

Ad Hoc 按需路由中的路径缩减动态模型

徐 佳¹, 周 曜², 李千目², 刘凤玉²

(1. 南京邮电大学计算机学院, 江苏南京 210046; 2. 南京理工大学计算机科学与技术学院, 江苏南京 210094)

摘 要: 在分析路径缩减算法原理和特点的基础上, 提出了路径缩减技术的动态分析模型, 该模型充分考虑了 Ad Hoc 网络的移动性、扩展性, 能较为全面和有效地分析和评估各路径缩减算法. 在此模型的基础上, 提出缩减事件发生概率的计算方法以及与各类网络参数的定量关系. 以 SHORT 和 PCA 算法为例的仿真结果证明了该模型的正确性和有效性.

关键词: 通信技术; 自组网; 路径缩减; 动态模型

中图分类号: TN915.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 11-2486-07

Dynamic Model of Path Compression for on-Demand Ad Hoc Routing

XU Jia¹, ZHOU Yao², LI Qian-mu², LIU Feng-yu²

(1. Computer Institute, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210046, China;

2. Institute of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: Path compression techniques are efficient on-demand routing optimizing techniques for mobile Ad Hoc networks. This paper analyzed the principles and characteristics of path compression algorithms and proposed dynamic model for the analysis of path compression. This model took the mobility and expansibility of Ad Hoc networks into account and was efficient to analyze or evaluate path compression algorithms. The quantitative relationship and probability expression for pivotal compression events were given based on the model. The simulation results of SHORT and PCA show that it is a correct and efficient dynamic model for path compression. Finally, some suggestions and applications about the model were proposed.

Key words: communication technology; Ad Hoc networks; path compression; dynamic model

1 引言

移动多跳 Ad Hoc 网络(MANET)是一种自创造、自组织、自管理并且不需要其他基础设施支持的无中心网络^[1]. 然而, MANET 网络中路由策略的设计是一项具有挑战性的工作, 这是因为 MANET 网络的拓扑结构是动态变化的, 节点的能源和处理能力是有限的, 这使得需要长期稳定拓扑和复杂计算的常规路由协议难以适应 MANET 网络. 目前国内外已经提出了不少 Ad Hoc 路由协议. 按照协议的驱动方式可以将这些协议分为两类: 表驱动路由协议和按需驱动路由协议. 其中按需驱动路由协议只有当有数据要发送时才发起路由查找, 且不需要周期性地向路由信息广播, 有效地降低了网络资源占用, 在可扩展性和有效性等方面具有明显优势. 此类路由协议也因此成为目前研究的主流, 典型的有 AODV^[2], DSR^[3], TORA^[4]等.

典型的按需路由协议的路由发现机制(使用 RREQ/

RREP)将建立一条最短(具有最小跳数)路由. 然而, Ad Hoc 网络中的节点是具有移动特性的, 并且缺乏全局拓扑信息, 这使得建立的路径在经过一段时间后变得不再优化. 即使在当前网络中存在一条或多条更短的到达目的节点的路径, 路由协议也不会发现这些更加合理和优化的路径. 路由协议将保持原始的路径, 直到发生断路时再重新发起路由请求. 这种情况并不是所希望的, 因为长路径相比短路径需要更多网络资源的支持从而导致路由性能的下降, 如带宽和能量消耗增加, 由于路径被破坏的概率增加而导致路由生存时间降低以及增加自冲突现象^[5]发生的概率. 路径缩减技术是一种建立在路由协议之上的以开发潜在更短路径为目标的动态路由优化技术. 相关文献^[6~8]已经证明路径缩减技术是降低资源消耗和提高网络性能的有效手段.

通过各种技术和方法感知并自适应网络状态的变化是一种有效的提升路由性能的手段, 作者提出的自适应分簇路由过渡协议^[9], 通过动态感知网络规模并执行

不同的路由策略来提升路由性能. 同样地, 路径缩减技术的主要思路是通过某种手段获知更优路径, 通过修改相应节点的路由表项来达到缩减路径的目的. 设计路径缩减技术的重要原则是在不招致很多负担的情况下优化按需路由所建立的路径. 我们在文献[10]中总结了当前典型的路径缩减技术, 并比较和分析了这些算法的特点和适用情况.

从支持的路由协议类型来分, 主要分为源路由路径缩减算法和分布式路由路径缩减算法. 其中源路由路径缩减技术必须将路由的更新信息送达到源节点, 目前仅有的针对源路由的路径缩

表 1 典型路径缩减技术对比

缩减技术	ARS	DPS	SHORT	PCA
路由协议类型	按需源路由	按需分布式路由	按需分布式路由	按需分布式路由
缩减感知方式	侦听	平滑信噪比	侦听	侦听
路由更新方式	直接更新	握手机制	直接更新	直接更新
额外存储空间	有	无	有	有
控制消息数量	少	多	中	少
支持缩减类型	(n,1)	(n,1)	(n,1)和(n,2)	(n,1)和(n,2)
缩减模型	无	无	简单静态模型	无
多次缩减问题	无条件路由应答表	无解决方案	设置路由稳定期	无解决方案
短暂缩减问题	无解决方案	无解决方案	无解决方案	辅助路由表
包含源或目的缩减	支持	支持	不支持	支持
“之”字型路径	不支持	不支持	不支持	支持
双向缩减	不支持	不支持	不支持	部分支持
链路质量	好	好	不保证	不保证
缩减效果	不保证	不保证	好	好

减技术是 DSR 协议中的自动路由缩减 ARS^[3] (Automatic Route Shortening). 按照感知更优路径的方法分, 可以分为基于控制消息的路径缩减算法和基于侦听的路径缩减算法. 基于控制消息的路径缩减算法需要通过额外的控制消息来发现缩减, 典型的算法是 Masato Saito 提出的 DPS^[6] (Dynamic Path Shortening). 基于侦听的路径缩减算法则通过混杂接收模式并分析附加在数据包头部的信息来感知缩减, 典型的算法有 SHORT^[7] 和 PCA^[8].

