

移动 Ad Hoc 网的一种新的自组织组网和路由算法

毛玉明, 杨 宁, 段景山

(电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术重点实验室, 四川成都 610054)

摘 要: 本文针对移动 Ad Hoc 网络提出了一种新的自组织组网与路由算法——核心树组网路由算法 KTRA. 该算法将 Ad Hoc 网络重构成一种逻辑的树形拓扑结构, 使得节点只需掌握部分路由信息就可以完成组网和路由, 当拓扑发生变化时, 路由更新也被限制在分支范围. 算法兼具先应式延时短和反应式灵活的特点. 本文描述了 KTRA 算法的设计思想和主要内容, 以及该算法在实验系统中的应用情况.

关键词: Ad Hoc 网络; 移动; 树形拓扑结构; 路由算法; 核心树组网路由算法

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 12A-161-04

A New Algorithm for Self-Organized Mobile Ad Hoc Network

MAO Yu-ming, YANG Ning, DUAN Jing-shan

(Key Laboratory of Broadband Fiber Transmission & Communication Networks, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: KTRA (Kernel Tree Routing Algorithm) is a new self-organization algorithm for mobile Ad Hoc networks. It reorganizes the net as a logical tree topology, thus the nodes need only to maintain a part of routing information for networking and routing, and the update requirement is restricted in the area of branch. KTRA has low delay as the preactive tech and high flexibility as the reactive tech. The idea and technology of KTRA and the results of the KTRA applied to an experimental Ad Hoc network are described.

Key words: Ad Hoc network; mobile; tree topology; routing algorithm; KTRA (kernel tree routing algorithm)

1 引言

移动 Ad Hoc 网络是由一组可移动的无线节点组成的多跳无线网络. 这种多跳无线网络没有基站一类的基础通信设施, 依靠节点之间在无线信道上的相互感知与协调, 构成网络通信环境. 移动节点既是主机也是路由器. 在多跳和移动通信环境下, 节点间的通信关系随时都可能发生变化, 需要采用一定的自组织算法, 及时掌握动态变化中的网络拓扑结构, 为网络中的通信寻找路由.

人们对 Ad Hoc 网络的研究已经有较长的历史, 提出了许多自组织和动态路由算法, 较为典型的算法有 AODV、WRP 等^[1-6]. Ad Hoc 的自组织路由算法主要分为两类: 先应式路由和反应式路由.

先应式路由是在具备了网络拓扑结构的先验知识的前提下, 建立并维护整个网络的路由表, 因此也称为“表驱动路由”(table driven routing). 先应式路由在转发报文时直接利用路由表, 不需要再计算路由, 因此具有转发快捷、延时小的优点, 但针对整个网络的路由表的更新难以及时跟上网络拓扑结构的动态变化, 只能适应于拓扑结构变化较缓慢的场合.

反应式路由则相反, 节点是在需要通信时才开始建立从源节点经若干中继节点到目的节点的一条或多条路由, 此后

的通信沿寻找到的路由进行. 如果通信中拓扑结构发生了变化, 则又立刻重新开始新一轮的路由寻找过程, 因此也称为“按需路由”(on demand routing). 反应式路由是在需要通信时直接在当前的网络拓扑结构中寻找路由, 因此能及时跟上拓扑结构的动态变化. 但该方式在发起路由寻找过程中会引入较大的转发延迟或较大的网络开销, 特别是同时存在多个通信时, 容易发生网络拥塞.

先应式路由不能及时跟随网络拓扑结构变化, 反应式路由引入较大的转发延迟或网络开销都是难以接受的, 因此目前所提出的各种路由算法在 Ad Hoc 网络中的实际应用情况都不太理想.

本文提出了一种新的 Ad Hoc 自组织组网与路由算法, 其特点是在 Ad Hoc 自然拓扑结构基础上重构具有较小变化特性的逻辑网络拓扑结构, 并能有机结合先应式和反应式路由算法. 该算法既能适应网络拓扑结构的动态变化, 算法的实现又简单可靠、实用性强. 文中最后还给出了采用该算法组成的一个实用型 Ad Hoc 网络实验系统实例.

