

# 移动 Ad Hoc 网络路径压缩技术研究与分析<sup>\*</sup>

徐佳 李陟 周曜 刘凤玉

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)

**摘要** 在移动 Ad Hoc 网络中,按需路由协议因其开销小,适应动态网络和良好的可扩展性成为目前研究的主流路由协议,但按需路由协议只在路由发现阶段负责寻找最短(或接近最短)的路径,此后便只保证路由的畅通,并不负责路径的优化。移动 Ad Hoc 网络的路径压缩技术能在建立路由的基础上有效优化路径。本文总结了当前典型的路径压缩技术,并比较和分析了这些算法的特点和适用情况。最后结合该领域当前研究现状,指出路径压缩技术未来的研究重点。

**关键词** 移动 Ad Hoc 网络,路径压缩技术,缩减感知,混杂模式

## Research and Prospect of Path Compression Techniques in Mobile Ad Hoc Networks

XU Jia LI Zhi ZHOU Yao LIU Feng-yu

(Institute of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract** On-demand routing protocols have become the mainstream in area of routing protocol research for mobile Ad Hoc networks in virtue of good efficiency, adaptability and expansibility with dynamic networks. But on-demand routing protocols only find shortest path (or best effort for shortest path) in course of route discovery component. They don't answer for optimizing and healing paths to reduce the number of hops. Path compression techniques can optimize the routes which have been established by on-demand routing protocols. As viewed from these techniques recent representative path compression techniques are presented, and their characteristics and application areas are compared. Finally, the future research issues in this area are pointed out.

**Keywords** MANET, Path compression techniques, Shortening apperception, Promiscuous mode

## 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它基础设施支持的无中心网络<sup>[1]</sup>。MANET 网络的这一特性使其在军事、抢险救灾、商业、教育等无基础设施支持的环境中的应用充满光明前景。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。

Ad Hoc 路由协议应能适应网络拓扑的动态变化,并且不会导致较大的开销。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。表驱动路由协议的路由发现策略源于传统的路由协议,其利用节点之间周期性的交换路由信息,使得每个节点都维护一张到其它节点的相对稳定的最新路由表。由于形成具有完整路由信息的路由表和路由信息维护的开销很大,这类路由协议不适用于大规模网络或数据发送频率较低的网络。按需驱动路由协议的主要思想是只有当有数据要发送时才发起路由查找过程,且不需要周期性地路由信息广播,有效地减少了占用的网络资源,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<sup>[2]</sup>, DSR<sup>[3]</sup>, TORA<sup>[4]</sup>

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,被证实的有:(1)更多的带宽消耗;(2)更多的节点能量消耗;(3)增加端到端时延;(4)增加路由请求开销(路由请求的次数增加);(5)降低包发送率;(6)降低路由生存时间(路径被破坏的概率增加);(7)增加自冲突现象<sup>[5]</sup>发生的概率。

路径压缩技术能有效解决以上问题。路径压缩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<sup>[6-8]</sup>已经证明路径压缩技术是降低资源消耗和提高网络性能的有效手段。

## 2 Ad Hoc 路径压缩技术概述

### 2.1 Ad Hoc 路径压缩问题描述

在某一时机,路径压缩技术将尽可能地寻找到最优的路径以优化由路由发现机制产生的原始路径。图 1(a)所示的

<sup>\*</sup>受某部委“十一五”重点项目“无线自组网自适应架构及安全性研究”资助。徐佳 博士研究生,主要研究领域为无线网络路由技术;刘凤玉 教授,博士生导师,主要研究方向为网络性能和信息安全。

是一条从源节点 A 到目的节点 I 的路径,该路径是由路由发现过程产生的,它应该是一条最短路径或者很接近最短路径。一个从 A 到 I 的分组要经过 8 跳。由于节点的移动,在经过一段时间后该路径可能转变成图 1(b)所示的形状,即路径之外的节点 J 进入到节点 A 的传输范围内,原路径上的节点 E 在节点 J 的传输范围内,原路径上的节点 F, H 分别在彼此的传输范围内。现在理想的路径将如图 1(c)所示,该路径只需 5 跳就能到达目的节点。然而,一般的路由协议是通过对下一跳的有效性来判断路径是否可用的,只要当前路径仍然有效,就不会更新路由信息(即使存在更加优化的路径)。路径压缩就是针对这种情况而提出的路径优化技术。

