

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.08.020

引用格式:朱先飞,张钺,邓远意,等.一种基于路径目的节点数的改进蚁群算法[J].电讯技术,2014,54(8):1146-1151.[ZHU Xian-fei, ZHANG Yue, DENG Yuan-yi, et al. An Improved Ant Colony Algorithm Based on Numbers of Target Nodes on Routes[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(8):1146-1151.]

一种基于路径目的节点数的改进蚁群算法*

朱先飞^{1,**}, 张钺², 邓远意², 柯峰²

(1. 中国电信股份有限公司 广东研究院, 广州 510000; 2. 华南理工大学 电子与信息学院, 广州 510630)

摘要:组播技术是无线 Mesh 网的关键技术之一,它可以大大提高信息的传播效率。介绍了信息组播的主要步骤,指出蚁群算法是构建路由组播树的高效启发式算法。对传统的蚁群算法进行定性分析,并对其改进,在计算路径费用以及信息素更新时考虑路径上的目的节点个数,路径上的目的节点数越多,其信息素增长速率越快。两个例子的仿真结果表明,该改进算法与传统蚁群算法相比分别使费用和代价减少了 28.57% 和 22.36%,改善了系统性能。

关键词:无线 Mesh 网;组播路由;组播树;蚁群算法

中图分类号:TN915;TP393 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)08-1146-06

An Improved Ant Colony Algorithm Based on Numbers of Target Nodes on Routes

ZHU Xian-fei¹, ZHANG Yue², DENG Yuan-yi², KE Feng²

(1. Guangdong Research Institute, China Telecom Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

2. School of Electronic and Information, South China University of Technology, Guangzhou 510630, China)

Abstract: Multicast technology is one of the key technologies of wireless mesh network (MSN) and it can improve the efficiency of transmitting information significantly. This paper introduces the main steps of multicast and points out that ant colony algorithm (ANA) is an efficient heuristic algorithm for constructing a multicast tree. The traditional ANA is analyzed qualitatively and improved by taking the target nodes on one route under consideration when calculating the route's cost and updating the pheromone. The more target nodes on one route, the faster the increasing rate of pheromone on this route. The simulation results of two examples show that the improved algorithm can reduce the cost and price by 28.57% and 22.36% respectively compared with ANA, thus improving the performance of multicast system.

Key words: wireless mesh network (WMN); multicast routing; multicast tree; ant colony algorithm

1 引言

无线 Mesh 网络是一种大容量、高速率的新型宽带多跳无线接入网络,是未来移动接入网(如 IP RAN)的发展方向。它采用网状 Mesh 拓扑结构,是

一种多点到多点的网络拓扑结构^[1]。

组播服务是无线 Mesh 网面向应用的一项重要服务,它是发送端和各个接收端之间的一种点到多点的数据传输方式,可以大大提高数据传输效率,降

* 收稿日期:2014-01-28;修回日期:2014-04-24 Received date:2014-01-28;Revised date:2014-04-24

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA12A203)

Foundation Item: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA12A203)

** 通讯作者:zhuxf@gsta.com Corresponding author: zhuxf@gsta.com

低骨干网的出现拥塞的几率^[2]。实现信息组播的过程主要包括三个步骤^[2]:一是确定最优信息传播速率;二是确定信息组播路径,即构建组播树;三是确定接口分组和传输时间表。由于无线 Mesh 网各个节点之间是以网状的结构连接在一起,所以确定了信息组播路径之后,要告知每个节点往哪个端口转发数据。此外,由于带宽共享,为了避免发生数据冲突,要确定各个节点的传输时刻。在这三个步骤中,组播树的构建直接关系到组播服务的效率,是最重要的步骤。

传统的构建组播树的组播路由算法主要包括最短路径树(Shortest Path Trees, SPTs)和最小斯坦树(Minimum Steiner Trees, MSTs)。也有学者引入启发式算法来构建组播树,包括遗传算法、退火算法、蚁群算法等。其中,蚁群算法最早是由意大利学者 M. Dorigo 于 1991 年提出^[3],是一种模仿蚂蚁觅食的仿生算法,主要用于解决复杂的组合优化问题。该算法具有分布式、正反馈和富于建设性的贪婪启发式搜索等诸多优点。然而,它同时也具有收敛速度慢、易陷入局部最优的缺点。