表 1 对比了主要路径缩减技术的应用场合和特点, 可以看出现有的路径缩减技术在考虑缩减时各有侧重, 没有各个方面都表现均衡的解决方案. 其中一个重要原因是目前路径缩减领域尚缺乏必要的理论指导和相关的模型分析. 文献[7]提出了一种针对静态环境的路径缩减建模方法. 该方法假设每个节点的下一跳均在该节点的一跳范围内产生, 每个节点保持静止且路径始终保持连接状态. 但该模型对静态环境的假设导致其不能适应现实的移动 Ad Hoc 网络环境. 本文致力于构建有效、实用的 Ad Hoc 路径缩减动态模型, 其意义在于: (1) 为路径缩减算法提供理论基础和分析模型; (2) 使得算法参数设置科学化; (3) 对算法性能分析提供重要参考; (4) 为今后算法的提出和改进提供新的思路.

2 Ad Hoc 路径缩减动态模型

不失一般性, 可以将路径上的一次局部压缩描述为一个二元组 (n, k) , 其中 n 为压缩前的跳数, k 为压缩后的跳数 ($k < n$). 如图 1(a) 中原始局部路径 $A-B-C$ 缩减为新的局部路径 $A-C$, 称为 $(2, 1)$ 缩减; 图 1(b) 中原始局部路径 $A-B-C-D$ 缩减为新的局部路径 $A-E-D$, 称为 $(3, 2)$ 缩减. 考虑到当 $k \geq 3$ 的时候, 压缩算法将变得复杂从而导致不稳定性 and 额外代价, 目前的路径压缩技术一般只考虑 $(n, 1)$ 和 $(n, 2)$ 这两类缩减.

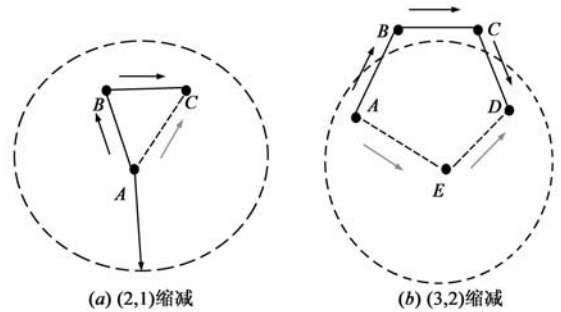


图 1 基本的路径压缩形式

本节针对 $(n, 1)$ 路径缩减和 $(n, 2)$ 路径缩减建立动态模型, 需要指出的是: (n, k) 缩减 ($k > 2$) 的情况由于相对复杂, 一般的路径缩减算法并不考虑, 因此本文也仅对 $k \leq 2$ 的情况建立缩减模型.

2.1 $(n, 1)$ 路径缩减动态模型

$(n, 1)$ 缩减是由路径上的某个非邻居节点进入到该路径上的某个节点的传输区域引起的. 为此, 在以下假设的基础上对 $(n, 1)$ 路径缩减进行建模: (1) 所有节点随机分布在区域 S 中; (2) 每个节点的最大传输距离相同, 设为 r . 基于以上假设, 我们可以计算出在时间 t 内节点 v 进入到另一个节点 u 的传输范围内, 以及一个存在的邻居 v 移动出节点 u 的传输范围的概率. 在这里我们把节点 u 的有效传输区域表示为 $D(u, r)$, 即以 u 为圆心, r 为半径的圆内区域. 两节点的相对移动距离为 $BC = d = v_0 * t$ (v_0 为相对速度).

2.1.1 节点 v 进入到区域 $D(u, r)$ 的概率

在时间 t 内节点 v 进入到节点 u 的传输区域的概率 $P_{in(n,1)}$ 即为在时间 t 内节点 v 进入区域 $D(u, r)$ 的概率, 可以分两种情况计算:

情况 1 $0 < d < 2r$, 即图 2 所示情况, 假定节点 u

位于位置 A , 节点 v 在位置 B . 节点的最大传输距离为 $AC = r$, 节点 u 和节点 v 的距离为 $AB = x (> r)$. 假设图 2 中阴影部分区域为 S_1 . 因为 $0 < d < 2r$, 为保证节点 v 能在移动距离 d 后进入区域 $D(u, r)$, 有 $x \in (r, r + d]$.