2 网络模型

Ad Hoc 网络的绝大部分自组织算法几乎都是考虑在根据节点间无线信道自然形成的拓扑结构中实现路由查找的方

法. 实际上, 无线信道形成的自然拓扑结构随节点的分布不同而不同, 并随节点的移动而可能出现剧烈变化. 甚至仅有一个节点的移动, 也可能形成与其移动前完全迥异的网络拓扑结构. 在图 1 所示的一个由 5 个节点构成的网络中, 节点 E 的移动使得网络拓扑结构发生了变化, 该变化涉及 3 条信道 (5、6、7) 与 4 个节点 (B 、 C 、 D 、 E).

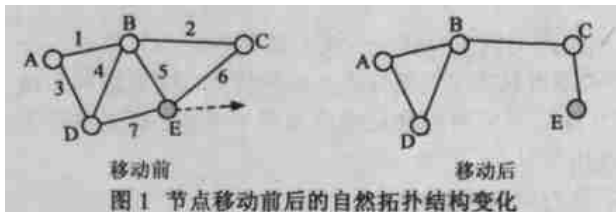


图 1 节点移动前后的自然拓扑结构变化

由图 1 可以看出, 利用自然拓扑结构实现路由查找方法的最大障碍之一是节点移动造成网络拓扑结构发生较大改变. 如果在自组织算法中, 降低节点移动对网络拓扑变化的影响, 则会减少网络路由的变化, 将会使路由趋于稳定.

我们用无向图 G 表示网络拓扑结构:

$$G = \langle N, L \rangle$$

其中 N 是节点集合, L 是线段集合, 两个处于相互无线覆盖的节点之间连接有一条线段. 当节点移动、加入或消失时, 网络拓扑结构都会发生变化. 设变化后的拓扑图为 G' :

$$G' = \langle N', L' \rangle$$

一般情况下, 节点集合从 N 到 N' 发生的变化相对较小, 而线段集合从 L 到 L' 可能有较大的变化. 我们现在考虑图 G 的一个子图 $G_s = \langle N, S \rangle$, 其中, $S \subset L$ 形成的拓扑结构, G_s 即是自然拓扑结构 G 中去除部分线段后的子图.

假设 S 的选择满足如下条件:

- ◆ 如果 G 是连通图, 则 G_s 也是连通图;
- ◆ L 变化到 L' 时, S 也相应变化到 S' , 且 S 的变化小于 L 的变化.

S 的变化小于 L 的变化是显然的. 关键问题是如何选择 S , 使得 L 发生任何变化时, S 的变化都处于较小的水平. 这样的 S 所构成的拓扑结构, 我们称其为拓扑变化最小的“最佳拓扑结构”. 如果我们求得这样的 S , 那么 Ad Hoc 网络的动态拓扑结构变化程度将减弱, 从而使得路由算法趋于简单.

从另一个角度来看, Ad Hoc 自然拓扑结构存在较多的“冗余”链路, 这些冗余链路却为组网带来了很大的额外开销. 首先是自然拓扑结构的所有链路不是独立存在的, 实际可用的链路要少得多, 原因是某个节点发送报文时, 该节点到其它节点的所有链路都全部被占用; 其次是每个节点对信道的使用率最多不超过 $1/3$, 这是因为隐藏终端和暴露终端的存在, 节点在发送一个报文后, 需要等待至少两次转发的时间 (下一节点转发、再下一节点的转发) 后, 才能发送下一个报文. 有关树形拓扑结构与自然拓扑结构的网络通信能力分析, 作者将另撰文论述.

受 IP 组播路由算法的启示, 我们考虑将 Ad Hoc 网络的自然拓扑结构重构成树形结构. 采用树形结构的考虑还基于树形拓扑结构易于构造, 使得重构算法容易实现. 当然, 树形拓扑结构并不一定就是“最佳拓扑结构”, 如何求得最佳拓

扑结构还有待于进一步的研究.