近年来,国内外的许多学者都对蚁群算法进行了改进。文献[4]提出了一种树形增长的蚁群算法,使得构建路由组播树的时间大大减少;文献[5]引入了突变算子来避免算法陷入局部最优,并优化了全局信息素更新策略来加速收敛过程;在文献[6]中,作者采用一种精英策略进行信息素更新、转轮赌法进行路径选择,有效满足各种业务的服务质量需求;在文献[7]中,作者提出一种链表随机选择法,减小算法出现局部最优的几率,同时提出一种雅克比迭代收敛准则,有效地减少了迭代时间;在文献[8]中,作者提出一种新型的信息素更新策略,比传统蚁群算法结果更优、收敛速度更快、求解过程更稳定。

有别于以上各篇文献,本文充分考虑了路由组播的特点,即每个目的节点收到的都是相同的数据包,根据组播路径上目的节点的个数来计算路径费用和延时,提出一种新型信息素更新策略。仿真结果表明,本文的改进蚁群算法与传统蚁群算法相比可以收敛到更优的结果。

2 组播路由模型

用一个加权图 $G=(V,E)$ 表示无线 Mesh 网,其中 V 是图中所有路由节点的集合, E 是图中所有无

向边的集合,每条边代表两相邻路由节点之间的直达通信路径,假设两相邻路由节点之间至多只有一条直达通信路径。设源节点 $s \in V$, 目的节点 $\tilde{D}=[d_1, d_2, \dots, d_n]$ 且 $\tilde{D} \subseteq V$, 其中 n 为目的节点个数。假设 $e(s, d_k), k=1, 2, \dots, n$ 为源节点到第 k 个目的节点之间的一条通信路径, T 为组播树, 则有 $\bigcup_{k \in [1, n]} e(s, d_k) = T$, 且 $T \subseteq E$ 。对于任意一条直达通信路径 $\tilde{e} \in E$, 定义时延函数 $d(\tilde{e})$ 和费用函数 $c(\tilde{e})$, 则组播树的总时延和总费用分别为 $D(T) = \sum_{\tilde{e} \in T} d(\tilde{e})$, $C(T) = \sum_{\tilde{e} \in T} c(\tilde{e})$ 。设权衡组播树优劣的目标函数为 $P(T) = a \times C(T) + b \times D(T)$, 其中 a 和 b 为权重因子, 且 $a, b \in [0, 1], a + b = 1$ 。当 $a = 0$ 时表示只考虑时延, $b = 0$ 表示只考虑费用。一般构建组播树的过程还要考虑延时约束 $D(T) \leq D_{up}$ 。综上,可以把构建组播树抽象为一个最优化问题,具体如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & P(T) = a \times C(T) + b \times D(T) \\ \text{s. t.} \quad & T = \bigcup_{k \in [1, n]} e(s, d_k) \\ & C(T) = \sum_{\tilde{e} \in T} c(\tilde{e}) \\ & D(T) = \sum_{\tilde{e} \in T} d(\tilde{e}) \\ & D(T) \leq D_{up} \end{aligned} \quad (1)$$

该组播路由模型具有通用性,除了适用于一般的 ad hoc 网络外,也适用于因特网、ATM 网等网络。

3 蚁群算法

蚁群算法是一种随机搜索的启发式算法。对于蚁群算法的改进,重点在于路径的选择策略和信息素的更新策略。

3.1 路径选择策略

在选择路径的时候,关键在于选择法既要实现正反馈的性能,又要能规避局部最优化。文献[6]的转轮赌法和文献[7]的链表选择法都很好地符合这一要求。无论使用何种方法选择路径,为了实现正反馈,都要计算转移概率。设第 i 轮迭代,从节点 r 到节点 s 之间的转移概率为 $P_i(r, s)$, 则

$$P_i(r, s) = \frac{\tau(r, s)^\alpha c(r, s)^{-\beta} d(r, s)^{-\gamma}}{\sum_{s \in V_0} \tau(r, s)^\alpha c(r, s)^{-\beta} d(r, s)^{-\gamma}} \quad (2)$$