节点 v 离节点 u 的距离为 x 的概率为 $\frac{2\pi x}{S}$. 由于两节点的相对移动可以是任意方向, 因此在上述条件下节点 v 进入区域 $D(u, r)$ 的概率为 $\frac{S_1}{\pi d^2}$. 综上所述, 设该情况下节点 v 进入到区域 $D(u, r)$ 的概率为 $P_{in(n,1)_1}$, 则有:

$$P_{in(n,1)} = P_{in(n,1)_1} = \int_r^{r+d} \frac{2\pi x}{S} \frac{S_1}{\pi d^2} dx = \int_r^{r+d} \frac{2xS_1}{Sd^2} dx \quad (1)$$

其中, $S_1 = \alpha_1 r^2 + \alpha_2 d^2 - \sin\alpha_1 \sin\alpha_2 (r^2 + d^2)$;

$$\alpha_1 = \angle CAB = \arccos \frac{x^2 + r^2 - d^2}{2xr};$$

$$\alpha_2 = \angle CBA = \arccos \frac{x^2 + d^2 - r^2}{2xd}.$$

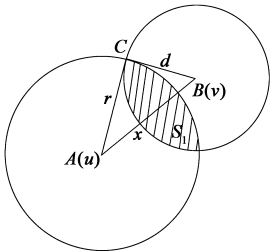


图2 $P_{in(n,1)_1}$ 计算示意图

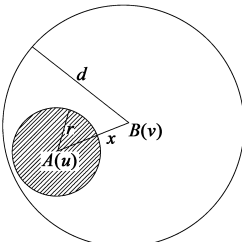


图3 $P_{in(n,1)_2}$ 计算示意图

情况 2 $d \geq 2r$, 根据 x 的取值范围, $P_{in(n,1)}$ 为两个概率 $P_{in(n,1)_1}$ 及 $P_{in(n,1)_2}$ 的和, 其中 $P_{in(n,1)_1}$ 为图 2 所示的情况, $x \in (d - r, d + r]$; $P_{in(n,1)_2}$ 为图 3 所示的情况, $x \in (r, d - r]$, 则:

$$\begin{aligned} P_{in(n,1)} &= P_{in(n,1)_1} + P_{in(n,1)_2} \\ &= \int_{d-r}^{d+r} \frac{2\pi x}{S} \frac{S_1}{\pi d^2} dx + \int_r^{d-r} \frac{2\pi x}{S} \frac{\pi r^2}{\pi d^2} dx \\ &= \int_{d-r}^{d+r} \frac{2xS_1}{Sd^2} dx + \frac{\pi r^2 (d - 2r)}{Sd} \end{aligned} \quad (2)$$

2.1.1.2 节点 v 离开区域 $D(u, r)$ 的概率

在时间 t 内, 一个存在的邻居节点 v 离开节点 u 的传输范围的概率 $P_{out(n,1)}$ 即为在时间 t 内节点 v 离开区域 $D(u, r)$ 的概率. 该概率可以分三种情况计算:

情况 1 $0 < d < r$, 即图 4 所示情况, 假设图 4 中阴影部分区域为 S_2 . 为使得节点 v 有可能离开区域 $D(u, r)$, $x \in (r - d, r]$. 设该情况的概率为 $P_{out(n,1)_1}$, 则有:

$$P_{out(n,1)} = P_{out(n,1)_1} = \int_{r-d}^r \frac{2\pi x}{S} \frac{S_2}{\pi d^2} dx = \int_{r-d}^r \frac{2xS_2}{Sd^2} dx \quad (3)$$

其中, $S_2 = (\pi - \alpha_2) d^2 - (\alpha_1 r^2 - xd \sin\alpha_2)$;

$$\alpha_1 = \angle CAB = \arccos \frac{x^2 + r^2 - d^2}{2xr};$$

$$\alpha_2 = \angle CBA = \arccos \frac{x^2 + d^2 - r^2}{2xd}$$

情况 2 $r \leq d < 2r$, 根据 x 的取值范围, $P_{out(n,1)}$ 为两个概率 $P_{out(n,1)_1}$ 及 $P_{out(n,1)_2}$ 的和, 其中 $P_{out(n,1)_1}$ 为图 4 所示的情况, $x \in (d - r, r]$; $P_{out(n,1)_2}$ 为图 5 所示的情况, $x \in (0, d - r]$, 则有:

$$\begin{aligned} P_{out(n,1)} &= P_{out(n,1)_1} + P_{out(n,1)_2} \\ &= \int_{d-r}^r \frac{2\pi x}{S} \frac{S_2}{\pi d^2} dx + \int_0^{d-r} \frac{2\pi x}{S} \frac{\pi (d^2 - r^2)}{\pi d^2} dx \\ &= \int_{d-r}^r \frac{2xS_2}{Sd^2} dx + \frac{\pi (d + r)}{Sd^2} (d - r)^3 \end{aligned} \quad (4)$$

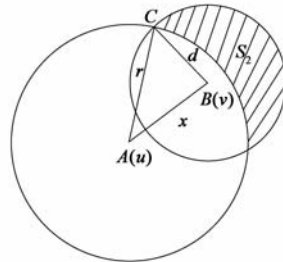


图4 $P_{out(n,1)_1}$ 计算示意图

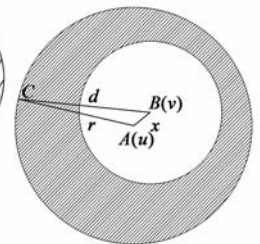


图5 $P_{out(n,1)_2}$ 计算示意图

情况 3 $d \geq 2r$, 即图 5 所示情况, 该情况的概率为 $P_{out(n,1)_2}$, 则:

$$\begin{aligned} P_{out(n,1)} &= P_{out(n,1)_2} \\ &= \int_0^{d-r} \frac{2\pi x}{S} \frac{\pi (d^2 - r^2)}{\pi d^2} dx = \frac{\pi (d^2 - r^2) r^2}{Sd^2} \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 (n, 2) 路径缩减动态模型

($n, 2$) 缩减是由路径外的某个节点进入到该路径上的某两个相邻节点的公共传输区域引起的. 为此, 在以下假设的基础上对 ($n, 2$) 路径缩减进行建模:

- (1) 所有节点随机分布在区域 S 中.
- (2) 每个节点的最大传输距离相同, 设为 r .
- (3) 缩减发起点 w 在节点 u 和节点 v 的中垂线上移动.