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 2(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 2(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  $k > 3$  的时候,压缩算法将变得复杂从而导致不稳定性和额外代价,目前的路径压缩技术一般只考虑  $(n, 1)$  和  $(n, 2)$  这两类缩减。不难发现,所有的  $(n, 1)$  缩减实际上是由于原始路径上的两个原本不在一跳范围内的节点彼此进入对方的传输区域造成的;所有的  $(n, 2)$  缩减实际上是由于原始路径之外的某个节点进入到某个位置连接了路径上距离三跳以上的两个节点造成的。一些路径压缩算法<sup>[7,8]</sup>正是利用这个特点进行设计的。

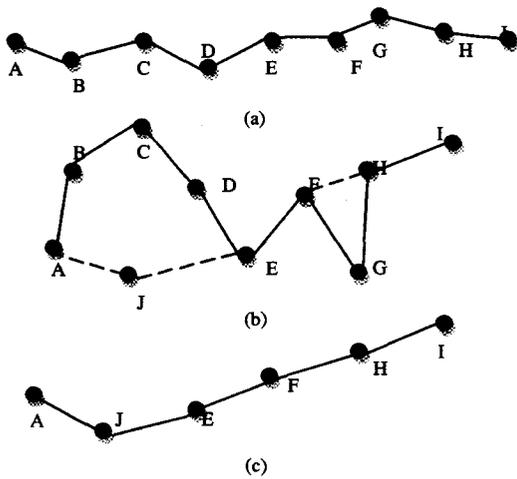


图 1 路径压缩实例

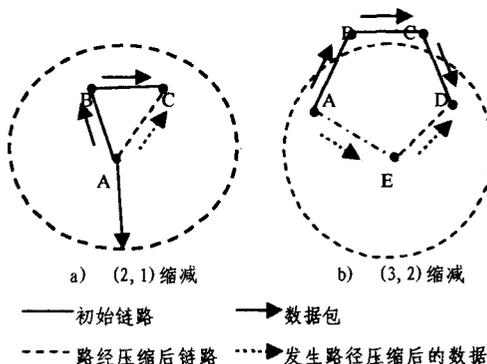


图 2 基本的路径压缩形式

## 2.2 Ad Hoc 路径压缩模型

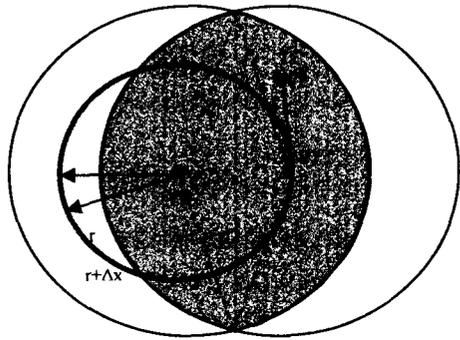


图 3 三点邻接的概率

目前为止,路径压缩的理论分析和建模方面的工作仍然开展得不多。这主要是因为移动 Ad Hoc 网络的移动特性使得对其的建模相对困难。文献[7]提出了一种针对静态环境的路径压缩建模方法。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。假定路径上的节点为  $v_0, v_1 \dots v_{m+1}$ ,则把  $v_0$  和  $v_{m+1}$  相邻的概率记作  $P[n]$ 。那么所有缩减发生的概率可以转化为概率  $P[n]$ ,如  $(2, 1)$  缩减的概率为  $P[1]$ ,  $(3, 2)$  缩减的概率为  $p[3]$ 。

如图 3 所示,为求得概率  $P[1]$ ,假设  $P_1$  为节点  $v_1$  落在带状阴影部分内的概率  $(r \leq |v_0 v_1| \leq r + \Delta r)$  的概率,  $P_2$  为  $v_2$  落在节点  $v_0$  和  $v_1$  公共传输范围内的概率,每个节点的传输距离均为 1。则有:

$$P_1 = \text{带状阴影部分面积} / \text{单位圆的面积} \quad (1)$$

$$P_2 = v_0 \text{ 和 } v_1 \text{ 公共传输范围面积} / \text{单位圆的面积} \quad (2)$$

$$P[1] = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \sum_{r=0}^{1-\Delta r} P_2 \cdot P_1 \quad (3)$$

$$= \int_0^1 \frac{2(\arccos \frac{r}{2} - \frac{r}{2} \sqrt{1 - \frac{r^2}{4}})}{\pi} \cdot 2r dr \quad (4)$$

$$= 1 - \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \approx 58.6\% \quad (5)$$

