

基于能量平衡与拥塞控制的蚁群优化路由协议

濮阳莉¹, 周建明²

(1 中国矿业大学 计算机与技术学院, 江苏 徐州 221008;

2 北京理工大学 计算机学院, 北京 100081)

摘 要: 为降低移动自组网中数据包传输的能量消耗和拥塞现象, 提出一种兼顾能量平衡与拥塞控制的蚁群优化路由协议。该路由协议以 AODV 路由协议为基础, 包括路由发现和路由维护两个阶段。在路由发现阶段, 采用蚁群优化算法选择具有最大剩余能量、最小路径花费和最小时延变化的最优节点构建路由。在路由维护阶段, 监控节点的能量阈值级别和路径能量花费, 限制能量不满足条件的节点或者路径传输数据, 降低能量消耗, 提高网络寿命; 使用 GPRS 技术快速检测链路断开现象, 维护路由稳定。仿真结果表明, 该路由协议传输数据所需平均跳数少、报文送达率高、端到端延时少。

关键词: 路由协议; 蚁群优化; 能量平衡; 拥塞控制; 移动自组网

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)07-0109-05

Ant Colony Optimization Routing Protocol Considering Energy Balance and Congestion Control

PU Yang-li¹, Zhou Jian-ming²

(1 School of computer and technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2 School of computer science and technology, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China)

Abstract: For reducing the energy consumption and congestion of packet transmission in mobile ad hoc networks, it proposes an ant colony optimization routing protocol which takes into account energy balance and congestion control. The routing protocol is based on the AODV routing protocol, including two phases: route discovery and route maintenance. In the route discovery phase, the ant colony optimization algorithm is used to select the optimal nodes with maximum residual energy, minimum path cost and minimum delay variation for route construction. In the route maintenance phase, it monitors node's energy threshold level and path energy cost, to limit package transmission on the nodes or paths whose energy does not meet the conditions, for reducing energy consumption and improving life of network; and uses GPRS technology to quickly detect the link disconnection, for maintaining stability of route. The simulation results show that, this routing protocol requires less average hop count, high packet delivery rate and less end-to-end delay.

Key words: routing protocol; ant colony optimization; energy balance; congestion control; mobile ad hoc networks

1 引言

移动自组网 (Mobile ad hoc networks, MANETs) 是一种不需要基础通信设施配合的网络, 该网络由移动节点自由配置建网和通信, 组织非

常灵活, 在通信设施资源匮乏的场合应用广泛。目前已涌现出许多面向移动自组网的路由协议, 如 AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) 协议和 DSR (Dynamic Source Routing) 协议。这两种协议都是按需路由协议, 但这两类路由协议在能量平

衡、负载均衡、拥塞控制、数据安全等方面还不够完善. 现有的许多路由协议以这两类路由协议为基础, 根据关注重点的不同来设计更为有效的路由协议^[1-4]. 如 M-AODV 路由协议^[5]和 EN-AODV 路由协议^[6]关注节点的能量消耗, 在设计路由时重点考虑了如何节约节点的能量问题. ACO-R 路由协议在设计路由时引入蚁群优化思想, 重点关注节点的传输路径最短这一问题^[7]. TARF 路由协议在改进路由协议能量平衡问题的基础上, 还引入了节点信任度的评级, 用于保护数据的安全性^[8]. 本文设计了一种新的蚁群优化路由协议, 设计思想是为了降低移动自组网中数据包传输的能量消耗和拥塞现象, 在解决能量平衡问题的同时兼顾拥塞控制问题, 目标是降低移动自组网中数据包传输的能量消耗和拥塞, 延长整个网络的生存时间, 提高数据传输效率, 维护路由稳定.

2 蚁群优化路由

蚁群算法的流程如图 1 所示.

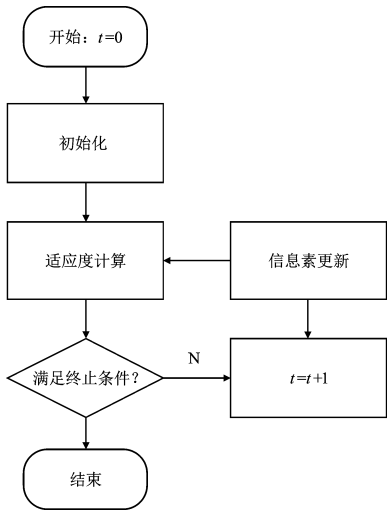


图 1 蚁群算法实现流程

由图 1 可见, 蚁群算法主要包括三个环节:

- (1) 初始化;
- (2) 适应度计算;
- (3) 信息素更新.