该假设是合理的, 首先, 该情况为 ($n, 2$) 缩减的典型情况, 具有代表性; 其次, 考虑到移动 Ad Hoc 网络环境 (无法获得很多计算所需要的参数, 计算量不能大, 不能增加额外通信等) 的特点, 我们更注重模型的可用性, 本文的模型不一定要在该假设条件下才能应用, 仿真已经证明了计算出的缩减稳定期在实际使用中是有效的.

基于以上假设, 我们可以计算出在时间 t 内一个节点 w 进入到另两个节点 u 和 v 的公共传输范围内以及一个存在的邻居 w 离开节点 u 和 v 的公共传输范围的概率. 在这里我们把节点 u 和节点 v 的公共传输区域表示为 $D(u, v, r)$, 即以 r 为半径的两个圆的圆周互相经过对方圆心 u 和 v 所围成的区域. 设节点 u 和节点 v 之间的距离为随机变量 L , L 在 $(r, 2r]$ 上均匀分布. 在 t 时间内缩减发起点 w 到缩减中心的相对移动距离为 $d =$

$v_0 * t$ (v_0 为相对速度)。

2.2.1 节点 w 进入到区域 $D(u, v, r)$ 的概率

在时间 t 内节点 w 进入到另两个节点 u 和 v 的公共传输区域的概率 $P_{in(n,2)}$ 即为在时间 t 内节点 w 进入到区域 $D(u, v, r)$ 的概率, 该概率可以分两种情况计算:

情况 1 $0 < d < \sqrt{4r^2 - L^2}$, 即图 6 所示情况, 假定节点 u 位于位置 A , 节点 v 在位置 B , 节点 w 在位置 C . 节点 w 和坐标原点 O 的距离为 $CO = z$ ($z > \frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2}$). 为使得节点 w 有可能进入到区域 $D(u, v, r)$,

$z \in (\frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2}, \frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2} + d]$. 假设图 6 中阴影部分区域为 S_3 . 设该情况的概率为 $P_{in(n,2)_1}$ 则:

$$P_{in(n,2)} = P_{in(n,2)_1} = \int_{\frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2}}^{\frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2} + d} \left(\frac{2\pi z}{S} \cdot \frac{S_3}{\pi d^2} \right) dz \quad (6)$$

推导过程与 2.1.1 节类似. 设圆 A, B, C 的方程分别为: $(x + \frac{L}{2})^2 + y^2 = r^2, (x - \frac{L}{2})^2 + y^2 = r^2,$

$$(x)^2 + (y + z)^2 = d^2, \text{ 则有:}$$

$$S_3 = 2 \int_0^{|ED|} \sqrt{r^2 - (x + \frac{L}{2})^2} - (\sqrt{d^2 - x^2} - z) dx$$

其中, $ED = CD \sin(\alpha_1 - \alpha_2) = d \sin(\alpha_1 - \alpha_2)$

$$\alpha_1 = \angle ACD = \arccos \frac{(\frac{L}{2})^2 + z^2 + d^2 - r^2}{2d\sqrt{(\frac{L}{2})^2 + z^2}}$$

$$= \arccos \frac{L^2 + 4z^2 + 4d^2 - 4r^2}{d\sqrt{L^2 + 4z^2}}$$

$$\alpha_2 = \angle ACO = \arctg \frac{L/2}{z} = \arctg \frac{L}{2z}$$

情况 2 $d \geq \sqrt{4r^2 - L^2}$, 根据 z 的取值范围, $P_{in(n,2)}$ 为两个概率 $P_{in(n,2)_1}$ 及 $P_{in(n,2)_2}$ 的和, 其中 $P_{in(n,2)_1}$ 为图 6 所示的情况, $P_{in(n,2)_2}$ 为图 7 所示的情况(阴影部分区域为 S_4), 则:

$$P_{in(n,2)} = P_{in(n,2)_1} + P_{in(n,2)_2}$$

$$= \int_{\frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2}}^{d + \frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2}} \frac{2\pi z}{S} \frac{S_3}{\pi d^2} dz + \int_{\frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2}}^{d - \frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2}} \frac{2\pi z}{S} \frac{S_4}{\pi d^2} dz \quad (7)$$

$$\text{其中, } S_4 = 2(\pi r^2 \frac{2\arccos \frac{L}{2r}}{2\pi} - \frac{L}{2} \sqrt{r^2 - (\frac{L}{2})^2})$$

$$= 2r^2 \arccos \frac{L}{2r} - \frac{L}{2} \sqrt{4r^2 - L^2}$$

2.2.2 节点 w 离开区域 $D(u, v, r)$ 的概率

在时间 t 内节点 w 离开节点 u 和 v 的公共传输区域的概率 $P_{out(n,2)}$ 即为在时间 t 内节点 w 离开区域

$D(u, v, r)$ 的概率, 该概率可以分三种情况计算:

情况 1 $0 < d < \frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2}$, 即图 8 所示情况, 假设图 8 中阴影部分区域为 S_5 . 设该情况的概率为 $P_{out(n,2)_1}$, 则:

$$P_{out(n,2)} = P_{out(n,2)_1} = \int_{\frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2} - d}^{\frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2}} \frac{2\pi z}{S} \frac{S_5}{\pi d^2} dz$$

$$= \int_{\frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2} - d}^{\frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2}} \frac{2zS_5}{Sd^2} dz \quad (8)$$

其中, $S_5 = \pi d^2 - 2 \int_0^{ED} (\sqrt{r^2 - x^2} - z) + \sqrt{r^2 - (x + \frac{L}{2})^2} dx;$
 $ED = CD \sin(\alpha_1 - \alpha_2) = d \sin(\alpha_1 - \alpha_2);$ (α_1 和 α_2 的计算方法在 2.2.1 节中已经给出)

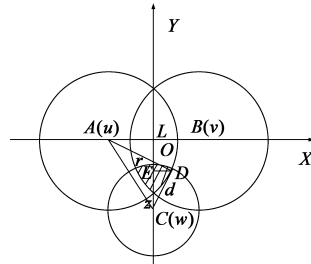


图6 $P_{in(n,2)_1}$ 计算示意图

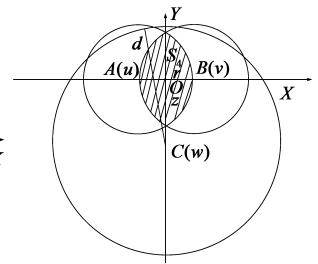


图7 $P_{in(n,2)_2}$ 计算示意图

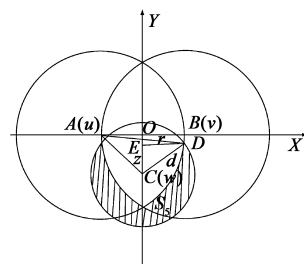


图8 $P_{out(n,2)_1}$ 计算示意图

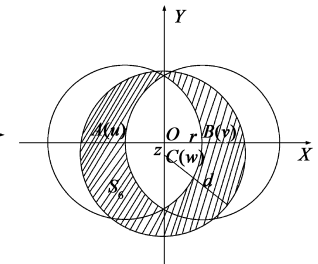


图9 $P_{out(n,2)_2}$ 计算示意图

情况 2 $\frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2} \leq d < \sqrt{4r^2 - L^2}$, 根据 z 的取值范围, $P_{out(n,2)}$ 为两个概率 $P_{out(n,2)_1}$ 及 $P_{out(n,2)_2}$ 的和, 其中 $P_{out(n,2)_1}$ 为图 8 所示的情况, $P_{out(n,2)_2}$ 为图 9 所示的情况, 设图 9 中阴影部分区域为 S_6 , 则:

$$P_{out(n,2)} = P_{out(n,2)_1} + P_{out(n,2)_2}$$

$$= \int_{d - \frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2}}^{\frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2}} \frac{2\pi z}{S} \frac{S_5}{\pi d^2} dz + \int_0^{d - \frac{\sqrt{4r^2 - L^2}}{2}} \frac{2\pi z}{S} \frac{S_6}{\pi d^2} dz \quad (9)$$

其中, $S_6 = \pi d^2 - 2(\frac{\arccos \frac{L}{2r}}{2\pi} \pi r^2 - \frac{L}{2} \sqrt{r^2 - (\frac{L}{2})^2})$

情况 3 $d \geq \sqrt{4r^2 - L^2}$, 即图 9 所示情况, 该情况的概率为 $P_{out(n,2)_2}$, 则:

$$P_{\text{out}(n,2)} = P_{\text{out}(n,2)}_{-2} = \int_0^{\frac{\sqrt{3}}{2}r} \frac{2\pi z}{S} \frac{S_6}{\pi d^2} dz \quad (10)$$

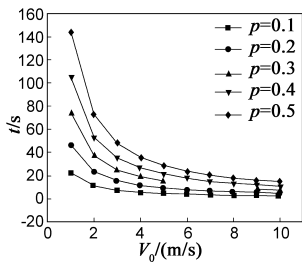


图10 相对移动速度、时间与(n,2)缩减概率的关系

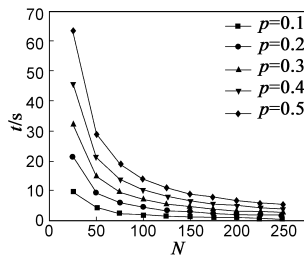


图11 网络规模、时间与(n,2)缩减概率的关系

3 路径缩减概率计算与数据分析

基于上述动态路径缩减模型计算出的结果. 可以在此基础上计算出路径缩减事件发生的概率:

(1) 发生(n,1)和(n,2)缩减的概率: 设网络总节点数为 N , 给定节点数为 $M(N-1 > M \geq 3)$ 的路径上某节点 u , 则在节点 u 处发生(n,1)缩减的概率为: $p_{(n,1)\text{-join}} = 1 - (1 - p_{\text{in}(n,1)})^{M-3}$; 在节点 u 处发生(n,2)缩减的概率为: $p_{(n,2)\text{-join}} = 1 - (1 - p_{\text{in}(n,2)})^{N-M}$.

