

基于改进蚁群算法的无线 Mesh 网 QoS 路由算法研究^①

王 霄¹, 吴开军^{1,2}

¹(上海海洋大学 信息学院 上海 201306)

²(上海海洋大学 现代信息与教育技术中心 上海 201306)

摘 要: 目前, 无线 Mesh 网络正成为无线网络研究中的一个热点。Quality of service (QoS) 是无线 Mesh 网络中的一个非常重要问题, 而 QoS 路由技术是解决这一问题的关键技术之一。本文就蚁群算法进行研究和改进, 并将改进后的算法应用于无线 Mesh 网络 QoS 路由问题, 进而提出了无线 Mesh 网络 QoS 路由算法, 通过实验证明该算法能够对 QoS 提供较好的支持。

关键词: Quality of service (QoS); 蚁群算法; 无线 Mesh 网

Research of QoS Routing Algorithm of Wireless Mesh Network Based on Improved Ant-colony Algorithm

WANG Xiao¹, WU Kai-Jun^{1,2}

¹(College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

²(Center of Modern Information and Educational Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Currently, the wireless Mesh network is a hot spot of wireless network research. In wireless Mesh network, QoS is an important issue, and QoS routing is the key technology to solve this problem. In this paper, we proposed a wireless Mesh network QoS routing algorithm on Improved ant colony algorithm, and our experimental results shows that it can provide better QoS support.

Key words: quality of service; ant colony algorithm (ACA); wireless mesh network

Quality of Service(简称 QoS)标准定义是用户对服务性能满意程度的综合服务因素。在计算机网络系统中, QoS 路由的任务就是在网络中寻找一条路由, 满足用户对线路的带宽、延时、延时抖动、费用的要求, 即向用户提供端到端的服务质量保证。

无线 Mesh 网(Wireless Mesh Networks, WMN)是一种新型的宽带无线网络结构, 它具有动态自组织、自我配置的路由和转发功能的多跳无线网络, 即一种高容量、高速率的分布式网络。对无线 Mesh 网的早期研究源于移动 Ad Hoc 网络的研究与开发, 它不同于传统的有线与无线网络, 可以看成是一种无线局域网和 Ad Hoc 网络的融合, 并且同时兼顾了两者的优势。无线网状结构作为可以解决“最后一公里”网络接入瓶颈问题的方案, 已被写入了 IEEE 802. 16(WiMAX)

无线宽带接入网络标准中。目前也被纳入到 IEEE 802.15 Mesh 和正在制定的 IEEE 802.11 Mesh 标准中。从技术特点来看, 无线 Mesh 网将成为未来无线城域网(wMAN)核心网理想的组网方式, 极有可能挑战 3G 技术, 成为构建 3G / 4G 的潜在技术之一。也是迄今为止唯一一种建设商用移动 Ad Hoc 网络的可行技术。

WMN 设计中的一个关键问题是要开发能够在两个节点之间提供高质量, 高效率通信的路由协议, 所以 WMN 路由协议的研究是一个热点问题, 又由于 WMN 主要承载因特网业务, QoS 路由保证尤为重要。QoS 路由问题是一个 NP 完全问题[1]。鉴于蚁群算法在求解离散的复杂组合优化等 NP 问题上有优异的表现, 如 TSP 问题。本文采用该算法来进行 QoS 路由的优化。

① 基金项目:上海市教委科研基金(名称:E-研究院建设,编号:B-8401-08-0179)

收稿时间:2010-11-07;收到修改稿时间:2010-12-10

蚁群算法是意大利学者 M. Dorigo, V. Maniezzo 等^[2]人通过模拟自然界蚂蚁寻径的行为,提出了一种全新的启发式算法,蚁群靠感知挥发性分泌物“信息素”的强度来进行信息的传递。该算法是一种分布式的全局优化算法,具有正反馈机制,通过信息素的不断更新高效收敛来获得最优解,在网络通信 QoS 路由优化中有所应用^[3]。但是该算法由于初期信息素缺乏,导致搜索时间较长,而且容易出现最优解停滞现象。

