

Ad Hoc 网络先应式路由维护机制的优化模型研究

杨盘隆 田 畅

(解放军理工大学通信工程学院电信工程系, 江苏南京 210007)

摘 要: Ad Hoc 网络先应式路由算法 (Proactive Routing Algorithm) 具有寻由时延小, 拓扑维护及时的优点, 适合在网络负载较大的环境下高效运行. 本文针对路由维护机制, 以减少协议开销和寻由错误报文为目标, 提出了基于 Ad Hoc 网络的先应式路由维护机制优化模型. 通过对优化模型的相关参数讨论, 得出如下结论: 1. 先应式路由协议的最优更新时间周期具有“逆向稳定性”; 2. 节点数目 n 与更新系数 h 有比例关系 $n \propto h^{3/2}$. 通过模型求解和仿真结果相比较, 验证了模型的正确性. 优化模型的研究为先应式路由算法更新机制和算法的可扩展性支持提供了理论依据.

关键词: 无线通信网络; 移动 Ad Hoc 网络; 先应式路由协议; 路由算法优化模型; 协议性能仿真

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 01-0114-04

Maintenance Modeling and Optimization on Proactive Routing Protocol in Mobile Ad Hoc Network

YANG Pan-long TIAN Chang

(Telecom Department, Institute of Communication Engineering, PLA Science and Technology University, Nanjing, Jiangsu 210007)

Abstract Proactive routing algorithm in Ad Hoc network has the advantages of low routing delay and updated topology maintenance, and it is very suitable to be applied in heavy load network environment. In this paper aiming at reducing routing overhead and dropping packets, an optimal routing maintenance model for proactive routing protocol of ad hoc network is provided. With the analysis of the model we draw conclusion that 1) Optimal update time interval of proactive routing protocol has the character of “reverse stability”; 2) The node number n in the network has the direct ratio of h multiply $\exp(3/2)$. With simulation results and numerical results, the optimal model proves to be effective. The optimal model introduces an important theory analysis which is very useful for routing update mechanism and routing scalability in proactive ad hoc routing protocol.

Key words wireless communication; mobile ad hoc network; proactive routing protocol; optimal routing model; protocol performance simulation

1 引言

移动自组织网络也称 Mobile Ad Hoc Network (MANET), 由于 MANET 具有分布式、自组织特征, 不依赖基站的建立就可以实现无线移动网络互联, 近年来广泛用于战场通信、抢险救灾、野外科考等领域. MANET 组网技术的研究对于军用战术互联网的发展具有积极意义, 目前 IETF 下的 MANET 工作组已经提出了多种路由协议, 许多协议甚至已经应用于实际网络环境. MANET 路由协议按照寻由机制和路由维护策略角度进行区分, 主要有先应式路由算法、反应式路由算法和混合式路由算法三种类型.

先应式路由算法具有寻由时延小, 拓扑维护及时的优

点, 同时适合在网络负载较大的环境下高效运行^[1-3]. 本文结合先应式路由算法的上述特点, 提出了基于先应式路由算法的路由维护机制优化模型, 通过对模型的分析得出了一系列重要结论. 利用知名仿真平台 GlomSim 得到的仿真结果与数值计算结果进行比较, 验证了模型的正确性.

2 先应式路由协议特点

最初, 先应式 Ad Hoc 路由协议由 BELLMAN-FORD 算法改进而来, MANET 工作组提出的具有代表性的先应式路由协议是 DSDV (Destination Sequenced Distance Vector Routing) 和 WRP (Wireless Routing Protocol) 协议^[7]. 传

统的路由协议就是一种先应式路由 (Proactive Routing), 每个节点随时都要维持一个路由表, 通常需要周期性的更新。为了减少路由算法的协议开销, G. Pei 提出了 FSR^[1] (Fish-eye State Routing) 算法, 其基本思想是限制路由更新消息传播范围; 节点距离路由更新消息源节点越近, 路由更新消息越频繁; 反之距离越远, 交换的信息越少, 这样就有效的避免了信息的泛滥。这种算法的拓扑组织结构像鱼的眼睛, 所以称之为 FR。算法缺点是路由信息的计算采用“近视” (myopic) 算法, 即只根据局部路由信息进行路由选择, 不能保证全局最优; 另外算法不适用于规模较大的网络, 如果节点之间的距离过大, 路由信息精度变差, 算法收敛时间也会增大, 从而导致网络中存在许多不稳定的路由。Bellur 提出了基于反向链路转发的广播式路由算法 (TBRPF)^[4]。反向链路转发 (RPF) 的思想最早用于多播技术, 主要内容是网络中的节点并不是简单地向所有相邻节点广播路由信息, 而是判断相邻节点是否在源点与目的节点建立的生成树上。这样, 整个网络的链路更新信息开销会大大减小。