(2) (n,1)和(n,2)路径发生断路的概率: 在节点 u 处(n,1)路径发生断路的概率为(在 u 处已经发生(n,1)缩减的条件下): $p_{(n,1)\text{-leave}} = p_{\text{out}(n,1)}$; 在节点 u 处(n,2)路径发生断路的概率为(在 u 处已经发生(n,2)缩减的条件下): $p_{(n,2)\text{-leave}} = p_{\text{out}(n,2)}$.

(3) 发生多次缩减和短暂缩减的概率: 设网络总节点数为 N , 给定节点数为 $M(N-1 > M \geq 3)$ 的路径上某节点 u , 则在节点 u 处发生多次缩减的概率为:

$$p_{\text{ms}} = 1 - (1 - p_{\text{in}(n,2)})^{N-M} - p_{\text{in}(n,2)} (1 - p_{\text{in}(n,2)})^{N-M-1}$$

在短暂时间内, 节点 u 处发生短暂缩减的概率为:

$$p_{\text{es}} = p_{(n,2)\text{-join}} \cdot p_{(n,2)\text{-leave}} = (1 - (1 - p_{\text{in}(n,2)})^{N-L}) \cdot p_{\text{out}(n,2)}$$

我们在 Matlab 上实现了上述模型, 获得了在特定参数下的理论值. 由于篇幅有限, 在此仅以(n,2)缩减为例进行分析. 设 $S = 4 \times 10^6$, $L = r = 625$, $M = 8$, 图 10 表现了在 50 个节点的网络中不同(n,2)缩减概率下时间与节点相对移动速度之间的关系. 分析可知, 在相同缩减概率和网络规模下, 相对移动速度 v_0 和时间成反比, 即相对移动速度越快, 发生(n,2)缩减的时间间隔越短, 即越容易发生(n,2)缩减. 另外, 在同等速度下缩减概率越大, 所需要的时间越长, 即发生(n,2)缩减的次数和网络的存在时间有关. 图 11 是在相对移动速度为 5m/s, 在不同缩减概率下时间与网络规模之间的关系. 在相同缩减概率和相对移动速度下, 网络规模越大, 发生(n,2)缩减的时间间隔越短, 即越容易发生(n,2)缩减.

4 实验与分析

实验使用康内尔大学开发的 JiST/SWANS 作为仿真平台. JiST 是一个高效率的离散事件仿真引擎, SWANS 则是一个基于 JiST 平台的可扩展无线网络仿真器. 相比于 ns2 和 GloMoSim, JiST/SWANS 能仿真更大规模的网络, 同时在仿真所耗费的时间和内存上也优于前两者, 具有较好的可扩展性. 本文在 JiST/SWANS 平台上实现了 SHORT 算法和 PCA 算法, 以验证动态模型的正确性. 仿真中设置场景大小为 $800 \times 800\text{m}^2$, 节点传输半径 $r = 225\text{m}$, 链路层协议采用 802.11DCF. 仿真中选择特定的两个节点作为数据发送源和目的, 数据源平均每秒发送一个数据包, 数据包大小默认为 500bytes, 设置较高的数据发送频率有利于发现网络中缩减. 路由协议为 AODV, 节点移动采用随机方向模型(RD), 为检测出某些发生概率很低的事件, 设置较长的仿真时间 36000s.

本文对 SHORT 算法和 PCA 算法在不同移动速度和网络规模下的(n,1)缩减次数、(n,1)断开次数、(n,2)缩减次数、(n,2)断开次数以及多次缩减次数和短暂缩减次数做了统计, 并与利用本文模型计算出的理论值进行了比较. 为收集上述测试数据, 我们在上述算法中增加了缩减记录表 CRT(Compression Record Table), CRT 中记录了每次缩减的本地节点地址、缩减的下一跳地址、目的节点地址、缩减的仿真时间和缩减类型((n,1)缩减或(n,2)缩减). 在本地节点路由表项被修改时, 如果 CRT 中存在相同的本地地址和目的节点地址并且缩减的下一跳地址不同, 则认为该缩减被断开, 通过缩减类型判断是(n,1)断开或是(n,2)断开. 某节点发生(n,2)缩减后 3s 内在该节点处发生断路被认为是短暂缩减; 某节点接收到(n,2)缩减请求后 2ms 内再次接收到(n,2)缩减请求被认为是多次缩减. 另外, 测试的数据均为累计值, 即不同时间发生的相同缩减被认为是不同的缩减.

表 2 是 SHORT 算法在网络节点数为 100 的规模下对应不同相对移动速度的测试数据与理论值, 表 3 是 SHORT 算法在节点相对移动速度为 30m/s 的情况下对应不同网络规模的测试数据与理论值. 表中仿真值均为 5 次仿真结果的平均值. 由第 3 节的概率计算公式可知, 由于整个仿真时间内该压缩事件的发生次数满足二项分布, 本文以该分布的期望值作为理论值(假设仿真过程中路径始终存在, 公式计算中令 $L = r = 225$, M 根据仿真统计结果设置). 平均误差的计算方法是理论值与仿真值的绝对差除以仿真值后的平均值. 从表中数据可以看出, 各测试项目的统计值随着网络流动性增强和网络规模的扩大均呈上升趋势, 符合动态缩减

模型理论的相关结论. 通过模型计算出的理论值与仿真值较接近, 平均误差在可接受的范围内. 这表明本文所提出的动态缩减模型符合实际情况, 是正确和有效的. 另外, 从表 3 中可以看出, $(n, 1)$ 缩减次数、 $(n, 1)$ 路径断开次数和 $(n, 2)$ 路径断开次数独立于网络节点数, 各算法对应的仿真值保持相对稳定. 本文的动态模型

已经证明了这些事件的发生概率和网络节点数无关. 本文第 3 节给出的概率表达式和数据分析表明: $(n, 1)$ 缩减次数和路径长度、网络区域大小、传输距离和相对移动速度有关, 而 $(n, 1)$ 路径断开次数和 $(n, 2)$ 路径断开次数仅和网络区域大小、传输距离和相对移动速度有关.