## 2.3 研究思路

路径压缩技术的主要思路是通过某种手段获取更优路径,通过修改相应节点的路由表项来达到压缩路径的目的。设计路径压缩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。从支持的路由协议类型来分,主要分为应用于源路由的路径压缩算法和应用于分布式路由的路径压缩算法。其中支持源路由协议的路径压缩技术必须将路由的更新信息送达到源节点。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压缩算法和基于侦听的路径压缩算法。基于控制消息的路径压缩算法需要通过额外的控制消息来发现压缩,基于侦听的路径压缩算法则通过混杂接收模式通过分析附加在数据包头部的信息来感知压缩。下面对几种典型的路径压缩算法做介绍。

## 3 Ad Hoc 路径压缩算法

### 3.1 基于源路由的路径压缩算法

基于源路由的路径压缩算法目前研究得不多,主要原因是建立在源路由上的路径压缩算法必须将路由的更新信息送达到源节点,这将增加一些额外负担。目前仅有的针对源路

由的路径压缩技术是 DSR 协议<sup>[3]</sup>中的自动路由缩减 ARS (Automatic Route Shortening)。网络中的所有节点通过混杂模式侦听数据包,如果该节点不是当前数据包所要到达的下一跳节点但却是数据包中源路由序列中以后要经过的节点,说明发现了一次 $(n, 1)$ 缩减,因为从接收到数据的上游节点到该节点之间的中间节点的存在是没有意义的。如图 4 所示,假定一个由节点 A 路由到节点 E 的数据包被节点 D 侦听到,那么节点 D 就发现到了一次 $(2, 1)$ 缩减,原路径 A-B-C-D-E 可以缩减为 A-B-D-E。此时 D 就可以根据某种策略决定是否向源节点 A 发送无条件路由应答(gratuitous Route Reply),这种策略可以侦听到数据的强度或是信噪比的一个阈值。当源节点 A 收到无条件路由应答后就改变为缩减后的路径。

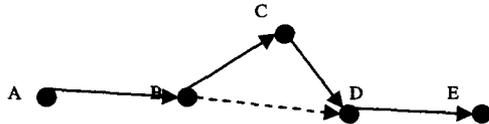


图 4 自动路由缩减实例

由于无条件路由应答必须发送到源节点才能改变路径,在这期间节点 D 可能多次发现同样的缩减,即产生对同一条路径的多次缩减,从而增加不必要的负担。自动路由缩减在每个节点中产生一个条件路由应答表,以减少这种情况发生的概率。无条件路由应答表中的每个表项都存在本地地址、被侦听数据包的上游节点地址以及该表项的生存时间这三项。该节点在触发无条件路由应答之前,首先查询无条件路由应答表,假如存在同样的缩减信息就不发送无条件路由应答,否则在无条件路由应答表中产生一个新的表项以记录本次缩减信息。

自动路由缩减是最早被提出的路径压缩技术,是一种基于侦听的源路由压缩技术。自动路由缩减也存在一些局限性。由于是建立在源路由之上的,其路由更新信息的转发代价较高,另外,路径缩减只能在原始路径上的节点之间进行,即只能进行 $(n, 1)$ 缩减。

### 3.2 基于控制消息的路径压缩算法

基于控制消息的路径压缩算法通过专用控制报文进行路径缩减过程。典型的算法是 Masato Saito 提出的 DPS<sup>[6]</sup>(Dynamic Path Shortening)。DPS 引入了亲和区的概念,利用平滑信噪比(SSNR)衡量节点的相对位置和链路质量。平滑信噪比的计算方法如下:

$$ssnr = (1 - \alpha) * old\_ssnr + \alpha * cur\_ssnr \quad (6)$$

其中,  $cur\_ssnr$  是当前的实时信噪比,  $old\_ssnr$  是先前计算的平滑信噪比。使用滤波器计算平滑信噪比,其作用是防止实时信噪比的剧烈波动,导致缩减算法不稳定。