其中, $\tau(r, s)$ 为节点 r 和节点 s 之间的直达路径信息素浓度; $c(r, s)$ 为节点 r 和节点 s 之间的直达路径费用; $d(r, s)$ 为节点 r 和节点 s 之间的直达路径时延; V_0 为节点 r 的其他所有直接可达节点的集合; α 为

表征信息素重要程度的参数; β 为表征费用启发因子重要程度的参数; γ 为表征时延启发因子重要程度的参数,且 α, β, γ 均为正数。

链表选择法是设定一个 P_0 , 只有当 $P_i(r, s) > P_0$, 才将节点 s 作为备选节点, 然后在这些备选节点中按序号抽取第一个作为下一个节点。但是这个算法存在缺陷, 当不存在 $P_i(r, s) > P_0$ 时如何选择路径, 文献[7]的作者并没有给出解答, 可能会使算法提前终止。其实应该给 P_0 设定一个范围, 即 $P_0 \in [0, 1/n]$, n 为集合 V_0 的元素个数, 这样方可保证至少有一个可达节点可以被选择到。但是这样的 P_0 取值又稍为过小, 不能很好地体现正反馈。

转轮赌法则是引入累积和, 假设集合 V_0 的元素个数为 n , 记 $P_{\text{cum}}(k) = \sum_{j=1}^k P_i(r, s_j)$, $k=1, 2, \dots, n$, 然后随机生成一个 $P_{\text{rand}} \in [0, 1]$, 若 $P_{\text{cum}}(k) \geq P_{\text{rand}}$, 则选择第 k 个节点为下一个到达的节点。该算法由于引入了累积和, 所以有 $P_{\text{cum}}(n) = 1$, 即至少有一个满足 $P_{\text{cum}}(k) \geq P_{\text{rand}}$ 的节点存在, 所以不会出现无节点可选的情况。

本文采用的路径选择策略为转轮赌法。

3.2 信息素更新策略

信息素是引导后续蚂蚁搜索更优路径的重要因素。在传统的蚁群算法中, 路径的信息素浓度受经过该路径的蚂蚁数目以及蒸发系数影响, 而每只蚂蚁在单位时间内经过单位长度路径产生的信息素数量是一定的, 蒸发系数也是一个固定值。这固然与自然界的实际蚂蚁觅食过程相契合, 但是应用到数学问题的求解时, 就会存在收敛过慢、易于陷入局部最优等问题。

3.2.1 经典蚁群算法的信息素更新策略

经典蚁群算法根据路径上的费用和延时更新信息素, 信息素浓度与路径费用和延时呈负相关的关系, 具体的信息素更新公式如下:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{\text{cost}(i, j) + \text{delay}(i, j)}, & \text{第 } k \text{ 只蚂蚁在第 } t \text{ 次循环经过了边 } (i, j) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中, Q 为信息素增加强度系数。下一时刻的信息素浓度更新公式如下:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (4)$$

其中, ρ 为蒸发系数, 本文的算法仿真采用固定值 0.5, m 为每一轮出动的蚂蚁个数。

3.2.2 基于路径目的节点数的新型信息素更新策略

与文献[5-6, 8]相同, 本文对蚁群算法的优化也集中在信息素更新策略上, 但是本文的新型信息素更新策略是基于组播路由的特点提出的, 有别于以上 3 篇文献。

传统的用于构建组播树的蚁群算法是根据目的节点数, 逐一寻找源节点到各个目的节点的最优路径。这样当某条路径经过了两个或两个以上目的节点时, 由于费用过大或延时过长而被遗弃, 然而该路径的费用并不大于它所经过的多个目的节点路径总费用或总延时, 这就使得结果收敛到次优解。例如当源节点为 S , 目的节点为 d_1 和 d_2 , 则经典蚁群算法会分别寻找 S 到 d_1 、 d_2 的最优路径 $e_{\text{opt}}(S, d_1)$ 和 $e_{\text{opt}}(S, d_2)$ 。然而, 实际上可能存在从 S 经 d_1 到 d_2 的最优路径 $e_{\text{opt}}(S, d_1, d_2)$, 虽然其代价大于 $e_{\text{opt}}(S, d_2)$, 但是小于 $e_{\text{opt}}(S, d_1)$ 和 $e_{\text{opt}}(S, d_2)$ 之和, 而改进蚁群算法的目的就在于找到 $e_{\text{opt}}(S, d_1, d_2)$ 。