表 2 不同移动速度下 SHORT 算法的仿真值与理论值比较

相对移动速度(m/s)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	平均误差	
$(n, 1)$ 缩减次数	仿真值	665.2	885.4	1717.2	1736.2	2372.5	2811.2	2912.4	3649.3	3983.5	10.14%
	理论值	720	1080	1440	1800	2160	2520	2880	3240	3600	
$(n, 1)$ 断开次数	仿真值	1.8	2.8	3.8	4.9	5.8	6.9	6.9	8.3	9.2	4.62%
	理论值	1.8	2.7	3.6	4.5	5.4	6.3	7.2	8.1	9	
$(n, 2)$ 缩减次数	仿真值	1780	2826	4080	4083	5560	6564	7582	8991	9529	7.37%
	理论值	1800	2700	3600	4500	5400	6300	7200	8100	9000	
$(n, 2)$ 断开次数	仿真值	3.8	5.1	7.5	8.7	10.1	12.1	12.3	14.6	19.8	7.41%
	理论值	3.6	5.4	7.2	9	10.8	12.6	14.4	16.2	18	
多次缩减次数	仿真值	625	972	1084	1495	2118	2213	2915	3600	3619	10.59%
	理论值	692	1038	1385	1731	2077	2423	2769	3115	3462	
短暂缩减次数	仿真值	353	425	727	880	934	1232	1338	1541	1542	7.41%
	理论值	325.5	488.2	651	813.7	976.5	1139.2	1302	1464.7	1627.5	

表 3 不同网络规模下 SHORT 算法的仿真值与理论值比较

节点数量		50	100	150	200	250	300	350	400	平均误差
$(n, 1)$ 缩减次数	仿真值	2154.4	2783.8	2699.2	2122	2843.5	2380.8	2163.8	2205.2	10%
	理论值	2160	2160	2160	2160	2160	2160	2160	2160	
$(n, 1)$ 断开次数	仿真值	5.8	5.4	4.3	5.4	5.3	5.1	6.0	5.8	4.28%
	理论值	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	
$(n, 2)$ 缩减次数	仿真值	1923.6	5145	6768.8	7989.2	9568.5	11000.6	14200.4	14400.8	10.01%
	理论值	1964	5400	7200	8307.7	9818.2	13500	15428.6	18540	
$(n, 2)$ 断开次数	仿真值	10.6	12	12.6	12.7	11.4	13.8	10.2	10.4	9.74%
	理论值	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	
多次缩减次数	仿真值	1729.5	1876.2	2019.7	3461.1	5519.6	7021.8	7690.2	8582.3	7.58%
	理论值	1878.3	2077	2250	3600	5142.9	6352.9	7200	8307.7	
短暂缩减次数	仿真值	511.5	892.2	1311.2	1835.2	2499.8	2576.2	3076.4	3709.6	7.05%
	理论值	586.6	976.5	1235.4	1857.1	2387.5	2846.8	3268.9	3857.1	

表 4 不同移动速度下 PCA 路径缩减关键数据测试结果

相对移动速度(m/s)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	平均误差
$(n, 1)$ 缩减次数	617.2	1033.2	1629.2	1636.2	2252.7	2791.6	2942.1	2972.8	3991.3	8.61%
$(n, 1)$ 断开次数	1.8	2.4	3.4	4.4	5.6	6.4	6.8	7.6	9.8	5.18%
$(n, 2)$ 缩减次数	1750	2553	3460.8	4169	5192.4	6207	7222.8	8232.6	9287.6	3.46%
$(n, 2)$ 断开次数	4	5.2	7.5	8.5	10.6	13.1	16.4	16.8	18.6	5.38%
多次缩减次数	675	1189	1217	1504	2115.7	2475.8	2917	3218.6	3608.1	5.17%
短暂缩减次数	311.9	413.5	694.2	824.8	936.4	1107.2	1282.8	1488.4	1590.2	4.73%

表 5 不同网络规模下 PCA 路径缩减关键数据测试结果

节点数量	50	100	150	200	250	300	350	400	平均误差
$(n, 1)$ 缩减次数	2145.2	2738.6	2698.2	2290.8	2436.4	2605	2731.4	2082.3	12.5%
$(n, 1)$ 断开次数	5.4	5.2	4.6	5.6	5.4	6.6	6.2	4.6	9.15%
$(n, 2)$ 缩减次数	1978.6	5210.4	7113.8	8617.6	9827.4	14671.6	15787.6	18178.8	13.04%
$(n, 2)$ 断开次数	11.4	10.5	10.2	10.6	11.8	11.8	12.4	15.4	8.6%
多次缩减次数	1789	2198	2261.2	3477.2	5460.4	7091.4	7287.2	8692.4	5.75%
短暂缩减次数	517	1009.2	1230.2	1810	2241.8	2310.2	3022.4	3645.6	6.61%

为表现模型的通用性,我们对 PCA 算法做了类似的测试,表 4 和表 5 列出了 PCA 的各项仿真值(理论值与表 2 和表 3 中相同,在此略去),并计算了平均误差.测试数据与理论值较接近.