蚁群优化路由技术利用蚁群算法来解决网络通信所关注的路由问题. 譬如, 采用蚁群算法选择网络中最短的通信路径. 根据应用需求的不同, 可以通过蚁群算法来设计不同的路由.

3 兼顾能量平衡与拥塞控制的蚁群优化路由

本文首先对移动自组网进行建模. 移动自组网通常可以用一个有向图模型来表示, 记为 $G(V, E)$. 其中, 顶点 V 表示网络中的节点集合, 边缘 E 表示网络中的节点之间的链路. 模型 G 中的顶点 v 的度用连接到该顶点的边缘数量来表示. 在本文中, 将第 i 个顶点 (记为节点 v_i) 的可用能量称为该节点的能量或剩余能量, 用该值作为该节点的权重. 该能级分为饱和能级和阈值能级两种. 当节点的可用能量为零时, 其能级称为饱和能级. 连接到饱和能级节点的边缘将在图模型中剔除, 以避免通过该节点的数据传输. 维持图中节点存在的最小可用能量称为阈值能级. 阈值能级可以用第 i 个节点的可用能量 $E_r(v_i)$ 和度 $\text{degree}(v_i)$ 计算, 表示为:

$$E_T(v_i) = \frac{E_r(v_i)}{\text{degree}(v_i)} \tag{1}$$

从一个节点向另一个节点沿着某条路径发送一个数据包所需的能量称为该路径的能量花费. 在本文中, 路径能量花费依据有向图 G 中节点 v_0 和 v_k 之间可用路径的欧氏距离来计算. 令 $P(v_0, v_k)$ 表示从节点 v_0 到 v_k 的路径, 具体为 $P(v_0, v_k) = \{v_0, v_1, \dots, v_k\}$. 路径 $P(v_0, v_k)$ 的路径能量花费可以表示为:

$$e(P(v_0, v_k)) = \sum_{i=0}^{k-1} c(v_i, v_{i+1}) \tag{2}$$

式中, $c(v_i, v_{i+1})$ 表示将数据包从节点 v_i 传输到节点 v_{i+1} 所需要的能量花费, 可以统计得到.

数据包在传输过程中, 能量花费包括传输花费和接收花费两种. 传输花费是沿着源节点和目的节点之间的路径 $P(v_0, v_k)$ 传输的总能量花费. 除了公式 (2) 所示的路径能量花费之外, 还有节点自身的能量衰减花费. 节点的能量衰减一般不是线性的, 当数据包沿路径 $P(v_0, v_k)$ 传输时, 节点能量过程是一个非线性过程. 但在一个非常小的时间段内可以看作是线性的. 因此, 通常将时间 t 等分成 n 个时间段, 采用当前时间段 (记为 Δt_c) 内的平均能量消耗作为节点衰减的能量, 可以表示为:

$$\bar{E}_{\Delta t_c}(v_i) = \frac{\bar{E}_{\Delta t_{c-1}}(v_i) + E_{\Delta t_c}(v_i)}{2}, i = 0, 1, \dots, k \tag{3}$$

式中, $E_{\Delta t_c}(v_i)$ 表示节点 v_i 在 Δt_c 时间段内总的能量

消耗.

因此,路径能量花费函数定义为:

$$E(P(v_0, v_k)) = \sum_{i=0}^k \bar{E}_{\Delta t_c}(v_i) + e(P(v_0, v_k)) \quad (4)$$

接收花费也称为路径开销,在路径 $P(v_0, v_k)$ 上有 $k+1$ 个节点. 记相邻两个节点 v_{j-1} 和 v_j 之间的欧氏距离为 $d_{j-1,j}$, 那么数据包沿着路径 $P(v_0, v_k)$ 从节点 v_0 和 v_k 所经过的实际距离为:

$$d(v_0, v_k) = \sum_{j=1}^k d_{j-1,j} \quad (5)$$

考虑路径开销,接收花费函数如下:

$$er(P(v_0, v_k)) = \frac{\min_{i=0,1,\dots,k-1} E_r(v_i)}{d(v_0, v_k)} \quad (6)$$

本文提出的路由协议通过节约各个节点的能量消耗,减少网络中的饱和节点,最大限度地提高网络寿命,提高数据传输效率. 该协议主要包括两个阶段:路由发现阶段和路由维护阶段. 路由发现阶段选择具有最大剩余能量、最小路径花费和最小时延变化的最优节点来构建路由. 路由维护阶段通过将节点能量保持在阈值水平以上来节约各个节点的能量,从而最大化网络的寿命;通过采用 GPRS 技术快速检测链路断开现象,维护路由稳定. 详细描述如下.