本文对经过多个目的节点的路径费用/延时进行修正, 从而修正该路径的信息素浓度, 使得后续蚂蚁有较大概率选择该路径。

设路径 $e(s, d_k)$ 上有 q_k 个目的节点, 则修正后的该路径的费用和延时分别为

$$c(s, d_k)^\dagger = c(s, d_k) / q_k^\lambda \quad (5)$$

$$d(s, d_k)^\dagger = d(s, d_k) / q_k^\lambda \quad (6)$$

其中, λ 是一个调节因子, 根据目的节点的聚集程度取值, 默认为 1。改进蚁群算法的信息素更新公式如下:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t)^\dagger = \begin{cases} \frac{Q}{c(i, j)^\dagger + d(i, j)^\dagger}, & \text{第 } k \text{ 只蚂蚁在第 } t \text{ 次循环经过了边 } (i, j) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

下一时刻的信息素浓度更新公式如下:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t)^\dagger \quad (8)$$

此外, 本改进算法优先保留经过多个目的节点的数据传播路径, 详见 3.3 节的步骤 8。

3.3 改进蚁群算法用于构建路由组播树的具体实现

完整的改进蚁群算法构建组播树的具体步骤如下:

(1) 参数初始化。通过路由表获得有 N 个路由

节点的拓扑图,根据拓扑图建立一个 $N \times N$ 的费用邻接矩阵 C 和一个 $N \times N$ 的延时邻接矩阵 D 。设仿真轮数为 K ,每轮出动的蚂蚁个数为 M ,源节点为 S ,目的节点 $Des=[d_1, d_2, \dots, d_n]$;

(2) 建立禁忌表 $TABU = ones(1, N)$, $TABU(S) = 0$ 用来记录已经经过的节点,在禁忌表中对应位置置为 0,避免寻路过程形成回路;

(3) 在第 $k(k=1, 2, \dots, K)$ 个轮次,第 $m(m=1, 2, \dots, M)$ 只蚂蚁寻找源节点 S 到目的节点 $d_j(j=1, 2, \dots, n)$ 的路径,蚂蚁使用转轮赌法寻找下一个可达节点,每到达一个节点就将其在禁忌表中置 0;

(4) 当蚂蚁到达目的节点 d_j ,使用上述新型信息素更新策略对该路径上的信息素进行更新,若蚂蚁未到达目的节点且到下一节点的路径费用/延时为无穷大,则舍弃该蚂蚁;

(5) 判断是否 $k \geq K$,否则 $k++$,返回步骤 3;

(6) 置 $k=1$,判断是否 $m \geq M$,否则 $m++$,返回步骤 3;

(7) 置 $m=1$,判断是否 $j \geq n$,否则 $j++$,返回步骤 3;

(8) 计算组播树总费用和总时延。计算时优先保留经过多个目的节点的路径,按照路径经过目的节点的数量由多到少进行排列 $[e(S, d'_1), e(S, d'_2), \dots, e(S, d'_n)]$,如果路径 $e(S, d'_i)$ 经过了目的节点 $d'_j(i < j)$,则将 $e(S, d'_j)$ 从路径列表删除。最后根据路径列表计算总费用和总时延。算法结束。

4 仿真结果分析

本节参考了文献[7]和[9]的仿真场景,为了便于分析,我们假设所有路由节点之间都可以进行通信,不会出现拥塞或者中断。下面在 MATLAB 环境下,通过两个例子说明本文提出的改进蚁群算法相对经典蚁群算法的优势。两个例子共用的仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	值
K	50
M	50
α	2
β	1
γ	1
ρ	0.5
Q	10

(1) 例 1:采用文献[7]的拓扑图(见图 1),只考虑路径费用,选择节点 1 为源节点,节点 7、8 作为目的节点,取 $D_{up}=20$,仿真结果如图 2 所示。