上述先应式路由算法的主要思想都是把减小路由更新信息开销作为首要目的, 利用网络拓扑的特征和链路收敛特性减小网络开销。它们共同的特点是都要定期维护网络拓扑, 更新路由表以备查找路由使用。

网络规模和链路状态变化直接影响先应式路由协议的最佳更新周期, 但相关文献 [1~3, 5] 对最优路由更新周期的讨论不够充分, 没有给出合理的数学模型和仿真结果分析。本文通过建立更新周期优化模型对先应式路由协议的最佳更新周期进行了讨论, 同时利用仿真平台对所得到的结论进行了验证。

3 先应式路由维护机制的数学模型

建立数学模型之前, 根据 AdHoc 网络路由算法特点及 Ben^[2] 在其文献中的分析方法我们有如下假设:

A1: 链路保持时间 t_k 服从负指数分布 $f_k(t) = \frac{1}{u_k} e^{-t/u_k}$,

链路失效时间 t_f 服从负指数分布 $f_f(t) = \frac{1}{u_f} e^{-t/u_f}$, 其中 u_k 和 u_f 分别为链路平均保持时间和链路平均失效时间。

A2 各个站点的数据报文到达是具有相同参数的 Poisson 过程;

A3 基于逐跳选路, 一旦路由表没有及时更新, 会导致寻路由失败, 不考虑路由拯救机制;

A4 路由表在本地计算和更新时间由处理机性能和网络规模决定, 在此忽略不计;

A5 仅考虑路由算法本身的效率, 而不考虑物理层模型与 MAC 层接入协议对系统组网性能的影响;

对于先应式路由维护机制而言, 网络规模的增大、移动性的增强、网络负载的增加, 都会影响路由算法的效率。为此, 我们有如下定义:

D1: 周期性路由更新时间为 T_{pr}

D2: $N_a(t)$ 为数据报文在 $0 \sim t$ 时间段内到达的数目。

D3 前 r 跳链路拓扑关系在保持期间 T_{pr} 的稳定概率为 $Q_r^l(T_{pr}) = 1 - e^{-lT_{pr}/u_k}$, l 为路径的长度。

D4 发生寻路由失效事件是指, 查找路由表不能发现目的节点的路由已经改变或不可达。

D5 在先应式路由协议的周期性路由更新时间 T_{pr} 内, 发生寻路由失效时由于错误路由导致的报文丢失数目为 OV_p

$$(RF(T_{pr})) = \sum_{p_i \in PA} \sum_{r=0}^{l_i} [Q_r^l(T_{pr}) N_a(T_{pr})].$$

l_i 表示路径 p_i 长度, $PA = \{ \text{网络中所有的路径 } p_i \text{ 的集合} \}$ 。

D6 网络链路上的路由算法开销定义为 $M(n) T_{ps}$, 其中 $M(n)$ 是路由表的大小, 单位为字节, n 为网络中节点的数目。

由于基于先应式策略的路由算法中, 逐跳转发算法路由表的大小与网络中节点数目呈正比, 为了简化问题, 我们可以认为路由协议开销为 $kn T_{ps}$, 就全网而言, 路由算法开销的复杂度为 $O(n^2)$ 的, 设信道速率为 B , 我们定义归一化网络路由开销为 $kn^3 / (B * T_{pr})$ 。

考虑先应式路由协议周期性更新策略, 优化目标应该是减小路由协议开销, 同时保证报文寻路由正确率。因此, 报文寻路由错误数和路由协议开销是两个应该同时考虑的最小化目标函数。因此我们有:

$$\min z(\lambda, \mu_k, l, T_{pr}) = \sum_{p_i \in PA} \sum_{r=0}^{l_i} [Q_r^l(T_{pr}) N_a(T_{pr})] + kn^3 / (B * T_{pr}) \quad (1)$$