针对无线 Mesh 网络 QoS 路由特点,本文研究一种自适应调整信息素挥发因子的蚁群算法改进策略,旨在通过自适应的改变信息素挥发因子来提高算法搜索速度及算法的全局搜索能力,使其能够更好地适用于无线 Mesh 网络的 QoS 问题。

1 无线 Mesh 网络 QoS 路由模型

1.1 无线 Mesh 网拓扑模型

一个基本的无线 Mesh 网络(WMN)架构^[4]如图 1 所示,无线 Mesh 网中通常包含两种节点: Mesh 路由器节点和 Mesh 客户机节点。

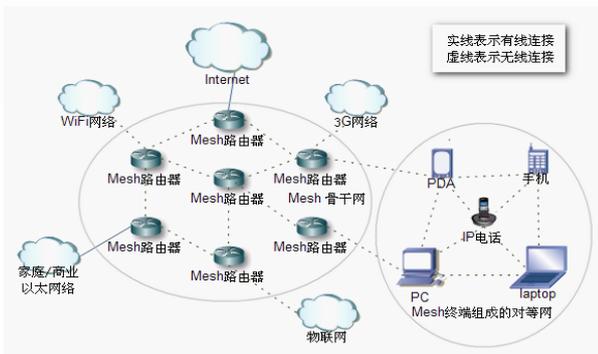


图 1 无线 Mesh 网络架构

(1) Mesh 路由器节点

Mesh 路由器节点能力(电源、通信和计算资源等)较强,具有路由的能力,在网络中扮演 Gateway 或 Bridge 等角色。

(2) Mesh 客户机节点

Mesh 客户机节点具有以 Mesh 方式组网的基本能力,当然 Mesh 客户机节点也可以作为路由节点使用。和 Mesh 路由器节点不同的是,它不具备 Gateway 和 Bridge 的功能,硬件和软件平台都相对简单。Mesh 客户机节点可以基于各种平台,如笔记本、台式机、手机、PDA 和 IP 电话等。

Mesh Router 作为提供基础服务的设施,移动性最小,由它来构成 WMN 骨干网,并通过网关或路由器接入到互联网或其它网络;而 Mesh Client 作为网络中的端节点,可以完全固定,也可以处于不停的移动之中,它采用多跳方式与 Mesh 路由器进行通信。WMN 中可以利用 Mesh 路由器收集全网信息,为运用蚁群算法实现 Mesh 网 QoS 路由提供了保障。

1.2 WMN 的 QoS 数学模型

定义 1 有向图 $G=(V,E)$ 表示无线 Mesh 网模型,其中 V 表示节点集, E 表示链路集, r 为无线节点 $v \in V$ 的辐射范围, d 表示两个相邻节点间距离,若 $d \leq r$, 则该相邻节点间存在一条链路 e , 且 $e \in E$ 。

定义 2 给定有向图 $G=(V,E)$, 源节点 $s \in V$ 到目的节点 $d \in V$ 的路径集为 P , 对于一条路径 $p \in P$ 的边集为 $E(p)$, 节点集为 $N(p)$, 则 QoS 参数定义如下^[5]:

$$Delay(p) = \sum_{e \in E(p)} Delay(e) + \sum_{n \in N(p)} Delay(n) \quad (1-1)$$

$$BandWidth(p) = \min\{BandWidth(e), e \in E(p)\} \quad (1-2)$$

$$Lost(p) = 1 - \prod_{n \in N(p)} (1 - Lost(n)) \quad (1-3)$$

$$Cost(p) = \sum_{e \in E(p)} Cost(e) + \sum_{n \in N(p)} Cost(n) \quad (1-4)$$

其中 p 从源节点 s 到目的节点 d 的路由路径。式(1-1)表示路径的时延等于该路径上所有节点的时延与链路时延之和。式(1-2)表示路径的带宽等于路径上链路带宽的最小值。式(1-3)表示路径的包丢失率为 1 与路径上节点的接通率之积的差。式(1-4)表示路径的费用等于路径上节点费用与链路费用之和。