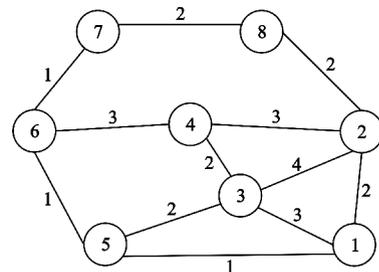


图 1 文献[7]网络拓扑图

Fig. 1 The topological graph of Reference [7]

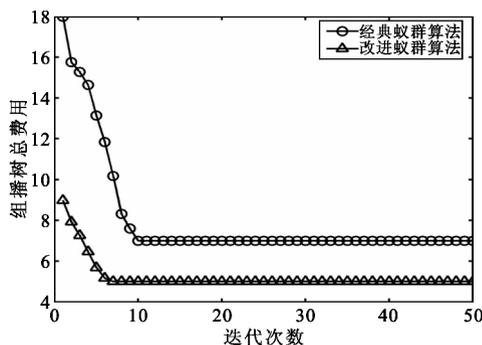


图 2 拓扑图 1 改进蚁群算法和经典蚁群算法节点 1 到节点 7、8 的费用收敛曲线图

Fig. 2 Cost convergence curves of Node 1 to Node 7 and Node 8 in Fig. 1 employing improved ANA and traditional ANA

由于只考虑路径费用,所以图 1 省略了文献[7]拓扑图中的时延数值,实际上费用和延时也可以通过费用重要性权值统一为一个费用值。从图 2 可以看到,如果使用经典蚁群算法,最终路径费用收敛到 7。那是因为经典蚁群算法会分别寻找 $1 \rightarrow 7$ 和 $1 \rightarrow 8$ 的最小费用路径,最终构建的路由组播树为 $1 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7$ 和 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 8$,而改进路由算法的最终路径费用收敛到 5,费用减少了 28.57%。因为该改进算法充分考虑了路由组播的特点,节点 7 也可以作为源节点往节点 8 转发数据,最终的路由组播树为 $1 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8$ 。

(2) 例 2:采用文献[9]的拓扑图(见图 3),图中路径上数字 c 表示两节点间的费用, d 表示两节点间的延时。考虑路径费用和延时,选择路径时使用代价 $\bar{p}=0.6 \times c+0.4 \times d$ 。选择节点 1 为源节点,分别以节点 7、8 和 18 作为目的节点和节点 9、13 为目的节点,取 $D_{up}=100$,仿真结果如图 4 和图 5 所示。

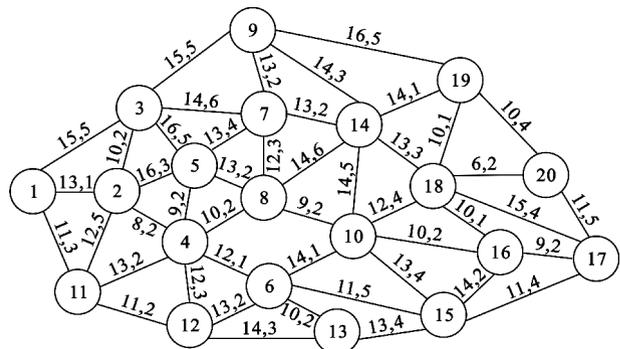


图3 文献[9]网络拓扑简化图

Fig. 3 The topological graph of Reference [9]

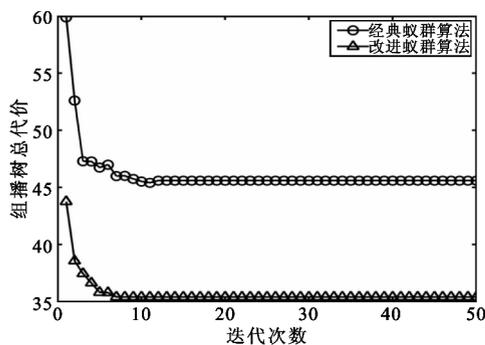


图4 拓扑图3改进蚁群算法和经典蚁群算法节点1到节点7、8、18的代价收敛曲线图

Fig. 4 Price convergence curves of Node 1 to Node 7, Node 8 and Node 18 in Fig. 3 employing improved ANA and traditional ANA

