

## 多蚁群算法的网络负载动态均衡方法

陆 俊, 祁 兵

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

(lujun@ncepu.edu.cn)

**摘 要:**针对网络资源管理中的负载均衡与优化问题,提出一种多蚁群网络负载动态均衡方法,采用网络流量工程理论中拥塞控制机制实现信息素随网络流量动态释放与更新。算法通过蚁群间信息素的动态相互作用(蚁群内信息素相互增强,蚁群间信息素相互削弱),将代表网络负载的蚂蚁合理分配到可用路径,避免蚂蚁集中到特定路径而造成网络拥塞。实验结果表明,通过路径信息素控制能够实现网络负载均衡,有效提高网络在路径延时、平均带宽利用率和平均丢包率方面的性能。

**关键词:**网络资源管理;蚁群算法;负载均衡

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A

## Multiple ant colony algorithm load balancing for network sessions

LU Jun, QI Bing

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** A multiple Ant Colony Algorithm (ACA) path load balancing optimization algorithm for the resources allocation within network sessions was proposed. Combining bio-inspired ant colony algorithm with dynamic load balancing in the network traffic engineering, the algorithm further extended the basic ant colony to multiple ones with dynamic pheromone release design. By fully considering ACA's parallel-computing characteristic, the scheme tried to allocate the traffic load of network sessions to the different paths equally to avoid traffic congestion. Besides analyzing the effective control of the pheromone, compared with basic ant algorithm, simulation experiments illustrate that the proposed scheme achieves better resources allocation in terms of path bandwidth utilization, session delay and session packet loss.

**Key words:** network resource management; Ant Colony Algorithm (ACA); load balancing

### 0 引言

网络负载均衡与优化一直是网络资源管理研究中的重要内容<sup>[1]</sup>,研究的目的是网络流量能够合理地分配到网络可用路径,避免网络拥塞瓶颈,提高网络的服务质量(QoS)。生物启发(Bio-inspired)机制应用于网络研究已渐成为当前研究的热点<sup>[2]</sup>,其中的蚁群算法(Ant Colony Algorithm, ACA)是模拟蚁群寻找食物的智能路径选择的一种生物启发式优化算法<sup>[3]</sup>。相关工作<sup>[4,5]</sup>已在路由优化算法中涉及到网络负载均衡问题,但如何从网络资源管理优化角度实现网络负载均衡仍然是一个有待解决的问题。

本文针对网络资源管理中的路径负载均衡与优化问题,将蚁群算法与网络流量工程相结合,提出一种多蚁群的网络负载动态均衡方法。算法通过多蚁群间信息素的相互作用与动态更新,将代表网络负载的蚂蚁尽可能合理分配到网络可用路径,避免负载过多集中而造成特定路径拥塞,以实现网络资源的优化。

### 1 多蚁群动态均衡算法

蚁群算法通过蚁群中路径信息素增强选择最优路径,没有负载分担机制,可能产生最优路径拥塞而导致网络整体性能下降,如图1(a)所示。

类似于自然界不同蚁群路径信息素的相互影响(相同蚁

群中蚂蚁释放出的信息素增强本蚁群信息素浓度,同时削弱其他蚁群的信息素浓度),网络流量在传输路径中也相互竞争作用,通过网络流量工程的拥塞控制<sup>[6,7]</sup>等机制实现网络流量间公平共享路径带宽。基于以上的分析,受多种群遗传算法<sup>[5,7]</sup>启发,本文提出一种多蚁群动态算法实现网络不同路径的负载均衡与优化。算法首先将蚁群算法扩展为多蚁群算法,通过多蚁群间竞争实现蚁群间路径信息素的相互作用;其次基于网络工程拥塞控制理论<sup>[6,7]</sup>实现路径信息素动态释放与更新,使网络流量尽可能合理选择其他可用路径,从而达到网络流量的负载分担,如图1(b)所示。

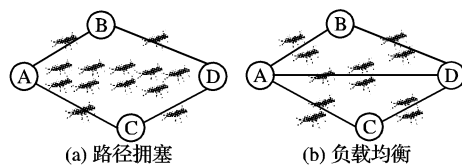


图1 多蚁群动态算法目标

### 2 多蚁群机制与动态信息素的建模

#### 2.1 多蚁群机制建模

多蚁群机制建模,即通过多蚁群模拟网络网络流量间相互作用,每个蚁群表示网络中的一个传输流量,蚂蚁表示当前时刻经过路径的网络流量负载,通过路径信息素控制,实现网络均衡。