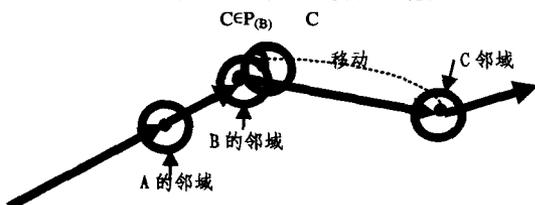


图 5 DPS 路径缩减实例

DPS 通过原始路径上传的数据包感知节点之间的相对位置,避免了使用周期性的控制报文来感知节点位置。如果一个原始路径上的节点进入到另一个原始路径上节点的亲

和区(Proximity)就和上游两跳节点进行基于握手机制的消息传递,进行相应的缩减。

如图 5 所示,当原始路径上的节点 C 进入到节点原始路径 B,如果能进行缩减就发送相应的更新消息 DPS\_REQ 报文通知上游第二跳节点 A。如果节点 A 成功接收到 DPS\_REQ,则返回一个缩减应答 DPS\_REP 给节点 C(该应答信息在数据包中捎带),C 节点在得到确认后发送路由更新消息 DPS\_RREQ 到源节点 A,完成一次路径缩减。这种类似于握手机制的路径缩减过程如图 6 所示。

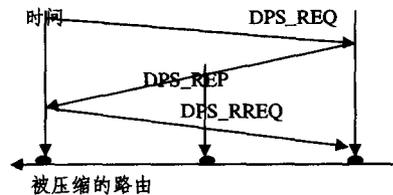


图 6 DPS 控制报文

DPS 在包发送率和端到端传输时延等方面比 DSR 和 AODV 有明显优势。DPS 通过接收数据包的平滑信噪比感知节点的相对位置和链路质量,这也限制了 DPS 只能进行 $(n, 1)$ 缩减。另外,DPS 进行一次压缩需要三次消息传递,相比其他的方案,代价高昂。算法中的两个参数:平滑信噪比极限和权重对缩减效果影响很大。

### 3.3 基于侦听的路径压缩算法

基于侦听的路径压缩算法通过混杂模式监听数据包,根据包头的特定信息感知节点间的相对位置以决定是否进行压缩。此类算法主要有 SHORT<sup>[7]</sup>(Self-Healing and Optimizing Routing Techniques)和 PCA<sup>[8]</sup>(Path Compression Algorithm)。

#### 3.3.1 SHORT 算法

SHORT 算法在每个节点中维护一个跳数压缩数组,数组中每个元素存放一个四元组 $(SA, DA, HC, NA)$ ,其中 SA 是源节点地址,DA 是目的节点地址,HC 是到源节点的跳数,NA 是指向源节点的下一跳地址。SHORT 在 IP 包头中增加了 HC 这一项,其余三项在数据包头部中已经存在。SHORT 以 $\langle SA, DA \rangle$ 对来唯一区别一条路径。数组中的每一个元素都有一个终止时间,在那之后该元素就无效了。如果数组被有效项所填满,采用最近使用方针(LRU)新的项可取代旧的项。具体算法如下:

#### SHORT 算法

当一个节点接收到或侦听到一个数据包

BEGIN

1. 如果节点  $i$  是最终的目的节点,接收这个包。GOTO END;
2. (假设  $p$  属于 $\langle SA_k, DA_k \rangle$ 流。)将 $\langle SA_k, DA_k \rangle$ 和所有压缩数组中的有效项进行比较。
3. 如果没有匹配的项,把 $\langle SA_k, DA_k, HC_k, NA_k \rangle$ 存储在压缩数组中;
4. 如果包所要传送的下一跳是  $i$ ,那么转发这个包使其继续传递下去。GOTO END;
5. (假定它与一个表项 $\langle SA_k, DA_k, HC_j, NA_j \rangle$ 匹配)如果 $(HC_k - HC_j > 2)$ ,一个剪短就被找到,节点  $i$  做如下的动作:

- 5.1 发送一个消息给  $NA_j$  以更新路由表,使目的节点

$DA_k$  的下一跳地址被修改为节点  $i$  的地址;