根据 WMN 特点,在 WMN 中执行 QoS 路由算法的目标即选择满足如下条件且使得代价最小的路径。

(1) 时延约束: $Delay(p^*) \leq D$;

(2) 带宽约束: $BandWidth(p^*) \geq B$;

(3) 丢包率约束: $Lost(p^*) \leq L$;

(4) 费用约束: $Cost(p^*)$ 在所有满足式(1)–(3)条件的路径中 $Cost(p^*)$ 最小 p^* 。

上述条件表示在满足超过最小带宽,小于允许的最大时延以及低于最大丢包率 QoS 约束下,寻求花费最小的路径。其中, B 为带宽约束, D 为时延约束, L 为丢包率约束。

2 改进蚁群算法的设计

为了提高蚁群算法的全局搜索能力及其搜索速度,防止它过早陷入局部最优解。我们提出了一种判断进入局部最优的策略,以此策略为指导,来控制算法中参数的变化,以高概率跳出局部最优,以求得最优解。

2.1 蚁群算法陷入局部最优原因及判断方法

蚂蚁选择路径主要依据于路径上的信息素浓度。当某条路径上的信息素浓度大到一定程度时,蚂蚁再选择其它路径的概率就很小了。当蚂蚁走的路径是各条信息素浓度大的路径的组合时(我们称之为最大信息素浓度路径),蚂蚁所走路径改变的概率就很小了。当算法再运行一段时间后,蚂蚁只走某条路径,此时蚁群算法陷入局部最优。由此看见,在解 TSP 问题时我们可以用最大信息素浓度路径的长度 L_M 和算法算出路径最小的长度 L_{MN} , 相比较,来判断算法是否陷入局部最优。当 $L_M < L_{MN}$ 时,由蚂蚁选择路径的方法可知此时算法还没有进入局部最优;当 $L_M \geq L_{MN}$ 时,此时算法有可能进入局部最优,如果算法再运行几次还是这个结果,就可以认为算法陷入局部最优。

2.2 蚁群算法改进方法

在蚁群中出现一只蚂蚁,它的行为规则是:

- (1) 此蚂蚁转移到下一城市选择信息素浓度最大的路径。
- (2) 如果出现有几条路径上的信息素浓度相同且信息素浓度的值同为最大,则此蚂蚁在选择转移到下一城市时,选择期望度最大的路径。
- (3) 此蚂蚁不引起信息素的更新,且它在蚁群算法运行一定次数后才在算法中起作用。
- (4) 此蚂蚁所得到的解记为 L_M 。

信息素强 Q 是表征蚂蚁所留轨迹数量的一个常数,它会影响算法的全局收敛速度。值过大,会使算法收敛于局部最小值;其值过小,会使全局收敛速度减慢。在城市很多的情况下,轨迹的持久性 ρ 太大,算法的全局搜索能力就会降低。若减小 ρ ,算法的全局搜索能力会随之提高,但收敛速度亦会变慢。

若 $L_M \geq L_{MN}$,此时蚁群算法可能陷入了局部最优,这里我们设定信息素挥发因子 ρ 的初始值 $\rho(t_0) = 1$,则当蚁群算法求的最优值在 N 次循环内没有明显改进时,我们可以通过调整 Q 和 ρ [6]的取值以高概率跳出局部最优。

$$\rho(t+1) = \begin{cases} 0.95\rho(t), & \text{若 } 0.95\rho(t) > \rho_{\min} \\ \rho_{\min}, & \text{否则} \end{cases} \quad (2-1)$$

$$Q(t+1) = \rho(t) \times Q(t) \quad (2-2)$$

式中, ρ_{\min} 为 ρ 的最小值,可以防止 ρ 过小降低算法的收敛速度。同时,为了提高蚁群算法的全局搜索能力,提高其搜索速度,还在每次循环结束时求出最优解,并将其保留。将参数改变后,算法继续运行。