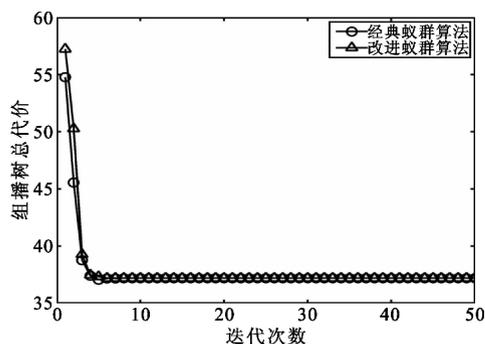


图5 拓扑图3改进蚁群算法和经典蚁群算法节点1到节点9、13的代价收敛曲线图

Fig. 5 Price convergence curves of Node 1 to Node 9 and Node 13 in Fig. 3 employing improved ANA and traditional ANA

从图4可以看到,当选择节点1为源节点,节点7、8、18为目的节点时,改进蚁群算法相对经典蚁群算法有较大改善。经典蚁群算法的最终数据流向为1→3→7,1→2→4→8→10→18,最终代价收敛到45.6,组播树如图6所示。而改进蚁群算法的最终数据流向为1→2→4→8→7→14→18,最终代价收

敛到35.4,组播树如图7所示。代价减少了22.36%。可以看到,改进蚁群算法选择了一条通过3个目的节点的路线,充分利用了路由转发的特性,从而改善了组播性能。通过使用Dijkstra算法对该拓扑图进行全局遍历得到最优的数据流向为1→2→4→8,8→7,8→10→18,最优代价为34。可见改进蚁群算法并不始终收敛到全局最优解,但比经典蚁群算法更接近最优解。

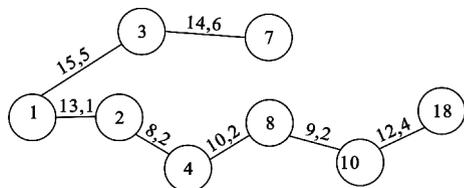


图6 拓扑图3使用经典蚁群算法节点1到节点7、8、18的组播树

Fig. 6 The multicast tree of Node 1 to Node 7, Node 8 and Node 18 in Fig. 3 employing traditional ANA

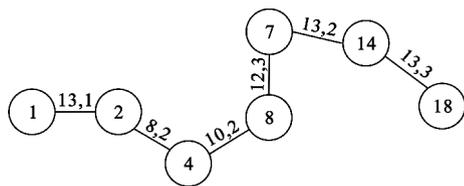


图7 拓扑图3使用改进蚁群算法节点1到节点7、8、18的组播树

Fig. 7 The multicast tree of Node 1 to Node 7 and Node 18 in Fig. 3 employing improved ANA

从图5可以看出,当选择节点1为源节点、节点9、13为目的节点时,改进蚁群算法与经典蚁群算法相比几乎没有差别,两种算法的数据流向均为1→3→9,1→11→12→13,代价为37.2。通过比较图2、图4、图5可以看到,对于规模较小的网络或者规模较大且目的节点较为聚集的网络,改进蚁群算法相比经典蚁群算法有较大优势,而当网络规模较大、目的节点又比较分散时,改进蚁群算法的性能和经典蚁群算法基本保持一致,所以应该根据目的节点的聚集情况选择何种算法。不过改进蚁群算法对于任意的目的节点聚集情况都不差于经典蚁群算法,且不会使算法复杂度明显增大,所以可以替代经典蚁群算法,用于构建路由组播树。此外,可以发现两个例子的迭代次数设置都稍为过多,当迭代次数为10时算法基本就收敛到最优解了,无需计算到50次。

5 结束语

本文针对构建路由组播树的过程,提出了一种

基于路径目的节点个数的新型信息素更新策略,对蚁群算法进行改进,使得其在构建组播树的过程中可以收敛到更优的结果。该算法充分考虑了组播路由的特点,与参考文献的算法相比可能对于其他组合优化问题的普遍适用性有所欠缺,但是可以与参考文献的大部分算法相结合来改善路由组播系统性能。由于篇幅所限,本文仅与经典蚁群算法进行了对比。仿真结果表明,该改进蚁群算法在小规模网络和目的节点较为集中的大规模网络相比经典蚁群算法对组播树性能有较大改善。本文还存在迭代次数设置过多的问题,接下来的研究工作将包括如何根据网络规模和目的节点数设置合理的迭代次数,以及如何根据目的节点聚集程度设置合理的 λ 值。