收稿日期:2007-09-14;修回日期:2007-12-06。

作者简介:陆俊(1976-),男(壮族),云南广南人,讲师,博士,主要研究方向:网络组播、图像处理;祁兵(1965-),男,辽宁人,副教授,硕士,主要研究方向:网络管理、网络通信。

给定一个由  $Q$  个节点构成的网络支持不同网络会话,则网络负载均衡问题可以描述为:搜索一系列由节点  $q \in Q$  构成的优化路径,在网络资源均衡分配前提下有效支持网络流量。

假设网络中存在  $n$  个蚁群(代表  $n$  条流量)寻找最优路径,标记为  $A1, A2, \dots, An$ ;则在时刻  $t$  处于节点  $r$  的  $Ai$  蚁群的蚂蚁  $k$ ,选择下一节点  $s$  进行访问的概率  $p_{rs}^{ik}(t)$  由式(1)确定:

$$p_{rs}^{ik}(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{rs}^i(t)]^\alpha [\eta_{rs}(t)]^\beta}{\sum_{u \in allowed_{ik}} [\tau_{ru}^i(t)]^\alpha [\eta_{ru}(t)]^\beta \cdot [1 + \sum_{j \in Q \setminus i} \theta_{rs}^j(t)]}, & c1 \\ 0, & c2 \end{cases} \quad (1)$$

其中条件  $c1$  为  $s \in allowed_{ik}$ , 条件  $c2$  为  $s \notin allowed_{ik}$ ,  $allowed_{ik} = \{1, 2, \dots, q-1\}$  表示  $Ai$  蚁群蚂蚁  $k$  可以选择的下一节点集合。下一节点的选择由转移概率  $p_{rs}^{ik}(t)$  与一个随机概率决定<sup>[8]35</sup>,已选择过的节点将从集合  $allowed_{ik}$  去除。 $\tau_{rs}^i(t)$  是蚁群  $Ai$  在路径  $(r, s)$  上的信息素浓度; $\eta_{rs}(t)$  表示从节点蚁群  $r$  到节点  $s$  转移的启发度因子;启发因子可以根据具体问题、具体优化目标和可用信息加以确定,本文为简化问题,将  $\eta_{rs}(t)$  简化为  $1/d_{rs}(t)$ ,其中  $d_{rs}(t)$  是  $t$  时刻路径  $(r, s)$  的延迟(ms)。与蚁群算法定义相同, $\alpha(\alpha \geq 0)$  和  $\beta(\beta \geq 0)$  分别表示累计信息素重要性因子与启发信息重要性因子<sup>[8]35</sup>。

$[1 + \sum_{j \in Q \setminus i} \theta_{rs}^j(t)]$  实现算法的多蚁群信息素抑制机制,其中路径  $(r, s)$  上其他蚁群  $j$  对蚁群  $i$  的信息素抑制因子  $\theta_{rs}^j(t)$  定义如式(2):

$$\theta_{rs}^j(t) = \frac{1}{m_{rs}^j(t)} \sum_{z \in J_{rs}^j(t)} p_{rs}^{iz}(t) \quad (2)$$

其中  $m_{rs}^i(t)$  代表蚁群  $Ai$  在当前迭代周期内选择路径  $(r, s)$  的蚂蚁数目,而  $J_{rs}^j(t)$  是其他蚁群  $Aj$  在当前迭代周期内选择路径  $(r, s)$  的蚂蚁集合,  $p_{rs}^{iz}(t)$  是集合  $J_{rs}^j(t)$  中蚂蚁  $z$  选择路径  $(r, s)$  的转移概率。

信息素抑制因子  $\theta_{rs}^j(t)$  表示了蚁群  $j$  在选择路径过程中对蚁群  $i$  的影响,从而导致了在相同路径上两个蚁群的信息素的相互抑制,使得在相同的链路上的两个蚁群的蚂蚁数量由于相互影响而下降到一个相对稳定状态。新的蚂蚁(代表流量)将可能选择其他可用路径,而网络性能不会由于某个路径拥塞成为网络瓶颈而显著下降,实现网络负载的合理有效分配。