树形拓扑结构是在保证拓扑结构连通性的情况下, 使用 L 中的最少线段. 因此, 从直观上就可知道它受自然拓扑结构变化影响的程度较小. 图 2 显示了在与图 1 完全相同的情形下, 采用树形拓扑结构后, 拓扑结构的变化仅涉及 1 条信道 (4) 与 3 个节点 (B 、 C 、 E).

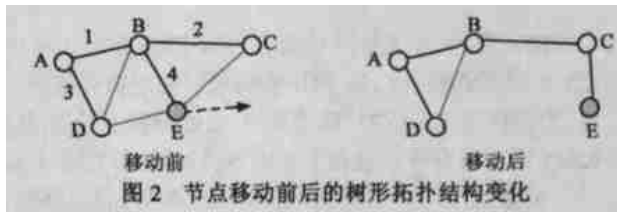


图 2 节点移动前后的树形拓扑结构变化

3 新的 Ad Hoc 组网和路由算法

3.1 算法思路

本文提出的核心树组网路由算法 (Kernel Tree Routing Algorithm, KTRA) 是一种新的 Ad Hoc 组网和路由算法, 其设计思想是在 Ad Hoc 网络自然拓扑结构中, 利用节点间信息交互, 设计树的构造算法和通信协议, 重构形成一种逻辑的树形拓扑结构.

核心树构造算法的基本思想是从树根开始向为生长, 逐渐生成整棵树. 所有节点按照“到根的距离最短”准则加入到树上. 节点间所有通信, 包括业务流量、拓扑结构维护等, 都限制在这棵树上流动.

我们知道, 在树形拓扑结构上的路由算法是非常简单的, 几乎不需要路由的计算, 前提条件是在拓扑结构发生变化时, 能及时更新树的拓扑结构. 在此情况下, 网络的路由算法就简单归结成为树的形成和维护算法, 通信就能在此动态拓扑环境下简单地实现.

3.2 KTRA 描述

KTRA 由两个子算法组成: 树的生成与维护算法、树形路由算法. 我们用三元组 (N, P, L) 表示核心树上的节点属性. 其中, N 是节点自己的标识, P 是父节点标识, L 是节点级别. 未加入核心树的节点级别为 0, 根节点级别为 1, 以加入核心树的节点级别为该节点到根的跳数值 + 1.

树的生成算法

节点初始化. 所有节点设置: $P = 0, L = 0$

第一步: 确定根节点. 一般情况下, 如果网络中有节点与有线网连接, 该节点可设置为根节点. 根节点的确定不是唯一的, 可以采用不同的策略确定根节点, 如人工指定或节点间通过协商解决. 根节点设置 $P = 0, L = 1$.

第二步: 节点加入树. 新节点 N 广播发送加入请求, 然后根据已加入树的邻居节点的应答消息, 选择其中一个级别最小的邻居节点作为自己的父节点. 即: 若节点 N 收到多个邻居节点的应答 ($L = 0$ 的节点不应答):

$$(N_1, P_1, L_1), (N_2, P_2, L_2), \dots, (N_x, P_x, L_x)$$

节点 N 将自己的属性设置成:

$$(N, P_i, L_{i+1}), \text{ 其中: } L_i = \min(L_1, L_2, \dots, L_x), \text{ 父节点 } P_i \text{ 为 } L_i \text{ 对应的 } N_i.$$

第三步: 节点 N 确定 P_i 后, 向 P_i 通告自己的加入。

除根节点外, 所有节点都经过第二、三步加入到了树中。选择父节点的决策过程除了父节点的级别外, 可以通过链路质量、信道忙闲的加权的综合判断, 获得更好的拓扑结构。在第三步中, 加入节点的认证过程, 验证加入者身份的合法性判断。

容易证明树的生成算法的以下两个特点成立:

(1) 如果自然拓扑结构是连通图, 则所有节点都能够加入到树上。

(2) 所有节点到根节点的距离最近。

树的维护算法

对节点我们增加这样的约束条件:

每个节点只能有一个父节点, 并且节点必须将自己的所拥有的子孙节点情况向父节点报告, 而父节点不需要向子节点通告父节点以上的节点情况。每当子孙节点情况发生变化时, 都需要将此变化通告给父节点。

约束条件产生的结果情况是:

级别数越大的节点, 掌握的拓扑结构越少。级别数越小的节点, 掌握的拓扑结构越全面, 根节点掌握了全网的拓扑结构。

节点定期与自己的父、子节点联络。联络规则为: 在规定时间内若有数据传递, 则抑制联络, 否则就发送联络报文。

如果节点在几个周期内没有得到某个子节点的联络报文或数据报文, 则认为该子节点已脱离, 因此删除自己对该子节点的记录, 并逐级向上至根节点通告该子节点的脱离。

如果节点在几个周期内没有得到父节点的联络报文或数据报文, 则表明自己已从树上脱离, 因此发起一个重新加入树的过程。重新加入过程与新加入过程基本一致, 不同的是节点此时的级别仍维持脱离前的级别不变, 使得重新加入过程中、或者找不到新的父节点而无法加入树时, 仍能保证脱离节点所接子树上的节点之间可以通信。

树形路由算法

在树的生成与维护算法中, 节点加入树时的通告机制使得每个节点都掌握了其子孙节点的拓扑结构信息, 路由选择采用如下简单的算法即可实现:

(1) 若目的节点是子孙节点, 则中继到到目的节点的下一跳节点(即自己的某个子节点)。

(2) 否则, 则中继给自己父节点(默认路由)。

该树形路由算法具有如下的特点:

◆ 每个节点只需掌握网络的部分拓扑结构, 即自己的子孙节点, 其余节点的拓扑结构发生变化, 不会影响到该节点及其子孙节点, 因此, 该算法是一种采用部分拓扑信息的路由算法。

◆ 具备先应式路由和反应式路由的优点: 对已知位置的目的节点(子孙节点)的路由如同先应式路由, 而对未知位置的目的节点的路由, 则通过默认路由到父节点找到它, 这带有反应式路由及时跟随节点移动的特点。所有情况下都能直接路由, 没有路由寻找过程。

◆ 不存在 Ad Hoc 路由算法中难以避免的路由环路问

题^[7]。

◆ 容易实现网络中的广播和组播通信, 这也是 Ad Hoc 网络中的难点之一。

4 算法仿真

我们在 OPENT 平台上, 利用平台提供的无线路由器 wlan2_router 模型实现对 KTRA 算法的仿真。仿真主要围绕节点数量对网络吞吐量的影响、节点移动速度对网络吞吐量的影响等方面。



图3 网络吞吐量仿真结果

图3所示结果的仿真环境为18个节点, 分布在 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 范围, 节点通信半径300m, 移动半径300m。

在仿真结果中, 网络吞吐量随时间呈稳定发展。分析多次仿真结果, 可认为 KTRA 是收敛的, 在移动环境中能够保持收敛性。

5 实验系统

我们利用 IEEE802.11b 的 Ad Hoc 模式^[8] 构建了一个可实际运行的 Ad Hoc 网络, 实现并验证了 KTRA 算法的正确性和有效性。

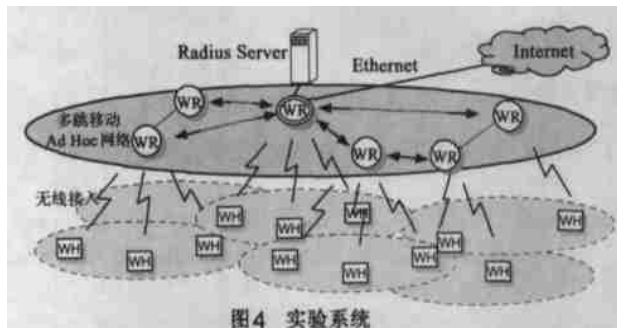


图4 实验系统

实验系统的组成如图4所示, 这是一种类似于蜂窝系统“基站-移动台”形式的 IP 网络结构。6个充当基站作用的可移动的无线 IP 路由器(Wireless Router, WR), 有两个独立的信道, 一个工作在 Ad Hoc 方式, 采用 KTRA 算法在 WR 间构成一个多跳移动 Ad Hoc 网络, 另一个信道工作在基础设施模式, 作为无线主机 WH(Wireless Host)的接入访问点 AP(Access Point)。

