

# 基于蚁群-免疫算法的无线 Mesh 网 QoS 路由算法<sup>①</sup>

刘宏伟<sup>1</sup>, 罗卫兵<sup>1</sup>, 胡健生<sup>1</sup>, 李德梅<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(武警工程大学 信息工程系, 西安 710086)

<sup>2</sup>(武警内蒙古总队 司令部, 呼和浩特 010000)

**摘要:** 无线 Mesh 网络作为一种新型无线网络技术, 应用日趋广泛. 为求解无线 Mesh 网 QoS 路由问题, 提出一种蚁群-免疫混合算法, 该算法结合蚁群算法和免疫算法的特性, 在搜索解的过程中, 通过增强解的对比度与动态调整参数 Q 相结合, 加快收敛速度, 防止算法陷入局部最优, 并根据先验知识提出了适应 QoS 问题的免疫变异策略, 有效的提高了算法的全局性能.

**关键词:** 无线 Mesh 网; QoS 路由; 蚁群算法; 免疫算法; 融合

## QoS Routing Algorithm of Wireless Mesh Network Based on Ant Colony Algorithm and Immune Algorithm

LIU Hong-Wei<sup>1</sup>, LUO Wei-Bing<sup>1</sup>, HU Jian-Sheng<sup>1</sup>, LI De-Mei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Department of Information Engineering, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

<sup>2</sup>(Department of Information, Inner Mongolia Unit of CAPF, Hohhot 010000, China)

**Abstract:** As a new wireless network technology, Wireless Mesh Network is applied increasingly widespread. The paper presents a new combining algorithm based on the characteristics of ant colony algorithm and immune algorithm to deal with the problem of the wireless mesh network's QoS routing. Through enhancing the contrast of solution and adjusting parameter Q dynamically in the process of search for the solution, the algorithm not only speeds up the convergence, but prevents the algorithm into a local optimum. It also proposes an immune variation solve the QoS routing problem by the priori knowledge, and this variation improves the algorithm global performance effectively.

**Key words:** wireless mesh network; QoS routing; ant colony algorithm; immune algorithm; combination

WMN(wireless mesh network)是一种新型的高速度、高容量的宽带无线网络, 其中它的节点兼具路由和转发的功能, 可以动态进行自组织、自我配置多跳无线分布式网络<sup>[1]</sup>. WMN 路由协议改进是优化网络性能的一个关键手段, QoS 作为解决网络延迟和堵塞等问题的关键技术, 一直是研究的重点问题. 文献[2]选取期望传输次数作为路由选择标准以保证系统高吞吐量. 文献[3]为进一步提高路由性能, 引入自适应传输速率控制算法和快速获取链路丢包率机制. 文献[4]以算法累计处理总时延为路由选择标准以获得系统最低时延. 文献[5]针对 WMN 网络中存在的网络延迟, 及算法运行速度慢的问题, 结合蚁群算法及粒子群算

法提出一种自适应物种寻优算法. 文献[6]以即时丢包率以及平均丢包率最低为标准, 保证了系统的丢包率最小. 文献[2-6]主要针对单一的 QoS 路由判断, 但是 WMN 时变性强, 单一判断标准很难满足业务需求. WMN 多 QoS 约束条件的路由算法, 已被证明是 NP-Complete 问题. 文献[7]提出一种基于蚁群算法的 QoS 路由优化方法, 但是该算法由于初期信息素缺乏, 导致搜索初期积累信息素时间较长. 文献[8]提出一种自适应调整信息素挥发因子的蚁群算法改进策略, 通过自适应改变信息素挥发因子, 提高算法搜索速度及全局搜索能力. 文献[9]提出一种混合遗传-蚁群算法, 该算法利用两种算法寻优搜索中不同时期的优势, 克

① 基金项目:国家自然科学基金(61309008)

收稿时间:2015-01-14;收到修改稿时间:2015-03-23

服了蚁群算法初期信息素缺乏问题,但是该算法的收敛速度较慢,影响了系统的整体性能.文献[10]提出一种新的基于文化算法求解 WMN 的 QoS 路由问题,新算法将传统文化算法与粒子群优化算法相结合,具有较好的全局寻优能力,但是算法的复杂度较高.本文在以上研究的基础上,针对 WMN 中多约束 QoS 路由问题,提出了基于免疫-蚁群算法的解决方案.