3.1 路由发现阶段

为了建立从源节点到目的节点的路径,源节点生成前向蚂蚁并将其广播到其所有邻居. 在初始条件下,网络中所有节点所分配的信息素是相同的,记为 $\tau(0)$ (本文中 $\tau(0) = 0$). 前向蚂蚁的目标是在网络中搜索从源节点到目的节点的路径. 在这一过程中,每一个节点在选择其下一跳节点时都会在该节点上留下信息素. 节点被选择的次数越多,留下的信息素越浓,最终源节点都会选择信息素浓度最高的路径作为最优的数据传输路径. 这里用 $\tau_{uw}(t)$ 表示在 t 时刻节点 u 选择节点 v 作为下一跳节点时留下的信息素. 那么在 t 时刻,对于蚁群系统,从一个状态 i 到下一个状态 j 的第 K 个前向蚂蚁的转移概率可以表示为:

$$P_{uw}^k(t) = \frac{\tau_{uw}^\alpha(t) \omega_{uw}^\beta}{\sum_k \tau_{uw}^\alpha(t) \omega_{uw}^\beta} \quad (7)$$

式中, α 用于指示信息素 $\tau_{uw}(t)$ 的相对重要程度; β 用于指示度量 ω_{uw} 的相对重要程度. 在本文中, $\alpha =$

$0.4, \beta = 0.6$. ω_{uw} 表示节点 v 作为节点 u 的下一跳节点的权值,该值越大,说明节点 v 作为节点 u 的下一跳节点的可能性越大. 通常, ω_{uw} 取节点 u 和 v 之间欧氏距离的倒数,目的是选择路径最短的路由. 在本文中,为了降低拥塞现象,本文还引起时延变化性能. 时延变化是指两个节点之间传输的数据流中,不同分组传输时延的变化,该指标反映了网络的拥塞状况. 节点 u 和 v 之间的时延变化可以表示为:

$$\begin{aligned} J_{uw} &= [T_{uw}^r(i+1) + T - T_{uw}^s(i+1)] \\ &\quad - [T_{uw}^r(i) + T - T_{uw}^s(i)] \\ &= T_{uw}^r(i+1) - T_{uw}^s(i+1) \\ &\quad - T_{uw}^r(i) + T_{uw}^s(i) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, T 表示两个节点之间的同步时间; $T_{uw}^r(i)$ 和 $T_{uw}^s(i)$ 分别表示第 i 个分组在两个节点之间传输时的接收时间戳和发送时间戳; $T_{uw}^r(i+1)$ 和 $T_{uw}^s(i+1)$ 分别表示第 $i+1$ 个分组在两个节点之间传输时的接收时间戳和发送时间戳. 可见,两个节点之间的同步时间在两个分组的时延相减过程中抵消,也即时延变化与时间同步无关,可以有效反映网络的拥塞状况.

结合节点之间的欧氏距离和时延变化,本文设计的节点权值为:

$$\omega_{uw} = \frac{1}{d_{uw} J_{uw}} \quad (9)$$

节点 u 和 v 之间的欧氏距离 d_{uw} 越小,说明节点 v 作为节点 u 的下一跳节点传输数据越快;时延变化 J_{uw} 越小,说明节点 v 作为节点 u 的下一跳节点的延迟越小. d_{uw} 和 J_{uw} 越小,节点 v 作为节点 u 的下一跳节点的可能性越大.