上述网络平衡是基于信息素更新的动态过程,考虑到网络全局信息更新的复杂性,本文采用在蚁群算法框架下的局部方法实现蚁群路径信息素更新,更新公式如式(3):

$$\tau_{rs}^i(t+1) = \rho \cdot \tau_{rs}^i(t) + \lambda_{rs}^i(t) \cdot \sum_{k=1}^{m_{rs}^i(t)} \Delta \tau_{rs}^k(t) \quad (3)$$

其中  $\rho$  为蚁群路径信息素挥发因子,  $m_{rs}^i(t)$  含义同式(2),代表蚁群的路径蚂蚁数目,  $\Delta \tau_{rs}^k(t)$  是蚁群  $Ai$  中蚂蚁  $k$  释放的信息素(详见3.2节),  $\lambda_{rs}^i(t)$  是路径  $(r, s)$  上多蚁群对蚁群  $Ai$  的信息素挥发因子,如式(4):

$$\lambda_{rs}^i(t) = \frac{1 + m_{rs}^i(t)}{1 + \sum_{j=1}^n m_{rs}^j(t)} \quad (4)$$

其中  $m_{rs}^i(t)$  与  $m_{rs}^j(t)$  含义同式(2),代表蚁群的路径蚂蚁数目。 $\lambda_{rs}^i(t)$  根据路径当前所经过的不同蚁群蚂蚁数目,动态调整路径蚁群信息素的挥发速度,控制该路径上的蚂蚁数量,从

而达到负载分担的目的。

## 2.2 动态信息素建模

多蚁群算法中一个重要步骤是如何确定信息素在路径上的释放量,其关键在于蚂蚁路径上应该释放多少信息素。研究表明蚂蚁释放的信息素与他周围的环境联系得很紧密(如湿度、温度和其他蚁群的影响)<sup>[8]6</sup>,本文对释放量  $\Delta \tau_{rs}^k(t)$  采取动态建模方式以改善性能。

考虑到网络性能测度主要涉及路径延时和路径带宽,路径流量负载均衡控制应随网络环境动态调整,根据文献[9],本文将路径  $(r, s)$  的蚂蚁  $k$  信息素释放量  $\Delta \tau_{rs}^k(t)$  定义为式(5):

$$\Delta \tau_{rs}^k(t) = C \cdot \left[ \frac{1}{d_{rs}(t)} \right]^{(1+loss(t))} \left[ \frac{B_{rs}}{B_{max}} \right]^{(1+bwidth(t))} \quad (5)$$

$$B_{max} = \max_{i,j \in Q} \{ B_{path(i,j)} \} \quad (6)$$

$$bwidth = \frac{B_{rs}^{utilize}(t)}{B_{rs}} \quad (7)$$

其中  $d_{rs}(t)$  和  $B_{rs}$  分别是时刻  $t$  路径  $(r, s)$  的延时和带宽。分别用  $loss(t)$  和  $bwidth(t)$  作为  $loss_{rs}(t)$  和  $bwidth_{rs}(t)$  的缩写,代表时刻  $t$  路径  $(r, s)$  的丢包率和带宽利用率。 $C$  是一个常数,代表理想状态下(无丢包和无带宽利用)留在路径上的信息素的量。

通过路径上的延时  $d_{rs}(t)$ ,丢包率  $loss_{rs}(t)$  和带宽利用率  $bwidth_{rs}(t)$  调整,  $\Delta \tau_{rs}^k(t)$  具有了动态特性。由式(5)知其关系满足式(8),因此当网络的运输量增加且路径负载的也逐渐增加时,三个变量将增加而使得  $\Delta \tau_{rs}^k(t)$  降低,可以避免网络拥塞。

$$\Delta \tau_{rs}^k(t) \propto \frac{1}{f(d_{rs}(t), loss, bwidth)} \quad (8)$$

## 3 实验与性能分析

仿真实验基于 Matlab 7.0,比较算法是蚁群算法。实验相关参数设置如下:蚁群数  $n = 2$ ,每个蚁群的蚂蚁数  $N_{ant} = 16$ ,  $\alpha = 1, \beta = 5, \rho = 0.3, C = 100$ ,迭代周期  $T = 1$  s,初始信息素  $\tau(0) = 1$ ;网络传输仿真时间是  $[0, t] (t = 50$  s),最大与最小路径带宽分别是  $B_{max} = 10$  Mbps 和  $B_{min} = 3$  Mbps,网络延迟范围为  $5 \sim 10$  ms。采用与文献[5]相同的网络拓扑(如图2所示),网络流量分别为  $A \rightarrow E$  和  $B \rightarrow E$ ,可选路径主要包括 CDE、CE 和 CFE。CE 既是网络瓶颈,又是从源节点 A、B 到目标节点 E 的最短路径。