## 1 WMN网络QoS路由模型

### 1.1 WMN 网络数学模型

WMN 网络中的节点按其功能分为 Mesh 路由器和 Mesh 客户机两类<sup>[11,12]</sup>.其中 Mesh 路由器构成骨干网,并和有线因特网相连接; Mesh 客户机为网络终端,采用多跳的方式与 Mesh 路由器连接. WMN 网络中, Mesh 路由器主要负责收集全网信息,通过寻找自动调整通信路由,获取最有效传输路径,实现终端与终端之间、终端与因特网之间的通信.如何在保证 QoS 要求的前提下,获取有效的传输路径,这一问题可进一步抽象为多约束条件下的 TSP 问题.在求解 TSP 问题中,免疫、蚁群算法都有较好的应用效果,本文结合以上两种算法的良好特性,求解多约束条件下,WMN 网络 QoS 路由问题.

### 1.2 WMN 网络多约束 QoS 路由模型

定义 1.  $S=(P, R)$ 表示WMN模型,其中 $P$ 表示网络节点集合, $R$ 表示节点链路集合, $r$ 为WMN网络节点  $p \in P$ 的发射范围, $d$ 表示相邻的两个节点之间的距离,如果 $d \leq r$ ,表明相邻的两个节点之间存在一条链路 $r$ ,且  $r \in R$ .

定义 2. 给定 $S=(P, R)$ ,源节点  $a \in P$ 到目的节点  $b \in P$ 之间所有路径集合记为  $G$ ,路径集合中包含相应的节点集合 $P$ ,链路集合 $R$ ,整个过程中的 QoS要求如下:

1) 时延:

$$Delay(g) = \sum_{p \in P(g)} Delay(p) + \sum_{r \in R(g)} Delay(r)$$

2) 带宽:

$$BandWidth(g) = \min\{BandWidth(p), p \in P(g)\}$$

3) 丢包率:

$$Loss(g) = 1 - \prod_{p \in P(g)} (1 - Loss(p))$$

4) 代价:

$Cost(g) = |P(g)|$  为所走路径的跳数.

在WMN中,算法的根本目的就是在满足以下QoS约束条件,求解出最小代价的路径 $g'$ :

1)  $Delay(g') \leq D$ ;

2)  $Bandwidth(g') \geq B$ ;

3)  $Loss(g') \leq L$ ;

4)  $Cost(g')$ 最小((1)(2)(3)均满足).

其中, $D$ 为时延约束, $B$ 为带宽约束, $L$ 为丢包率约束.

同时为区分相同跳数时解的质量,定义权重函数如下:

$$F(g) = a \cdot Delay(g) + b \cdot (B - Bandwidth(g)) + c \cdot Loss(g)$$

$a$ 、 $b$ 、 $c$ 均为归一化参数,分别表示时延、带宽、丢包率的重要程度.

## 2 免疫-蚁群算法的设计

免疫算法的特点是拥有较好的全局搜索能力以及对多峰值函数的较好搜索能力,能够快速高效地找到各个极值点<sup>[13]</sup>.蚁群算法的特点是具有较强的鲁棒性,适用范围广泛,并行处理能力较强,但是也存在收敛速度慢,容易陷入局部最优的缺点.结合无线 Mesh 网络的特性,本文借鉴参考文献[14]的融合方法,提出一种混合算法,结合蚁群算法和人工免疫算法的优势,一方面通过动态调整信息素浓度与增强解的对比度相结合,另一方面在蚁群算法的后期,引入免疫算法,从而加快蚁群进化速度,提高算法的收敛速度<sup>[15]</sup>.

### 2.1 蚁群算法的设计

假定 QoS 蚂蚁路由算法中有  $m$  只蚂蚁,并且采用了全局和局部信息素更新规则.

#### 2.1.1 状态转移规则

根据基本蚁群算法设计过程,蚂蚁 $k(k=1, 2, \dots, m)$ 从源节点到目的节点的转移过程中,首先,根据各条路径上的信息量及路径的启发信息,计算状态转移概率,之后再按照状态转移概率选择下一跳节点.每跳过后通过禁忌表 $tabu_k(k=1, 2, \dots, m)$ 来记录蚂蚁 $k$ 当前所走过的节点,这样就使蚂蚁在一次寻找过程中,避免了重复经过同一节点,可选的节点集合随着禁忌表进化过程做动态调整.