其中, 参数 k 为常数, 用于调节路由协议开销与寻路由错误率之间的平衡关系, 而 λ, μ_k 作为网络参数决定了网络环境, T_{pr} 作为协议参数决定了路由信息更新周期。

4 数学模型分析

为了求解模型, 我们将目标函数改为

$$\min z(\lambda, \mu_k, T_{pr}) = PN_{avg} \times \sum_{r=0}^{l_{avg}} [Q_r^{l_{avg}}(T_{pr}) \times X_{pr}^r] + kn^3 / (B * T_{pr}) \quad (2)$$

其中, 为了简化模型, 我们用 PN_{avg} 表示网络平均的路径数目以代替对集合中所有路径的求和计算, l_{avg} 表示网络路径的平均长度。

对 $z(\lambda, \mu_k, T_{pr})$ 中的三个参数分别求偏导可以得到更新周期、报文到达速率和拓扑更新时间与目标函数之间的关系。

$$\frac{\partial z}{\partial T_{pr}} = C \times \sum_{r=0}^{l_{avg}} (1 - e^{-(r \times T_{pr})/\mu_k}) + C \times \sum_{r=0}^{l_{avg}} \left[\frac{r \times T_{pr}}{\mu_k^2} \times e^{-(r \times T_{pr})/\mu_k} \right] - kn^3 / (B * T_{pr}^2)$$

其中 $\frac{\partial z}{\partial \lambda} = PN_{avg} \times \sum_{r=0}^{l_{avg}} [T_{pr} \times (1 - e^{-(r \times T_{pr})/\mu_k})]$, 且 $C = PN_{avg} \times \lambda \frac{\partial z}{\partial \mu_k} = C' \times \sum_{r=0}^{l_{avg}} \left[-\frac{r \times T_{pr}}{\mu_k^2} \times e^{-(r \times T_{pr})/\mu_k} \right]$, 其中 $C' = C \times$

T_{pr}

由求导结果可知, $\frac{\partial z}{\partial \lambda}$ 和 $\frac{\partial z}{\partial \mu_k}$ 只有当 $T_{pr} = 0$ 或者 $\mu_k \rightarrow \infty$

才会等于 0 这就说明对于先应式路由协议所维护的网络, 不存在最佳的数据报文到达速率和链路平均保持时间, 这是由先应式路由协议的特点决定的. 由偏导函数可知, 数据报文到达速率对目标函数的影响可以近似为线性的, 这一点可以理解为单位时间内数据报文越多, 在一定的更新周期内和一定的链路平均保持时间前提下, 寻由失效的报文也会增多. 而链路平均保持时间对目标函数的影响则是非线性的, 随着链路平均保持时间的增加, 其偏导值就越趋近于 0 说明随着链路的稳定性增强, 更新时间的间隔可以相应地增大. 令 $\frac{\partial z}{\partial T_{pr}} = 0$ 则有

$$C \times \sum_{r=0}^{l_{avg}} (1 - e^{-(r \times T_{pr}) / \mu_k}) + C \times \sum_{r=0}^{l_{avg}} \left[\frac{r \times T_{pr}}{\mu_k} \times e^{-(r \times T_{pr}) / \mu_k} \right] = kn^3 / (B \times T_{pr}^2) \quad (3)$$

一般的先应式路由协议, 其路由更新更新周期都大于或等于链路的平均保持时间^[3], 为了简化计算我们姑且假设 $T_{pr} / \mu_k = h$, 定义 h 为“更新系数”. 由此得到

$$C \times \sum_{r=0}^{l_{avg}} (1 + (h \times r - 1) e^{-h \times r}) = kn^3 / (B \times (h^2 \times \mu_k^2)) \quad (4)$$

我们把 $(h \times r - 1) e^{-h \times r}$ 记为贡献因子, 通过计算, 我们得到贡献因子与路径跳数之间的关系图, 如图 1 所示.

我们发现, 当跳数的贡献因子存在一

个“门限值”, 在 $h=1$ 且 $r=7$ 条件下, 或者是 $h=2$ 且 $r=4$ 条件下, 其贡献因子在 0.01 左右, 这说明随着跳数增大, 贡献因子可以在一定程度上忽略不计, 对于跳数较多的网络, 可以将 l_{avg} 设置在“门限值”, 以简化计算复杂度. 同时, 对于先应式路由协议, “门限值”的存在还表明, 作为路由维护模块策略不必完全地维护全网路由信息, 只要跳数在“门限值”以内, 就可以维护全网路由, 原因是随着跳数增大, 越接近目的节点, 路由信息越精确; 相反的, 距离源节点越近, 对目的节点侧路由变化越不敏感, 这可以从 $Q_i(T_{pr})$ 的变化反映出来. FSR 路由算法就是采用这样的思想来维护路由信息的.