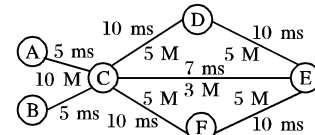


图2 多蚁群动态算法实验拓扑

每只蚂蚁代表一个基本网络流量单元  $B_{unit} = 3 \cdot (n \cdot N_{ant}/B_{min})$  Mbps,即,若  $t$  时刻一只蚂蚁选择了一条路径,则在该网络周期内将有  $B_{unit}$  Mbps 的网络流量通过该路径。根据以上网络参数设置,若所有蚂蚁都选择 CE,则其网络负载将达到 9 Mbps (3 倍于 CE 的最大负载能力),造成网络性能的严重下降。

### 3.1 拥塞路径的均衡性能

拥塞路径实验结果如图3所示,其中  $x$  轴表示时间,  $y$  轴分别表示瓶颈路径 CE 的蚂蚁数量  $N_{ant}(t)$ ,信息素  $\tau(t)$  和转移概率  $p(t)$ 。与蚁群算法相比,本文算法将路径 CE 负载控制

在一个较低的水平;蚂蚁数(3 ~ 6)、信息素(1.49 ~ 3.53),使得从节点 C 到节点 E 转移概率的范围保持在 0.13 ~ 0.27。

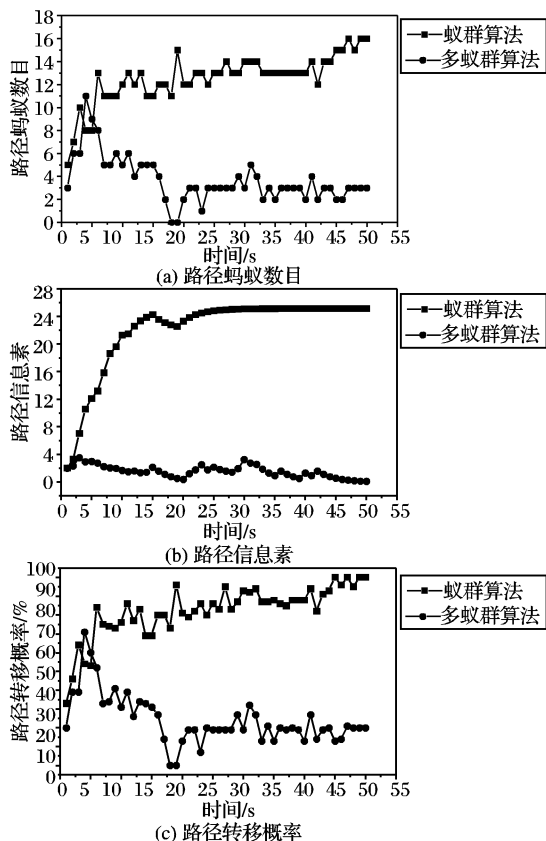


图3 拥塞路径 CE 的蚁群算法均衡性能

实验结果表明,基本算法由于信息素不断累积,而导致转移概率增加,多蚁群算法的蚂蚁也相应逐渐增多;而采用多蚁群抑制能够通过蚁群间信息素的相互抑制,使信息素增加到一定程度后呈下降趋势,趋于一种稳定状态,从而实现对瓶颈 CE 上蚂蚁(流量负载)数目的控制。

### 3.2 网络负载均衡性能

网络负载均衡性能实验拓扑与参数设置同 3.1 节,选择以下三个网络性能统计量作为测度:1) 平均带宽利用率  $\bar{B} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^{50} \text{bwidth}(i \cdot T)$ ; 2) 平均路径延时  $\bar{D} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^{50} d(i \cdot T)$ ; 3)

$$\text{平均丢包率 } \bar{L} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^{50} \text{Loss}(i \cdot T)。$$

网络均衡性能实验结果如图 4 所示,其中  $x$  轴对应网络中主要路径,  $y$  轴分别表示平均带宽利用率  $\bar{B}$ 、平均路径延时  $\bar{D}$  和平均丢包率  $\bar{L}$ 。实验结果表明,与基本蚁群不同,多蚁群算法可以把蚂蚁(网络中传输的数据量)合理分配到各个路径,而不是把数据越来越多地引入最短路径 CE,达到网络的负载均衡目的,且达到更好的 QoS 网络性能,即:带宽利用率(62% ~ 77%)、平均路径延时(8.95 ~ 11.75 ms)、平均丢包率(0.12% ~ 0.18%) 在一个较小范围变化。