在 $t$ 时刻蚂蚁 $k$ 由元素(节点) $i$ 转移到元素(节点) $j$ 的状态转移概率用 $p_{kij}(t)$ 表示:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ik}(t)]^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{is}(t)]^\beta} & \text{若 } j \in allowed_k \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\alpha$  为信息启发式因子, 表示轨迹的相对重要性;  $\beta$  为期望启发式因子, 表示能见度的相对重要性;  $\eta_{ij}(t)$  为启发函数,

$$\text{表示为 } \eta_{ij}(t) = 1/cost(i, j)$$

### 2.1.2 信息素的局部更新规则

局部更新方式是每只蚂蚁完成一次选择后进行, 其更新公式为:

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij} + \rho \cdot \tau_0 \quad (2)$$

式中,  $\rho$  表示信息素挥发系数, 则  $1-\rho$  表示信息素残留因子,  $\rho$  的取值范围为:  $\rho \in [0, 1]$ ;  $\tau_0$  为初始信息素浓度.

### 2.1.3 信息素的全局更新规则

在所有蚂蚁都完成一次周游后, 各条边上的信息素量按照下面的公式进行调整:

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}(t) \quad (3)$$

其中

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{cost_k} & \text{第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中经过 } (i, j) \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

其中信息素强度  $Q$  为常数,  $cost_k$  为第  $k$  只蚂蚁在本次循环中所选路径的总花费.

为了有效地克服基本蚁群算法中容易陷入局部最优解的问题, 同时加快收敛速度, 结合参考文献[16-17]中的两种方法, 对  $\Delta \tau_{ij}^k(t)$  进行了重新定义如下:

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q(t)}{e^{(Cost_k - Cost_{min})}}, ij \in e_k \\ 0, \text{ 否则} \end{cases} \quad (4)$$

其中  $Cost_{min}$  为本轮循环中的最小花费,  $Q(t)$  为阶梯函数:

$$Q(t) = \begin{cases} Q_1 & t \leq T_1 \\ Q_2 & T_1 < t \leq T_2 \\ Q_3 & T_2 < t \leq T_3 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $Q_i$  对应阶梯函数的不同取值式(4)使信息素浓度能够更好的反应优质解与劣质解的差别; 式(5)可以适时控制信息素浓度, 在获取最优解的过程中, 初始阶段算法可能会很快陷入某个极值点, 此时可以减少  $Q(t)$  值, 防止算法进入局部最优, 在算法进行一段时间后, 可以适当增大  $Q(t)$  值, 这样可以加快收敛速度.

## 2.2 免疫算法的设计

免疫算法在 QoS 路由问题中具体实现时必须解决如下几个关键问题.

1) 抗体的编码形式如下:

$L(f, n_1, n_2, \dots, n_k, a)$	$Cost$	$Delay$	$Loss$
---------------------------------	--------	---------	--------

2) 抗原的编码形式如下

$From$	$Aim$	$Bandwidth$	$Delay$	$Loss$
--------	-------	-------------	---------	--------

3) 构造人工免疫算子

抗体群产生之后, 算法要进行的主要操作是克隆、变异、选择.

克隆算子的定义:  $T_c = T_c(A(k)) = [T_c(A_1(k)),$

$T_c(A_2(k)), \dots, T_c(A_m(k))]$

其中,  $A' i(k) = T_c(A_i(k)) = I_i \cdot A_i(k), i=1, 2, \dots, m$ , 其中  $I_i$  为元素为 1 的  $q$  维行向量, 称为对抗体  $A_i$  的  $q$  克隆,  $q$  为常数.

变异策略: 对抗体  $A_0$ , 随机选取一抗体位  $i_0$  (节点), 设任意节点  $j$  到  $i_0$  之间花费最大值为  $Cost_{max}$ , 根据先验知识, 取下一访问节点为  $j$  的概率:

$$P_j = \frac{[Cost_{max} - Cost(i_0, j)]^2}{\sum_{k=1}^n [Cost_{max} - Cost(i_0, k)]^2} \quad (6)$$

由于下一访问节点不能为  $i_0$ , 因此设  $Cost(i_0, i_0) = Cost_{max}$ . 若根据概率选取节点为  $j_0$ , 则  $j_0$  将排在  $i_0$  之后. 选择策略: 定义抗体与抗原的亲密度为:

$$f(A_i(k)) = D / \sum_{i=1}^{n-1} Cost(n_i, n_{i+1}) \quad (7)$$

其中,  $n_i$  为抗体位, 即路由节点,  $D$  为参数. 若存在变异抗体亲密度大于原抗体, 则更新原抗体.