3 基于改进蚁群算法的QoS路由算法

将蚁群算法应用于网络 QoS 路由时,把源节点和目的节点分别当作“蚁穴”和“食物”,数据包视为蚂蚁,在经过的路径上留下的信息素用路由表代替,表中的信息素浓度以概率值的形式表示,要求路由节点维持一个路由表。这有助于更好地理解蚁群寻路的原理,与蚂蚁根据信息素多少选择路径具有本质上的一致性。蚂蚁以一定的周期更新信息素表。通过信息素表即节点转移概率表来选择下一步所要走的路径,经过多次迭代后,找到满足 QoS 约束条件信息素最高的路由就是所求的解。

无线 mesh 网络中改进蚁群算法的步骤

- (1) 从 R 个网络节点中选出 P 个子系统的中心节点,并根据这 P 个中心节点访问其它节点的花费来把剩余的节点归入到 P 个子系统中形成 P 个网络系统。各子节点和中心节点之间以及 P 个中心节点之间是连通的。
- (2) 初始化参数。
- (3) 初始化网络拓扑中各链路的相应信息素,各节点与各自所在子系统的中心节点链路间的信息素大于其它链路的初始值,投放 M 只蚂蚁到源节点。
- (4) 每只蚂蚁从源节点出发,判断源节点所在的子系统,跳转到源节点所在子系统的中心节点;接着搜索禁忌表许可,各蚂蚁根据状态转移概率来选择下一跳节点;找到下一跳节点后,判断下一跳节点所在的子系统,并找出该子系统的中心节点,比较从当前节点经下一跳节点到其中心节点的花费以及当前中心节点直接到下一跳节点的中心节点的花费,花费较小的路径为蚂蚁从当前子系统到下一子系统的选择路径。当某只蚂蚁成功地完成路由选择后,该蚂蚁所经过路径的各链路信息素

根据局部信息素更新规则进行更新。

(5) 对所有蚂蚁重复第(4)步, 若每只蚂蚁都已经完成一个完整的路径, 则对当前最优路径上的信息素进行全局更新。

(6) 判断算法是否陷入局部最优, 若算法陷入局部最优则执行步骤(7), 否则, 算法继续运行;

(7) 改变算法的参数

(8) 比较选择使用最小花费并满足 QoS 路由约束的蚂蚁。

(9) 重复第(4)~(8)步, 直到满足结束条件。

4 实验仿真分析

4.1 仿真实验环境

硬件平台: CPU: Intel Core(TM)2 Duo Processor; 内存 2094996 KB

操作系统: Windows Server 2003

仿真软件: MATLAB R2009a, Visual C++6.0

4.2 网络拓扑与参数设定

根据无线 Mesh 网络拓扑架构, 我们从 R 个网络节点中选出 5 个子系统的中心节点, 并根据这 5 个中心节点访问其它节点的花费来把剩余节点归入 5 个子系统形成 Mesh 网络系统结构。然后通过 5 个中心节点来路由选取从起点到终点的最佳路由。

实验中蚁群算法共有 5 个算法参数, 它们分别是: 蚁群规模(蚂蚁数量)m、信息启发式因子 α 、信息素残留系数 ρ 、期望值启发式因子 β 和信息素强度 Q。从蚁群算法搜索最短路径的原理不难看到, 算法中有关参数的不同选择对蚁群算法的性能和 QoS 有至关重要的影响, 影响着算法的精度和效率, 但其选取的方法和原则, 目前尚没有理论上的依据和一种有效的数学分析方法, 使不同情况下的蚂蚁系统都能生成最优的参数, 其设置通常都是根据经验和实验而定。