参考文献:

- [1] 傲丹,方旭明,马忠建. 无线网络网关键技术及其应用[J]. 电讯技术,2005,45(2):16-22.
DAN Ao,FANG Xu-ming,MA Zhong-jian. Key technology and applications of wireless Mesh networks[J]. Telecommunication Engineering, 2005, 45(2): 16-22. (in Chinese)
- [2] Qadir J,Chou C T,Misra A. Exploiting rate diversity for multicasting in multi-radio wireless Mesh networks[C]// Proceedings of 2006 IEEE Conference on Local Computer Networks,Proceedings. Tampa,FL:IEEE,2006:287-294.
- [3] Dorigo M,Maniezzo V,Colomi A. Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on SMC, 1996,26(1): 29-41.
- [4] Wang Hua, Xu Hong, Yi Shanwen, et al. A tree-growth based ant colony algorithm for QoS multicast routing problem[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(9): 11787-11795.
- [5] Yang Jingan, Zhuang Yanbin. An improved ant colony optimization algorithm for solving a complex combinatorial optimization problem[J]. Applied Soft Computing, 2010,10(2): 653-660.
- [6] 柴井坤,魏圆圆,曲立国. 基于改进蚁群算法的组播路由算法研究[J]. 电视技术,2009(4):57-59.
CHAI Jing-kun, WEI Yuan-yuan, QU Li-guo. Research on QoS multicast routing based on improved and colony algorithm[J]. Video Engineering, 2009(4):57-59. (in Chinese)
- [7] 俞慧,吴巍,黄潇,等. 基于改进的蚁群算法的组播路由问题的研究[J]. 计算机技术与发展,2012,22(1): 107-110.

YU Hui, WU Wei, HUANG Xiao, et al. Research of problem of multicast routing based on optimized ant colony algorithm [J]. Computer Technology and Development, 2012,22(1):107-110. (in Chinese)

- [8] 岑宇森,熊芳敏,曾碧卿. 基于新型信息素更新策略的蚁群算法[J]. 计算机应用研究,2010,27(6):2080-2083.
CEN Yu-sen, XIONG Fang-min, ZENG Bi-qing. Ant colony algorithm based on new pheromone updated strategy[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(6):2080-2083. (in Chinese)
- [9] 谢铎,周井泉. 基于蚁群算法的 QoS 最佳路由选择问题的研究[J]. 计算机工程与应用,2007,43(3):112-118.
XIE Duo,ZHOU Jing-quan. QoS best routing problem based on ant colony algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2007,43(3):112-118. (in Chinese)

作者简介:



朱先飞(1976—),男,湖南永州人,2007年于华南理工大学获工程硕士学位,现为助理工程师,主要研究方向为软件研发、宽带差异化与媒体通信网络;

ZHU Xian-fei was born in Yongzhou, Hunan Province, in 1976. He received the M. S. degree from South China University of Technology in 2007. He is now an assistant engineer. His research concerns software development, broadband differentiation and media communication network.

Email:zhuxf@gsta.com

张钺(1989—),男,广东潮州人,硕士研究生,主要研究方向为协作通信系统;

ZHANG Yue was born in Chaozhou, Guangdong Province, in 1989. He is now a graduate student. His research direction is cooperative communication systems.

邓远意(1990—),女,广东河源人,硕士研究生,主要研究方向为协作通信系统;

DENG Yuan-yi was born in Heyuan, Guangdong Province, in 1990. He is now a graduate student. Her research direction is cooperative communication systems.

柯峰(1975—),男,江苏无锡人,副教授、硕士生导师,主要研究方向为宽带移动通信、数字集成电路等。

KE Feng was born in Wuxi, Jiangsu Province, in 1975. He is now an associate professor and also the instructor of graduate students. His research concerns broadband mobile communication, digital integrated circuit.