当前向蚂蚁到达目的节点时,前向蚂蚁死亡. 这时由目的节点产生新的蚂蚁,称为后向蚂蚁. 后向蚂蚁将以与前向蚂蚁相反的方向穿过相同的路径回溯到源节点,在这一过程中更新每个节点的信息素,更新公式为:

$$\tau_{uw}(t) = (1 - \rho) * \tau_{uw}(t-1) + \rho * \Delta\tau_{uw} \quad (10)$$

式中, $\rho \in [0, 1]$, 表示信息素的扩散度. 在本文中, $\rho = 0.3$; $\Delta\tau_{uw}$ 表示信息素的变化量,与蚂蚁选择的路径有关. 如果蚂蚁选择的路径中包括节点 u 到节点 v 的路径,则对应的 $\Delta\tau_{uw}$ 增加 1, 否则不增加.

本文选择具有最小路径能量花费的最大剩余能量节点来构建源节点到目的节点之间的最佳路径,

表示为:

$$\text{Path} = \max_P(r(P(v_0, v_k))) \quad (11)$$

式中, $r(P(v_0, v_k))$ 称为剩余能量路径, 定义为:

$$r(P(v_0, v_k)) = \min_{i \in [0, k-1]} (E_r(v_i) - c(v_i, v_{i+1})) \quad (12)$$

路径列表存储在信息素表中, 用于进一步的数据传输操作。前向蚂蚁的任务是搜索从源节点到目的节点的路径, 并更新蚂蚁已经穿过的路径的信息素。随着它的遍历, 蚂蚁更新沿其路径访问的每个节点的信息素表, 包括跳数和路径能量花费。前向蚂蚁依据节点的路径能量花费找到最佳路径。前向蚂蚁根据转换概率函数选择下一跳邻居。在遍历期间由蚂蚁访问的节点数组沿最佳路径存储信息素列表。前向蚂蚁使用该列表来避免在未访问的节点中选择下一跳邻居。该数组列表存储在堆栈路由表中。该列表还有助于后向蚂蚁遍历回溯到源节点的路径。当前向蚂蚁通过最佳路径到达目的节点时, 前向蚂蚁死亡, 后向蚂蚁创建, 该蚂蚁存储的节点数组列表向后移动。

3.2 路由维护阶段

在这个阶段, 数据沿着源节点和目的节点之间的路径传输, 沿着路径的节点的剩余能量随时间而变化。为了节省各个节点的能量和降低路径开销, 本文周期性地检查各个节点的剩余能量, 防止节点达到饱和水平。主要思路是:

首先, 源节点发送请求数据包, 请求其最优选择节点的剩余能量。在从所选节点接收到答复时, 源节点沿最优路径检查最优选择节点的剩余能量。如果最优选择节点达到阈值能级, 则源节点限制沿最优路径所选择的最优节点的数据传输, 从而节省其能量, 防止该节点达到饱和水平。

其次, 在从最优选择节点接收剩余能量的情况下, 源节点检查接收到的剩余能量是否等于沿最优路径的路径能量花费。如果等于路径能量花费, 则源节点通过该节点限制该节点沿着最优路径的数据传输。

也即, 在路由维护阶段, 如果节点的剩余能量低于阈值能级, 或者剩余能量与路径能量花费相等, 则通过该节点的数据传输将受到限制, 需要重新选择最优节点进行数据传输。这样, 本文路由协议可以防止节点达到饱和水平, 从而减少网络饱和节点的数量, 在其阈值能级条件下维持节点所需的最小剩余

能量。而且, 本文路由协议通过限制剩余能量与路径能量花费相等的数据传输来降低路径开销, 增加网络寿命, 从而促进网络中节点之间更多的数据传输。通过调用这些措施, 可以使单个节点上的节能最大化, 最终使得在源节点和目的节点断开之前可以沿最优路径发送最大数量的数据包。遵守这一原则, 本文路由协议使用蚂蚁作为代理, 从网络中的一个节点穿越到另一个节点。蚂蚁可以从一个节点迁移到另一个节点来传输数据包。只有当节点 v 是节点 u 的邻居, 并且两个节点处于相互的通信范围内时, 蚂蚁在时间 t 从节点 u 遍历到节点 v 。网络中的每个节点都提供有本地缓冲区存储, 其中节点 u 和节点 v 都可以更新其在网络中移动的本地信息。当更多的蚂蚁穿过节点时, 它们以任意顺序更新信息, 防止节点获得饱和能量水平, 并将节点能量维持在其阈值水平。这增强了网络中节点的生命周期。由于网络中的饱和节点减少, 各个节点的生命周期得到增强。因此, 本文路由协议在更大程度上增加了整个网络的寿命。