### 2.3 混合算法的设计

- 1)删除带宽小于需求带宽的链路, 过滤网络结构;
- 2)参数初始化;

3)随机将蚂蚁放在  $n$  个节点上, 第  $k$  只蚂蚁从源节点出发, 首先将源节点加入禁忌表, 之后判断源节点是否为 WMN 骨干节点, 若不是骨干节点, 则跳至源节点所在子系统的骨干节点, 并将源节点与骨干节点记入禁忌表。

4)判断禁忌表, 根据状态转移规则来选择下一跳节点;

5)在蚂蚁选择下一跳节点之后, 比较从当前节点经其所在子系统骨干节点到下一跳节点所在子系统骨干节点与从当前节点直接经下一跳节点到下一跳节点所在子系统骨干节点的权重函数的大小, 选择权重函数较小的路径。蚂蚁跳过后, 均应用局部信息素更新规则对刚才的路径的信息素量进行修改, 直到  $n$  只蚂蚁均完成解的搜索;

6)记录此次  $n$  只蚂蚁产生的最优解;

7)形成蚂蚁抗体群;

8)从蚂蚁抗体群中, 挑选出花费最小的  $v$  个解, 得到初始抗体群  $A$ , 之后, 对初始抗体群进行变异、交叉、疫苗接种和免疫选择, 这样就产生了新一代抗体群  $A'$ ;

9)全局信息素更新;

10)判断是否满足算法的终止条件, 如满足则算法停止; 否则, 转(2)。

## 3 实验仿真

### 3.1 仿真环境

硬件平台: CPU: Intel Core i5;

内存: 2G

操作系统: Windows 7

仿真软件: MATLAB R2009a, Visual C++6.0

### 3.2 网络构架及参数设定

根据 WMN 网络拓扑结构, 设定网络节点  $R=30$ , 选取 5 个中心节点, 根据其他节点按照到中心节点的的花费, 将整个 WMN 网络拓扑结构划分为 5 个子系统。

算法参数: 蚁群规模(蚂蚁数量) $m$ 、信息启发式因子  $\alpha$ 、信息素残留系数  $\rho$ 、期望值启发式因子  $\beta$  和信息素强度  $Q$ , 克隆比例  $NB$ , 最大迭代次数  $NC$ 。

### 3.3 实验仿真

实验混合算法参数设置如下:  $\alpha=1, \beta=5, \rho=0.8, Q_1=0.5, Q_2=1, Q_3=2, t=100, m=20, NB=5, NC=120$ 。

实验一: 验证算法的有效性, 其他参数一定的情况下, 比较算法的参数  $\rho$  和  $Q$  自适应调整后对系统传输时延、包丢失率、费用平均值的影响。实验结果如表 1。

表 1 的仿真结果表明, 本文算法可以很快获得具有较好 QoS 性能参数的路径, 而且具有较强的稳定性。

表 1 系统能耗分析

参数	传输时延	包丢失率	系统费用
$\alpha=1, \beta=5, \rho=0.8, Q_1=0.5, Q_2=1, Q_3=2$	7	0.169	154.25
$\alpha=1, \beta=5, \rho=0.9, Q_1=0.5, Q_2=1, Q_3=2$	7	0.165	152.18
$\alpha=1, \beta=5, \rho=0.8, Q_1=1, Q_2=1.5, Q_3=2.5$	7.5	0.160	160.20
$\alpha=1, \beta=5, \rho=0.9, Q_1=1, Q_2=1.5, Q_3=2.5$	7	0.159	151.24

实验二: 参数设置不变, 比较相同实验环境下基本蚁群算法、免疫算法、混合算法的平均延时, 如图 1 可以看出混合算法的平均延时明显好于其他两种基本算法。

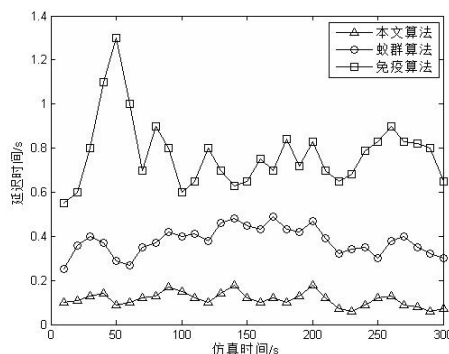


图 1 平均延时对比

实验三: 其他参数设置不变, 改变节点数目  $R$ , 对比三种算法 在不同网络节点数量时的运算时间, 如表 2 所示, 随着网络规模的扩大, 混合算法相比于其他两种算法, 其运算效率方面优势更加明显, 提高了算法的可扩展性。