5.2 修改它的路由表,使得目的节点  $DA_k$  的下一跳地址变为  $NA_k$ ;

5.3 修改压缩数组,删除符合  $\langle SA_k, DA_k \rangle$  的表项;

END

SHORT 提出了在移动 Ad Hoc 网络中进行路径压缩时遇到的两个问题:短暂缩减问题和多次缩减问题。短暂缩减是指当路径压缩算法会进行相应缩减后,处于缩减位置的节点快速离开缩减位置,导致路径在短时间内被破坏,从而迫使重新启动路由发现过程。多次缩减是指在同一时刻有多个节点处于可缩减位置,这些节点在短时间内连续向某节点发送路由更新信息,该节点将频繁地更新路由表,从而导致不稳定。

SHORT 在路径优化、包发送率和路由负载等性能指标上相比 AODV 和 DSR 有显著提高,但仍然存在一些特殊的情况需要解决:

- (1)不能缩减包含源节点的  $(2,1)$  缩减;
- (2)不能缩减包含目的节点的任何缩减;
- (3)短暂缩减和多次缩减问题没有得到有效解决。

### 3.3.2 PCA 算法

PCA<sup>[8]</sup> (Path Compression Algorithm) 采用类似于 SHORT 的缩减方法,网络中每个节点均工作在混杂模式下,节点侦听每个在其传输范围内的数据包。PCA 将路径缩减分为两类:活动路径(原始路径)上的缩减和非活动路径上的缩减,实际上就是分为  $(n,1)$  缩减和  $(n,2)$  缩减。在非活动路径上的节点中存在一个压缩表,用以记录临时缩减信息。在发生非活动路径缩减时,非活动路径上的节点将发送一个更新消息给响应节点。PCA 的数据结构如图 7 所示。

Broadcast ID	PktType	NodeAddr
SrcHopCount	SrcAddr	Broadcast ID
DestHopCount	Broadcast ID	HopCount
FromAddr	HopCount	NextHop
	NextHop	

(a) IP 报文头 (b) 更新包 (c) 压缩表项

图 7 用于路径缩减算法的数据结构

PCA 在数据包 IP 头中设置路径缩减信息,使用到的信息可以描述成一个五元组  $\langle SA_i, DA_i, SrcHC_i, DestHC_i, Nexthop_i \rangle$ ,其中  $SA_i$  为源节点地址, $DA_i$  为目的地址, $SrcHC_i$  为上游节点到源节点的跳数, $DestHC_i$  为上游节点到目的节点的跳数, $Nexthop_i$  为下一跳节点地址。这个五元组在进行缩减时被分为两个部分  $\langle SA_i, SrcHC_i, Nexthop_i \rangle$  和  $\langle DA_i, DestHC_i, Nexthop_i \rangle$  分别用作面向源端和目的端的缩减。PCA 是通过压缩表中面向源端和目的端的跳数和与侦听到的最新数据包的跳数和的差值来发现一个  $(n,2)$  缩减的。具体算法如下:

#### PCA 算法

```
Data: node  $j \langle SA_j, DA_j, SrcHC_j, DestHC_j, NA_j \rangle$ 
Initialize  $SH=255$  and  $DH=255$ ;
If  $\langle SA_j \in RT \text{ of } j, say \langle SA_j, SrcHC_j, SNA_j \rangle \text{ then}$ 
  If  $\langle SrcHC_i + 1 < SrcHC_j \rangle$  then
    Replace  $\langle SA_j, SrcHC_j, SNA_j \rangle$ 
    with  $\langle SA_i, SrcHC_i + 1, NA_i \rangle$ ;
  End
Else
  If  $\langle SA_i \in CT_j, say \langle SA_j, SrcHC_j, SNA_j \rangle \rangle$  then
    If  $\langle SrcHC_i - SrcHC_j \rangle < 0$  then
      Replace  $\langle SA_j, SrcHC_j, SNA_j \rangle$ 
      with  $\langle SA_i, SrcHC_i, NA_i \rangle$   $SH=SrcHC_i$ ;
    Else
```

```
       $SH=SrcHC_j$ ;
    End
  Else
    Insert  $\langle SA_i, SrcHC_i, NA_i \rangle$  into  $CT$ ;
     $SH=SrcHC_i$ ;
  End
End
If  $\langle DA_i \in RT \text{ of } j, say \langle DA_j, destHC_j, NA_j \rangle \rangle$  then
  If  $\langle DestHC_i + 1 < DestHC_j \rangle$  then
    Replace  $\langle DA_j, destHC_j, NA_j \rangle$  with  $\langle DA_i, destHC_i, NA_i \rangle$ ;
  End
   $DH=DestHC_i$ ;
End
Else
  If  $\langle DA_i \in CT, say \langle DA_j, destHC_j, NA_j \rangle \rangle$  then
    If  $\langle DestHC_i - DestHC_j \rangle < 0$  then
      Replace  $\langle DA_j, destHC_j, NA_j \rangle$  with
       $\langle DA_i, destHC_i, NA_i \rangle$ ;  $DH=DestHC_i$ ;
    else
       $DH=DsetHC_j$ ;
    End
  Else
    Insert  $\langle DA_i, destHC_i, NA_i \rangle$  into  $CT$ ;
     $DH=DsetHC_i$ ;
  End
End
/* only for  $(N,2)$  path compression */;
If  $\langle SrcHC_i + DestHC_i \rangle - \langle SH + DH \rangle > 2$  then
  Send update packet to  $SNA_j$ ;
end
```

PCA 在平均路由跳数、端到端时延和路由负载等性能方面比 AODV 和 SHORT 都有提高。这可能源于 PCA 的一些优点:(1)解决了 SHORT 中一些难以处理的特殊情况,能成功处理包含源节点或目的节点的任何缩减;能成功缩减“之”字型路径;能成功缩减多源到单目的的路由和单源。(2)只在非活动路径上的节点中存在压缩表,节约了存储空间。(3)只有  $(n,2)$  缩减才会发送路由更新信息,减轻了网络负担,到多目的的路径(组播通信)。(4)能在一定程度上进行双向缩减,提高了缩减效率。

PCA 在实现上采用了一些策略以保证算法的正确性和稳定性:(1)以广播序列号作为识别路径的标识,以避免在不同路径上的缩减所造成的混乱。(2)引入辅助路由表以期解决短暂压缩问题。(3)为避免环路产生,PCA 禁止从一跳上游节点获得到目的端的缩减信息,同样也禁止从一跳下游节点获得到源端的缩减信息。

PCA 也同样存在以下一些问题:(1)引入辅助路由表将占用更多的存储资源,而且辅助路由表项的生存期也没有明确。(2)广播序列号在数据包发送过程中难以获取,唯一的办法是在每个节点中增加一个广播序列号列表,但这不仅会增加资源占用,也会产生维护广播序列号列表的复杂性。

## 4 比较与分析

表 1 综合对比了上述四种路径压缩技术各自的应用场合和特点。从表 1 中可以看出,现有的路径压缩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。下面总结了现有路径压缩技术存在的一些不足:

(1)缺乏必要的理论和合理的动态缩减模型。目前路径缩减技术仅仅是提出一种解决方案,而没有从理论上证明缩减的可行性、必要性和正确性。这和动态网络环境下建模的复杂性有关。构建一个合理的压缩模型,并给出必要的推理和证明是整个路径缩减技术的基础。

(2)需进一步向双向缩减迈进。支持双向缩减能提高缩减效率,减轻网络负载。目前大部分算法不支持双向缩减,而 PCA 也仅仅是支持双向  $(n,1)$  缩减。

(3)识别路径问题。路径缩减要求对同一条路径进行缩减,在目的节点地址相同的不同路径之间进行缩减将会引起

路由表混乱。目前只有 PCA 考虑了识别路径问题,但使用广播序列号却不是一个完美的解决方案。对于分布式路由协议而言,如何识别一条路径是一个困难的问题。

(4)多次缩减问题。在发生路径缩减的时候,如果有多个节点位于可缩减的位置,那么就有可能同一个节点在很短的时间内收到多个缩减请求。虽然有一些算法采用了一些方法缓解这一问题,如建立无条件路由应答表和设置路由稳定期,但没有给出科学依据,其效果也没有体现出来。