该系统中, WR 和 WH 都是可移动的。

◆ 在 WR 特殊摆放和任意摆放情况下, KTRA 能很快组成到根节点距离最近的树形拓扑结构。

◆ 任意位置的 WR 移动到任意位置时, 系统都能跟踪其

移动形成新的拓扑结构,并实现正确寻径。

WH 的通信能够很好地体现出树形拓扑在组网、路由快速切换方面的优越性。WH 可以实现如下的通信功能:

◆ 因 WH 移动或 WR 移动,WH 的接入点可切换到不同的 WR 上继续通信,WR 的路由能相应地实现快速切换,保证 WH 通信的持续性。典型的,路由的快速切换能够保证 WH 的 TCP 通信不因切换而中断。

◆ 在实验系统中,我们利用 NetMeeting 软件完成了 WH 之间语音和视频通信的测试。

在 WH 和 WR 均移动时,视频和语音仍保持了通信流畅,未出现抖动现象。有关该实验系统的组成结构、IP 编址技术、快速路由切换技术、以及用户接入与认证技术,将另撰文介绍。

6 结束语

核心树自组织算法的实质是采用主动构造网络拓扑结构比被动获取拓扑结构要容易的多。在 Ad Hoc 环境下,存在多条“冗余”链路,因此减少链路不一定会降低网络通信性能,而且还意味着降低了网络拓扑结构出现剧烈变化的可能性。采用树形拓扑结构只是其中的一种较实用的方法。

基于树形结构的 Ad Hoc 组网与路由算法——KTRA 算法,同传统的多跳无线网络组网方式和路由算法相比更简单有效,网络动态变化引起的自组织和路由调整的动荡小,网络运行更加稳定,具有较高的通信能力,算法的实现难度低,实用价值高。

从应用的角度看,KTRA 算法得到了所有节点到根节点距离最短的拓扑结构,因此在作为无线接入网使用时,可获得较理想的通信效果。特殊通信环境中,如跳频电台的 Ad Hoc 组网,采用树形组网结构,能够较容易地解决各电台间的跳频同步问题。

参考文献:

- [1] 任智,郭伟.多跳无线网路由协议研究进展[J].电信科学,2003,8.
- [2] Corson S, Macker J. Mobile ad hoc networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations[S]. RFC 2501, 1999.

- [3] IETF. Mobile Ad hoc Networks (manet) Charter[J]. <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>, 2004-07-09.
- [4] Padmini Misra. Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks [EB/OL]. http://www.cse.ohio-state.edu/~jain/cis788-99/ftp/ad-hoc_routing/index.html, 1999, 11.
- [5] Elizabeth M. Royer, Chai Keong Toh. A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(2): 46-55.
- [6] 赵志峰, 郑少仁. Ad Hoc 网络体系结构研究[J]. 电信科学, 2001, 17.
- [7] 任智, 郭伟. 移动 Ad Hoc 网单播路由协议研究进展[J]. 电子与信息学报, 2003 年增刊.
- [8] 毛玉明, 段景山, 杨宁. 802.11 无线局域网组网方式与移动性分析[J]. 电信技术, 2003, 10.

作者简介:



毛玉明 男, 1956 年出生于四川德阳, 电子科技大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为网络体系结构与协议、宽带通信网、无线通信网等。E-mail: ymmao@uestc.edu.cn



杨宁 女, 1974 年出生于四川永川, 硕士, 电子科技大学讲师, 主要研究方向为计算机通信网、宽带通信网技术等。



段景山 男, 1974 年出生于四川成都, 电子科技大学讲师, 硕士, 主要研究方向为计算机网络与通信技术。