利用文献[4~6]中的结论, 我们可以得到, PN_{avg} 与节点的数目呈正比例, 所以我们可以将等式(4)修正为

$$\sum_{r=0}^{l_{avg}} (1 + (h \times r - 1) e^{-h \times r}) = k' n^2 / (h^2 \times \mu_k^2) \quad (5)$$

由等式(5)可以得到如下结论:

结论(1): 先应式路由协议的最优更新时间周期具有“逆向稳定性”. 所谓“逆向稳定性”, 是指随着链路平均保持时间的减少, 参数 h 要变大, 也就是说 T_{pr} 不会随 μ_k 线性的减小, 但是由等式(5)可知, T_{pr} 会变小, 但是变化幅度不会过大; 相反, 随着链路平均保持时间的增大, 参数要 h 变小, T_{pr} 最终还是会变大, 总体上更新周期不会变化过大, 这就是所谓“逆向稳定性”.

结论(2): 随着网络规模的增大, 即 n 增大, 与更新系统有比例关系 $n^{-1} h^{3/2}$. FSR 路由协议设计思想与之相符, 即距离源节点越远的更新周期越长, 越近的周期越短, 但是更新周期的变化与节点之间的距离变化不是线性的.

结论(3): 如果是窄带网络, 等式(5)中的参数 k' 会变大, 因此得到的更新周期也随之变大; 反之, 在宽带网络上, 由于带宽资源丰富, 更新周期可以相应变小, 这一点与直观意义相符.

由于方程中的参数 C, k, n, μ_k 的值与具体的网络环境相关, 模型的求解依赖具体的实验环境来确定, 我们将在第 5 部分对模型的求解和验证进行论述.

5 模型求解与验证

为求解模型, 我们需要配置网络环境, 并由此计算出相应的参数, 如 C, k, n, μ_k ; 同时, 为了验证模型的正确性, 我们用仿真平台 GNS3 进行了协议性能仿真, 并与理论值进行对比. 在先应式路由协议中, 选取 FSR (Fisheye State Routing) 路由算法作为仿真的对象, 参数的计算也参照 FSR 协议的路由表结构^[1]; 移动模型选取了目前较流行的 RANDOM WAYPOINT 移动模型, 节点运动速度从 0km/h 到 72km/h 在 MAC 层, 我们采用 IEEE 802.11b 协议, 网络带宽为 2Mbps 节点的分布范围是 750 米 × 750 米, 通信半径为 250 米, 节点数目为 50 个, 采用随机分布的模式. 数据发送平均间隔周期为 1 秒, 报文长度为 512byte 我们得到

最佳更新周期(单位为秒)与节点运动速度之间的关系曲线, 如图 2 所示. 由图 2 可以看出, 仿真结果与数值计算结果基本吻合, 产生误差的原因主要是没有考虑 MAC 协议对路由算法的影响, 下一步的工作主要是在建立模型阶段充分考虑 MAC 协议对路由算法的影响, 并根据仿真结果或实验结果统计并评估, 修正原有模型, 减小计算误差.

对于 FSR 算法, 存在域内更新周期和域间更新周期, 目前的仿真工作中, 对于群内和群间更新周期的比例没有

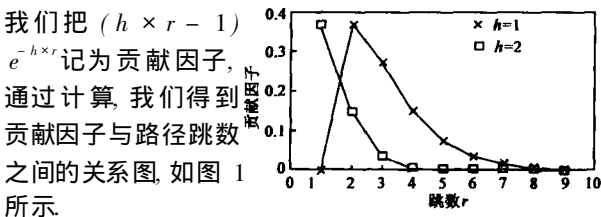


图 1 贡献因子与跳数的关系

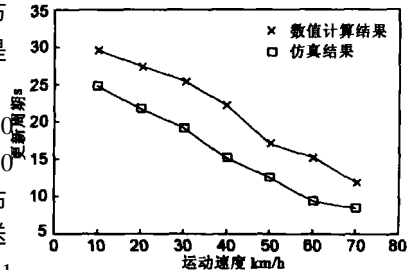


图 2 最佳更新周期与运动速度关系

明确的计算原则, 通常是按照“域内”和“域间”跳数的比例确定更新周期. 为此, 我们增加了如表 1 所示的网络配置方式.