(5)短暂缩减问题。在发生路径缩减的时候,只要有一个节点位于可缩减的位置,就进行路径缩减。但是如果该节点只在这个位置的时间很短,那么压缩后的路径很快就会被破坏。现有的大部分路径压缩技术没有充分考虑这个问题。事实上没有必要一发现缩减就马上更新路由表。

(6)缩减效果和链路质量。现有的路径压缩技术都只从一个方面去考虑,而没有综合考虑缩减效果和链路质量的平衡。

表 1 Ad Hoc 典型路径压缩技术对比

压缩技术	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

**结束语** 本文系统阐述了目前移动 Ad Hoc 网络中的路径压缩技术,分析、比较了各种算法的应用场合及特点。总体而言,对移动 Ad Hoc 网络中路径压缩技术的研究尚不充分,还有一些问题尚未解决。我们认为,可以从以下几个角度进一步完善移动 Ad Hoc 网络中的路径压缩技术。

(1)考虑更加合理、科学的路径缩减模型。目前唯一可参考的模型是文献[7]中提出的静态模型。这种模型只能求出(2,1)缩减发生的概率,其他的情况只能通过随机实验产生结果,并且该方法除了需建立在上述条件之外,还假定下一跳节点产生的方向可以是任意的。在实际环境下,下一跳节点的方向将以较高的概率指向目的节点的方向。考虑到上述模型的缺陷,可以构建基于动态环境的路径缩减模型,将节点的移动速度、节点间的距离、节点密度作为模型参数,分析路径缩减的可行性、必要性及正确性,计算缩减的概率和频率。

(2)为避免短暂缩减带来的路由不稳定问题,考虑一种保守缩减策略。由于移动 Ad Hoc 网络无法获取网络的全局信息,节点的移动速度和节点间的距离也不可知。这有可能造成短暂缩减问题。保守缩减策略使得路径压缩算法发现缩减后并不立即进行路由更新,而是在一个周期内连续检测到缩减才进行路由更新。这样可以间接获得节点的移动性,在此基础上再决定是否更新路由。

(3)缩减效果和链路质量的平衡。路径压缩的目的是优化路由性能,跳数和链路质量都是重要的因素,优秀的路径压缩技术应当在保证链路质量的前提下尽可能多地发现缩减。这就要求在设计路径压缩算法时,应考虑以下两点:一是能灵敏地感知缩减,尽可能使得路径长度最短。二是保证一定的链路质量,使得缩减后的路径拥有较高的质量。当然,为追求链路质量可能会放弃一些缩减,这需要两者的平衡。

除此以外,在今后的研究中还需要探索其它类型路径缩

减的方法,如(n,k)缩减( $2 < k < n$ )。支持 QoS 是移动 Ad Hoc 网络发展的一个趋势,如何在满足 QoS 的前提下进行路径缩减也是一个很有挑战性的课题。

## 参考文献

- [1] Yi Yunjung, Gerla M, Kwon T J. Efficient Flooding in Ad Hoc Networks using On-Demand (Passive) Cluster Formation//Proceedings of the Second Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-hoc-Net 2003)
- [2] Perkins C, Belding-Royer E. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. IETF RFC3561, July 2003
- [3] Johnson D B, Maltz D A, Hu Y-C. The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR) draft-ietf-manet-dsr-10, July 2004
- [4] Park V D, Corson M S. Temporally-ordered routing algorithm (TORA) version 1 functional specification[s]. [S. 1.]; Internet Engineering Task Force, 2004
- [5] Li Jinyang, Blake C, Couto D S J D, et al. Capacity of Ad Hoc Wireless Networks//Proceedings of ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBIHOC). 2001
- [6] Saito M, Aida H, Tobe Y, et al. A proximity-based dynamic path shortening scheme for ubiquitous ad hoc networks Distributed Computing Systems, 2004//Proceedings. 24th International Conference, 2004; 390-397
- [7] Gui C, Mohapatra P. Short: self-healing and optimizing routing techniques for mobile ad hoc networks//Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing. ACM Press, 2003; 279-290
- [8] Giruka V C, Singhal M, Yarravarapu S P. A path compression technique for on-demand ad-hoc routing protocols Mobile Ad-hoc and Sensor Systems//2004 IEEE International Conference. Oct. 2004; 144 - 153