网络均衡性能定量分析如表 1 所示,本文算法能够有效实现网络负载均衡,提高网络的性能。算法具有更有效的带宽利用率(66.59%),更少的路径延时(10.65 ms)和更少的丢包率(14.94%)。

## 4 结语

提出一种多蚁群的网络负载动态均衡方法,用于实现网络管理中的负载均衡优化问题。算法将蚁群算法扩展为多蚁

群算法,采用动态信息素建模实现动态设计。未来工作将集中在复杂网络仿真的均衡性能验证。

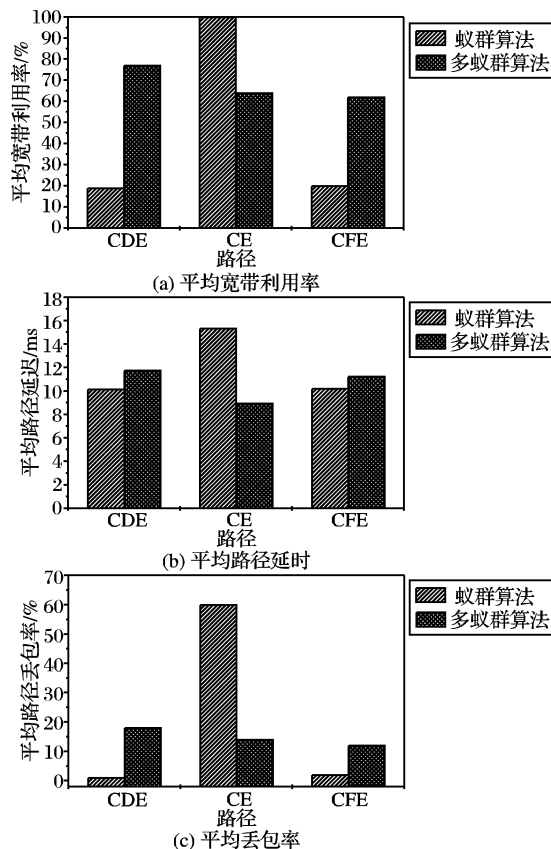


图4 网络均衡性能实验结果

表 1 网络均衡性能的定量统计

均值	$\bar{B}/\%$	$\bar{D}/\text{ms}$	$\bar{L}/\%$
基本蚁群	45.97	11.89	21.01
多蚁群	66.59	10.65	14.94

### 参考文献:

- [1] RONG B, BENNANI M, KADOCH M, *et al.* Traffic engineering extension for traditional QoS multicast routing algorithms[C]// IEEE ICC'05. [S. l.]: IEEE Press, 2005: 208 ~ 212.
- [2] ANALOUI M, JAMALI S. A conceptual framework for bio-inspired congestion control in communication networks[C]// Proceedings of the 1st international conference on Bio inspired models of network, information and computing systems. New York: ACM Press, 2006: 1 ~ 5.
- [3] COLORNI A, DORIGO M. Distributed optimization by ant colonies [C]// Proceedings of the First European Conference on Artificial Life. Paris: Elsevier Prss, 1992: 134 ~ 144.
- [4] 丁建立, 陈增强, 袁著祉. 基于混合蚁群算法的网络资源均衡与优化[J]. 仪器仪表学报, 2003(21): 592 ~ 598.
- [5] 肖晓丽, 田悦宏, 李振. 一种基于蚁群算法的网络负载分担路由方法[J]. 计算机应用, 2006, 26(7): 1697 ~ 1699.
- [6] 罗万明, 林闯, 阎保平. TCP/IC 拥塞控制研究[J]. 计算机学报, 2001, 24(1): 1 ~ 3.
- [7] 李敏强, 寇纪淦. 多模态函数优化的协同多群体遗传算法[J]. 自动化学报, 2002, 28(4): 497 ~ 504.
- [8] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [9] SCHOONDERWOERD R, HOLLAND O, BRUTEN J, *et al.* Ant-based load balancing in telecommunications networks[J]. Adaptive Behavior, 1996, 5(2): 169 ~ 207.