4.3 实验仿真

实验一: 改变蚁群算法中几组不同的 ρ 、Q 参数, 设定蚂蚁数目 $m=20$, 算法迭代次数 $NC=120$, 运用于节点数目 $R=30$ 的无线 Mesh 网络拓扑中, 抽取运行结果 100 组取平均值进行比较。Max 为 10 组结果中的最大值, Min 为最小值, Avg 为平均值。比较基于改进蚁群算法的无线 Mesh 网 QoS 路由由算法的参数自适应调整后算法对多约束 QoS 性能参数 (包括传输时延、包丢失率、费用) 的影响。实验结果如图 4-1。

Parameter Setting	Cost			Delay			Lost		
	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg
$\alpha=1, \beta=1, \rho=0.6, Q=500$	203.57	106.41	166.3	11	4	7	0.21	0.096	0.167
$\alpha=1, \beta=1, \rho=0.7, Q=500$	199.98	100.91	159.74	9	4	7	0.203	0.081	0.159
$\alpha=1, \beta=1, \rho=0.6, Q=1000$	195.89	105.36	154.25	9	5	7	0.196	0.094	0.146
$\alpha=1, \beta=1, \rho=0.7, Q=1000$	183.43	106.75	162.54	9	5	6	0.189	0.107	0.148

图 4-1

仿真结果表明由于在无线 Mesh 网络中引进自适应改变路由机制参数, 基于改进的蚁群算法可以很快地跳出局部最优获得较局部解好的 QoS 性能参数 (包括传输时延、包丢失率、费用等)。

为了更加直观的反应比较结果, 其他参数保持不变, 抽取两组实验 ($\rho=0.3, Q=1000$) 进行对比分析, 实验结果如图 4-2 和图 4-3 所示。

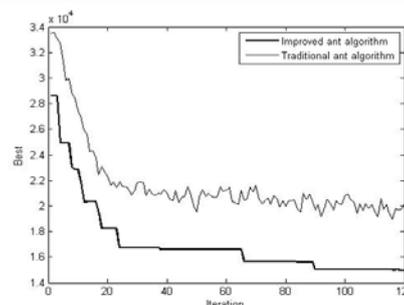


图 4-2

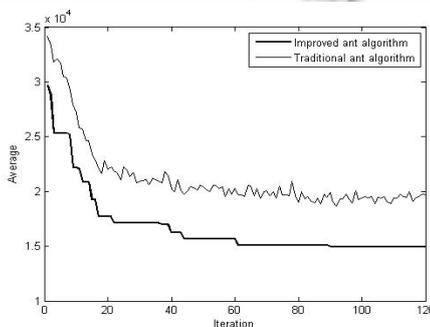


图 4-3

仿真结果表明由于在改进蚁群算法中引入路由参数自动协商更改机制, 在同等条件参数设置情况下, 基于改进的 QoS 路由算法在 Mesh 网络中比在基本蚁群算法中在费用代价、延迟代价、丢包率方面取得了较好的结果。

实验二: 改变节点数目 R, 设定蚂蚁数目 $m=20$, 算法迭代次数 $NC=120$, 运用于节点数目 $R(40, 50, 60)$ 的无线 Mesh 网络拓扑中, 比较基于改进蚁群算法的

无线 Mesh 网 QoS 路由算法的参数自适应调整后算法对多约束 QoS 性能参数（包括传输时延、包丢失率、费用）的影响。实验结果如图 4-4 所示。

Parameter Setting	Cost			Delay			Lost		
	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg
R=60, Q=1000, $\alpha=1, \rho=0.3$	260.49	201.58	223.16	15	8	13	0.208	0.194	0.164
R=50, Q=1000, $\alpha=1, \rho=0.3$	246.99	139.85	189.46	12	6	9	0.179	0.126	0.136
R=40, Q=1000, $\alpha=1, \rho=0.3$	218.98	110.84	128.39	10	4	7	0.102	0.029	0.097