同时, 为了减少链路断开造成的数据包丢失, 蚂蚁所选的路径中每个节点必须在一跳节点的通信范围内。大多数路由协议使用“hello”数据包来标识链路断开现象。而本文路由协议使用 GPRS 技术预测链路断开现象, 也即通过检测路径中一跳节点之间的距离来判断是否存在链路断开的可能。前向蚂蚁更新信息素路径以选择下一跳邻居节点, 如果发现一个节点超过通信范围, 那么更新信息素。如果前向蚂蚁或后向蚂蚁丢失所选路径或者找不到其下一跳邻居节点, 则数据包将缓冲在当前节点的堆栈路由表中, 并且通过路由发现重建新的路径, 同时将链路故障通知消息告知该路径上的所有节点。

4 仿真

为了降低移动自组网中数据包传输的能量消耗和拥塞现象, 本文提出了一种兼顾能量平衡与拥塞控制的蚁群优化路由(简记为 ACO-EC)。为了评价本文路由协议的性能, 本节选择目前移动自组网常用的路由协议(M-AODV、EN-AODV、ACO-R)进行仿真, 着重对比本文方法在能量消耗和降低拥塞方面的优势。下面从跳数、报文送达率和端到端延时三个方面进行性能对比分析, 定量评价本文路由协

议的性能. 仿真软件使用 Network Simulator, 仿真参数如下:

- 区域面积:2 000 m×2 000 m
- 节点移动速度:10~30 m/s
- 节点通信范围:250 m
- 节点数量:100 个
- 节点移动方式:Random way point
- 数据包尺寸:512 字节
- 握手数据包广播间隔:1 s
- 仿真时长:1 200 s

仿真实验表明,与移动自组网目前常用的三种路由协议相比较,本文路由协议的数据传输所需平均跳数少、报文送达率高、端到端延时少. 通过分析表明,本文提出的兼顾能量平衡与拥塞控制的蚁群优化路由协议,采用蚁群优化算法选择具有最大剩余能量、最小路径花费和最小时延变化的最优节点构建路由,通过监控节点剩余能量和能量路径花费来维护节点的能量水平,使用 GPRS 技术快速检测链路断开现象,可以有效降低移动自组网中数据包传输的能量消耗和拥塞现象,提高整个网络的寿命和稳定性.

参考文献:

[1] 杨绪彬, 张文强. 移动自组织网络中服务质量路由协议的研究与展望[J]. 计算机应用, 2015(a02):11-13.

[2] Saraswat B K, Bhardwa J M, Pathak A. Optimum Experimental Results of AODV, DSDV & DSR Routing Protocol in Grid Environment[J]. Procedia Com-

puter Science, 2015, 57(8830):1359-1366.

[3] Shahabi S, Ghazvini M, Bakhtiarian M. A modified algorithm to improve security and performance of AODV protocol against black hole attack[J]. Wireless Networks, 2016, 22(5):1-7.

[4] Bhalodiya S, Vaghela K. Enhanced Detection and Recovery from Flooding Attack in MANETs using AODV Routing Protocol[J]. Guang pu xue yu guang pu fen xi Guang pu, 2015, 24(3):342-4.

[5] Qi X, Wang Q, Jian F. Multi-path Routing Improved Protocol in AODV Based on Nodes Energy[J]. International Journal of Future Generation Communication & Networking, 2015, 8(1): 207-214.

[6] Sridhar S, Baskaran R, Chandrasekar P. Energy Supported AODV (EN-AODV) for QoS Routing in Manet [J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013, 73(12):294-301.

[7] Parsapoor M, Bilstrup U. Ant Colony Optimization for Channel Assignment Problem in a Clustered Mobile Ad Hoc Network[C]// International Conference on Swarm Intelligence. 2013:314-322.

[8] Zhan G, Shi W, Deng J. Design and Implementation of TARF: A Trust-Aware Routing Framework for WSNs[J]. IEEE Transactions on Dependable & Secure Computing, 2012, 9(2):184-197.

作者简介:

濮阳莉 女,(1981-),硕士,讲师. 研究方向为计算机应用与计算机网络等. E-mail:ganggongls@163.com.

周建明 (1978-),博士,副教授. 研究方向为计算机网络等.