5 结论及进一步的研究工作

路径缩减技术能有效弥补按需路由协议在路径优化方面的功能缺失,发掘被忽略的性能,是 Ad Hoc 网络按需路由协议有效和必要的优化组件.然而目前为止并没有提出一个较为有效和全面的路径缩减模型,Ad Hoc 按需路由中的路径缩减技术研究缺少有力的理论支撑.本文提出了一个动态路径缩减技术的分析模型,该模型充分考虑了 Ad Hoc 网络的移动性、扩展性,得到了缩减事件发生概率与各网络参数之间的定量关系,能较为全面和有效地分析和评估路径缩减算法,仿真结果证明了该模型的正确性和有效性.利用本文提出的模型可以计算出缩减算法所需要的关键数据,如计算发生 $(n, 1)$ 或 $(n, 2)$ 缩减的平均时间间隔从而避免“恶性”缩减;计算发生 $(n, 1)$ 或 $(n, 2)$ 路径断路的平均时间间隔从而采取有效的主动路径维护策略以增加路径的生命期;计算发生多次缩减或短暂缩减的平均时间间隔从而周期性地遏制多次缩减或短暂缩减.作为该模型的一个典型应用,本文已经提出了基于该模型的路径缩减稳定组件^[11],将多次缩减和短暂缩减次数分别降低了 41% 和 86%.

另一方面,动态缩减模型的研究还处于初始阶段,需要进一步完善以有效提高该模型的准确性,如考虑和路径缩减的概率直接相关的节点间距离关系,考虑邻居节点数量等.事实上,不论是 $(n, 1)$ 缩减还是 $(n, 2)$ 缩减,邻居节点肯定不会参与到缩减中.因此可以对网络的节点密度做先期评估,在缩减概率计算时将邻居节点排除.

参考文献:

- [1] Yunjung Yi, Mario Gerla, TaekJin Kwon. Efficient flooding in Ad Hoc networks using on-demand (passive) cluster formation [A]. Proceedings of the Second Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-hoc-Net 2003) [C]. Mahdia, Tunisia: IFIP, 2003.
- [2] RFC3561, Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing [S].
- [3] RFC4728, The dynamic source routing protocol (DSR) for mobile ad hoc networks for IPv4 (RFC 4728)[S].
- [4] Internet-Draft, draft-ietf-manet-tom-spee-00, Temporally-ordered routing algorithm (TORA) version 1: Functional specification[S].
- [5] Jinyang Li, Charles Blake. Capacity of Ad Hoc wireless networks[A]. Proceedings of ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBIHOC)[C]. Rome, Italy: ACM Press, 2001. 61 – 69.
- [6] Saito M, Aida H, Tobe Y, Tokuda H, A proximity-based dynamic path shortening scheme for ubiquitous ad hoc networks [A]. Proceedings of 24th International Conference on Distributed Computing Systems[C]. Tokyo, Japan: IEEE Computer Society, 2004. 390 – 397.
- [7] C Gui, P Mohapatra. Short: self-healing and optimizing routing techniques for mobile ad hoc networks[A]. Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing [C]. Annapolis, Maryland, USA: ACM Press, 2003. 279 – 290.
- [8] Venkata C Giruka, Mukesh Singhal, Siva Prasad Yarravarapu. A path compression technique for on-demand ad-hoc routing protocols[A]. 2004 IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems[C]. Fort Lauderdale, Florida, USA: IEEE Computer Society, 2004. 144 – 153.
- [9] 徐佳, 李陟, 李千目, 等. Ad Hoc 网络中一种自适应分簇路由过渡协议[J]. 通信学报, 2008, 29(3): 54 – 62.
XU Jia, LI Zhi, LI Qianmu, et al. An adaptive clustering routing transition protocol in ad hoc networks[J]. Journal on Communications, 2008, 29(3): 54 – 62. (in Chinese)
- [10] 徐佳, 李陟, 周曜, 等. 移动 Ad Hoc 网络路径压缩技术研究与分析[J]. 计算机科学, 2008, 35(5): 73 – 77.
XU Jia, LI Zhi, ZHOU Yao, et al. Research and prospect of path compression techniques in mobile Ad Hoc networks[J]. Computer Science, 2008, 35(5): 73 – 77. (in Chinese)
- [11] 徐佳, 李陟, 周曜, 等. Ad hoc 按需路由中路径压缩技术的稳定性组件[J]. 通信学报, 2009, 30(3): 104 – 111.
XU Jia, LI Zhi, ZHOU Yao, et al. Stability module of path compression for on-demand ad-hoc routing [J]. Journal on Communications, 2009, 30(3): 104 – 111. (in Chinese)

作者简介:



徐 佳 男, 1980 年生于江苏常州, 南京邮电大学讲师, 主要研究领域为无线自组织网络路由技术.

E-mail: xujia@njupt.edu.cn

周 曜 男, 1975 年生于安徽淮南, 南京理工大博士研究生, 主要研究方向为信息安全, 无线自组织网络.

李千目 男, 1979 年生于江苏南京, 南京理工大学副教授, 主要研究领域为网络故障诊断, 信息安全.