图 4-4

为了更直观的显示上述图 4-4 中改进后蚁群算法对 QoS 性能和收敛性的影响，将进行无线 Mesh 网中不同 R 节点数下多约束 QoS 性能函数平均值的实验。如图 4-5 至 4-7 所示。

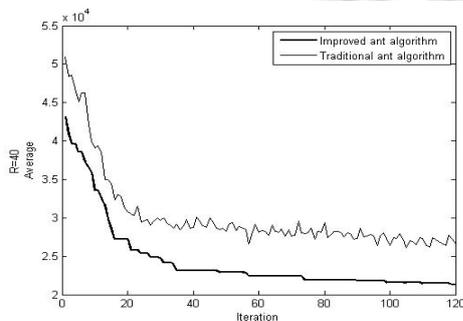


图 4-5

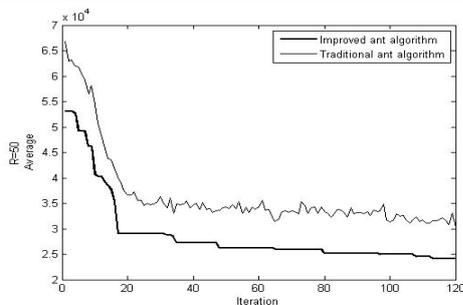


图 4-6

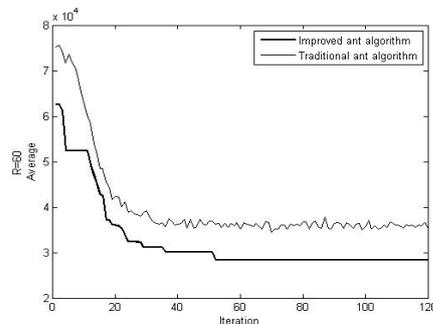


图 4-7

仿真结果表明：改进后的蚁群算法比基本蚁群算法在收敛速度、延迟、开销和丢包率方面获得更好和更稳定的效果。

以上通过多组仿真结果的分析比较表明，改进后的蚁群算法可成功适用于无线 Mesh 网络的多约束 QoS 路由算法，且对传统蚁群算法收敛速度慢，易陷入局部最优的缺点有所改进和优化。

5 结语

无线 Mesh 网络是一种非常有前途的无线接入网络技术。本文简要介绍了无线 Mesh 的网络结构、特点，然后应用蚁群算法对无线 Mesh 网络的路由算法进行分析与研究，使其能够对 QoS 提供较好的支持，最后提出基于蚁群算法的无线 Mesh 网络 QoS 路由算法，并通过实验求解证明该路由算法的可行性和优越性。无线 Mesh 网络 (WMN) 具有很多优点，并且可以提供更好的无线网络连接性和更大的覆盖范围，但这些特性也对 Mesh 网络安全提出了更大的挑战，无线 Mesh 网络的安全问题是值得进一步研究的。

参考文献

- 1 Zheng Wang, Crowcroft J. Quality of Service for Supporting Multimedia Application. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1996, 14(7): 1228-1234.
- 2 Marco Dorigo. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-56.
- 3 Di Caro G, Dorigo M. AntNet: distributed stigmergetic control for communications networks. Journal of Artificial Intelligence Research, 1998, 9: 317-365.
- 4 (加拿大)霍辛 (Hossain E.) (英国)梁 (Leung K.K.) 译者: 易燕. 无线 Mesh 网络架构与协议 (国际信息工程先进技术译丛). 北京: 机械工业出版社, 2009. 5: 2-3.
- 5 王燕琳, 孙雨耕, 薛希俊. QoS 动态路由算法分析. 计算机工程, 2000, 26(12): 64-65.
- 6 Chang CS, Tian L, Wen ES. A New Approach to Fault Section Estimation in Power System Using Ant System. Electric Power System Research, 1999, 49(1): 63-70.