表 1 网络配置方式

节点数目	地域范围
50	750m × 750m
100	750√2m × 750√2m
200	1500m × 1500m
400	3000m × 3000m

设域内的门限值 $R_{h,m} = 3$ 运动速度为 40km/h 其它仿真参数与前
面相同. 通过
仿真, 我们得
到在不同网络
配置方式下的
域间与域内更
新周期的比例
与等式 (5)
中的结果进行

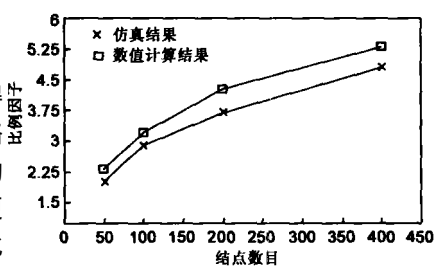


图 3 比例因子与运动速度关

比较如图所示. 由图 3 中的结果可知, 路径长度 l 与节点数目 n 的关系是 $l \sim O(n^{1/2})$.

6 结束语

先应式路由算法具有寻由时间快, 寻由效率高的特点, 适合在网络负载较大的条件下工作, 其缺点是当网络拓扑关系变化迅速的环境下, 适应性有限, 容易发生寻由失败. 同时算法的开销较大. 本文针对先应式路由算法的特点, 建立了路由周期更新间隔时间的优化模型, 在对模型求解分析的基础上, 得出如下结论: 1 先应式路由协议的最优更新时间周期具有“逆向稳定性”; 2 节点数目 n 与更新系数 h 有比例关系 $n \rightarrow h^{3/2}$. 通过模型求解和仿真结果相比较, 验证了模型的正确性.

下一步的工作是考虑 MAC 层协议的影响, 完善路由维护机制的优化模型, 并在此基础之上对网络负载、移动、拓扑、网络带宽和 MAC 协议因素等对最优解的影响进行讨论.

参考文献:

[1] Pej M Gerla T W Chen Fisheye state routing a routing scheme for ad hoc wireless networks[A]. Proceedings of EC 2000[C]. New Orleans LA, 2000 70- 74

[2] Ben Liang Zygmunt J H ass Optimizing router cache lifetime in ad hoc networks[EB/OL]. http://www.ieee-infocm.org/2003/papers/07_04.PDF 2003. 4

[3] P Jacquet P Muhlethaler et al Optimized link state routing protocol internet draft[OL]. <http://hipercom.inria.fr/olsr/rfc3626.txt> 2000. 6

[4] Prince Samar Marc R Pearlman Zygmunt J H aas Hybrid routing the pursuit of an adaptable and scalable routing framework for ad hoc networks[OL]. http://people.ece.cornell.edu/haas/wnl/Publications/crc02_2.ps 2002. 12

[5] B Bellur R G Ogier A reliable efficient topology broadcast protocol for dynamic networks[A]. IEEE INFOCOM'99[C]. New York, March 1999. 178- 186

[6] Marco Conti Gaia Maselli Giovanni Turri Silvia Giordano Cross-layering in mobile ad hoc network design[J]. IEEE Computer, February 2004, 37: 48- 51.

[7] E Royer C-K Toh A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks[J]. IEEE Personal Communications April 1999, 6(2): 46- 55

[8] Bajaj L, Takai M, Ahuja R, Tang K. G lomoSim: a scalable network simulation environment Technical Report CSD Technical Report[EB/OL]. <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim>. 2000. 03

作者简介:



杨盘隆 男, 1977 年出生于辽宁盘锦, 解放军理工大学通信工程学院讲师, 博士, 研究方向为无线自组织网络, 无线传感器网络, 战术 AdHoc 网络和战术数据链关键技术.
E-mail: veron_yang@hotmail.com.

田 畅 男, 1963 年出生于山东青岛, 解放军理工大学通信工程学院副教授, 研究方向为高速交换网络, 网络安全, 无线自组织网络, 战术 AdHoc 网络和战术数据链关键技术.