表 2 算法运算时间(s)对比

节点算法(个)	10	20	30	40	60	80	100
免疫算法	350	450	800	1200	2800	4500	7000
蚁群算法	300	400	600	1000	1800	2800	3900
本文算法	250	350	500	700	950	1400	1900

## 4 结 语

无线 Mesh 网络作为一种新兴无线技术, 广泛应用于家庭宽带网络、校区和城域网络、协同网络管理、智能传输系统, 这就对 QoS 有了与传统网络不同的需求<sup>[18]</sup>. 本文提出的融合算法降低了平均延时, 同时也减少了运算时间. 仿真结果表明, 针对 WMN 网络 QoS 路由问题, 对比两种基本算法, 本文提出的混合算法在提高运算效率以及可扩展性方面有了提高.

### 参 考 文 献

- 1 Akyildiz IF, Wang XD, Wang WL. Wireless mesh networks: A survey. *Computer Networks*, 2005, 47(4): 445–487.
- 2 De Couto SJD, Aguayo D, Bicket J, Morris R. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *Wireless Networks*, 2005, 11(4): 419–434.
- 3 Aguayo D, Bicket J, Morris R. SrcRR: A high throughput routing protocol for 802.11 mesh networks (draft). <http://pdos.csail.mit.edu/~rtm/srcrr-draft.pdf>, 2004
- 4 Lee BS, San MN, Lim TM, Yeo CK, Seet BC. Processing delay as a new metric for on-demand mobile ad-hoc network routing path selection. *Int'l Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM. 2006.* 1–4.
- 5 万智萍, 吕志民. 一种自适应物种寻优的无线 Mesh 网络 QoS 路由算法. *山东大学学报(理学版)*, 2013, 9(9): 10–16.
- 6 Koksai CE, Balakrishnan H. Quality-aware routing metrics for time-varying wireless mesh networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(11): 1984–1994.
- 7 孙丹丹, 苗建松, 王朝翔, 丁炜. Ad Hoc 网络中基于蚁群优化的路由选择算法. *吉林大学学报(信息科学版)*, 2007, 25(6): 582–586.
- 8 王霄, 吴开军. 基于改进蚁群算法的无线 Mesh 网 QoS 路由算法研究. *计算机系统应用*, 2011, 20(7): 111–115.
- 9 姜华, 李寰. 基于遗传-蚁群算法的无线 Mesh 网 QoS 路由算法研究. *计算机工程与设计*, 2009, 30(16): 3837–3840.
- 10 张月华, 孙学梅, 张明伟, 李春彦. 基于文化算法的无线 Mesh 网络 QoS 路由算法. *计算机应用与软件*, 2012, 11(29): 264–268.
- 11 Akyildiz IF, Wang XD. A survey on wireless mesh networks. *IEEE Radio Communication*, 2005, 43(9): S23–S30.
- 12 Bruno R, Conti M, Gregori E. Mesh Networks: Mesh network: Commodity multihop Ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(3): 123–131.
- 13 张泓, 李爱平, 刘雪梅. 面向 TSP 求解的混合蚁群算法. *计算机工程*, 2009, (8): 34–37.
- 14 刘好斌, 胡小兵, 赵吉东. 带免疫变异的蚁群优化算法. *计算机仿真*, 2010, 27(12): 221–223, 240.
- 15 段海滨. 蚁群算法原理及其应用. 北京: 科学出版社, 2005.
- 16 覃刚力, 杨家本. 自适应调整信息素的蚁群算法. *信息与控制*, 2002, 31(3): 198–201.
- 17 胡琼琼, 雷秀娟, 张兰. 改进的蚁群算法在 QoS 网络路由中的应用. *计算机工程与应用*, 2011, 47(13): 212–215.
- 18 Hossain E, Leung KK. 易燕, 等译. 无线 Mesh 网络架构与协议. 北京: 机械工业出版社, 2009.