图 1 所示，其中链路的带宽和时延由系统随机产生，都分布在 1 到 10 之间。带宽的约束条件 B_0 设为 3。在仿真中，源节点为 N_1，信宿节点为 N_{16}。对于蚁群算法，其步长参数 a 和 b 分别设为 1 和 0。链路发生拥塞超时时延设定为 35。实验仿真步长为 200 毫秒。

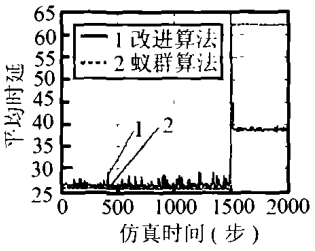


图 3 K=1/3 的时延曲线图

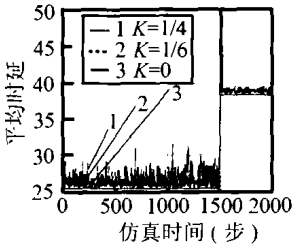
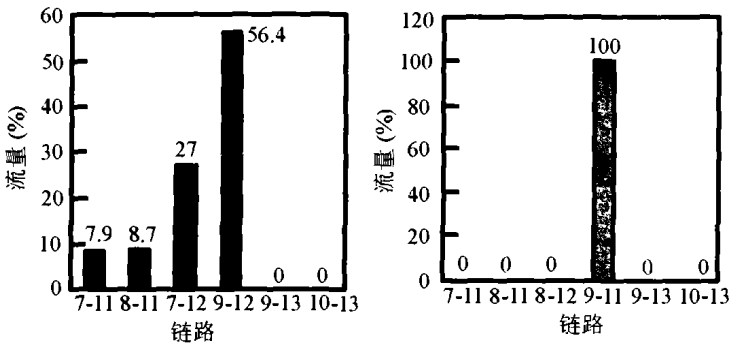


图 4 不同 K 值的时延曲线图

图 3 对比了蚂蚁算法与改进算法发送信息包到目的节点的平均时延随着仿真时间的变化而变化的曲线图。图中所示前 1600 步显示了时延变化的情况，由图可见，蚁群算法能一直保持在最优路径，直到该路径发生拥塞；而本文的改进算法则一直在最优路径附近作轻微的波动，其原因是算法以概率进行选择路径，充分考虑了对网络资源的有效利用。从 1600 步开始，是故意让节点 N_8 处发生了拥塞时两算法的时延变化情况。可以发现，蚁群算法在发生拥塞之后，不能重新找到最优解，而本文的改进算法则能够很快避开拥塞，找到最优解。



(a) 改进算法 (b) 蚁群算法

图 5 网络资源利用情况

图 4 给出了不同时延波动值 K 时本文算法仿真得到的平均时延曲线。由图可见，K 值越大则时延曲线的波动越大。当取 K 为 0 时，选择的路径只有一条，即蚁群算法在拥塞发生之前所选择的最优路径；在拥塞出现之后，又会重新找到时延最小的路径作为当前的选择，从而可以快速避开存在拥塞的节点。

图 5 以图 1 点线所示切面为例，通过分析该截面的流量分布对比了两种算法对网络资源的利用情况。柱形图横坐标的数字如 7-11 表示链路 N_7N_{11}，顶端的数字如 7.9 表示所占总流量百分比。从图中可以看出，在两算法都正常运行的情况下，本文的改进算法将流量分布到所有可用链路上，而蚁群算法则高度占用同一条链路。

由此可见，本文算法可有效协调网络拥塞和资源有效利用两者间的矛盾，使网络流量分布更合理。

参考文献：

[1] Oida K, Sekido M. An Agent-based Routing System for QoS Guarantees [A]. **Proc. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics** [C]. 1999-10: 833-838.

[2] Caro G Di, Dorigo M. Two Ant Colony Algorithm for Best-effort Routing in Datagram Networks [A]. **Proc. 10th International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems** [C]. Las Vegas, Nevada, 1998-10: 541-546.

[3] Lipperts S, Kreller B. Mobile Agents in Telecommunications Networks - A Simulative Approach to Load Balancing [A]. **Proc. 5th Intl. Conf. Information Systems, Analysis and Synthesis** [C]. 1999.

[4] Dijkstra E W. A Note on Two Problems in Connection with Graphs [J]. **Numeric Mathematics,** 1959, 1: 269-271.

[5] Schoonderwoerd R, Holland O, Bruten J, Rothkrantz L. Ant Based Load Balancing in Telecommunication Networks [J]. **Adapt. Behav.,** 1996, 5: 169-207.

[6] 张素兵, 刘泽民. 基于蚂蚁算法的时延受限分布式多播路由研究 [J]. 通信学报, 2001, 22(3):70-74.

作者简介：纪竹亮，男，硕士生，主要研究方向为网络控制与优化；**戴连奎**，男，副教授，浙江大学智能系统与决策研究所副所长，硕士生导师，主要研究方向为预测控制、智能优化和计算机网络优化。

A Fast Adaptive Routing Algorithm Based on Delay

JI Zhu-liang,　DAI Lian-kui

(Institute of Intelligent Systems & Decision Making, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A new fast adaptive routing algorithm to overcome the drawbacks of adaptive ant-based control algorithm is proposed. The network delay information is introduced to update routing table to avoid congestion and to utilize network resources effectively with multiple QoS constraints. Simulation results show that the algorithm is effective and simple.

Key words: adaptive routing; ant-based control algorithm; distributed traffic control; QoS

(续第 20 页) (*from page* 20)

A Fractional-Sampling Space-Time Equalization Receiver for MIMO HSDPA Systems

ZHOU Zhi-gang[1],　CHENG Shi-xin[1],　CHEN Ming[1],　WANG Hai-feng[2]

(1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Nokia Mobile Phones, Elektroniikkatie 3, PL 50,90571, Oulu, Finland)

Abstract: Multiple-input multiple-output (MIMO) technology has been proposed for the high-speed downlink packet access (HSDPA) extension to the 3GPP mobile communication standard to achieve high data throughput with significantly increased spectrum efficiency. However, multi-antenna and multi-code transmission in frequency selective fading channel results in severely co-channel interference and inter-code interference. Accordingly, a fractional-sampling space-time equalization receiver scheme for MIMO HSDPA is proposed to combat above mentioned interference's. System simulations demonstrate that the performance of the proposed scheme is better than conventional space-time Rake receiver.

Key words: MIMO; HSDPA; fractional-sample; space-time equalization