

## 移动自组网中一种基于簇的多路径路由算法\*

安辉耀<sup>1,2+</sup>, 卢锡城<sup>2</sup>, 彭伟<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(北京大学 信息科学与技术学院/深圳研究生院,北京 100871)

<sup>2</sup>(国防科学技术大学 计算机学院,湖南 长沙 410073)

### A Cluster-Based Multipath Routing Algorithm in Mobile Ad Hoc Networks

AN Hui-Yao<sup>1,2+</sup>, LU Xi-Cheng<sup>2</sup>, PENG Wei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(School of Electronic Engineering and Computer Science/Shenzhen Graduate School, Peking University, Beijing 100871, China)

<sup>2</sup>(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-755-26032100, Fax: +86-755-26032100, E-mail: Anthony\_cs@21cn.com

An HY, Lu XC, Peng W. A cluster-based multipath routing algorithm in mobile ad hoc networks. *Journal of Software*, 2007,18(4):987-995. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/987.htm>

**Abstract:** This paper proposes a cluster-based multi-path routing in MANET (CBMRP). It distributes traffic among diverse multiple paths to avoid congestion, optimize bandwidth used and improve the sharing rate of channel. It uses clustering's hierarchical structure diverse to decrease routing control overhead and improve the networks scalability. This algorithm is implemented on the OPNET environment, and the results show that the algorithm can balance the load of the network and deal with the change of the network topology effectively, and also improve the reliability, throughput and stability of the network efficiently.

**Key words:** clustering; multipath routing; mobile ad hoc; QoS (quality of service)

**摘要:** 提出了一种基于分簇的多路径路由算法(cluster-based multi-path routing in MANET,简称 CBMRP),利用多路径并行传输流量实现拥塞避免、优化网络带宽的应用、提高共享信道的利用率;利用基于簇的层次结构能够减少路由维护的代价并提高应用的可扩展性.在 OPNET 模拟器上实现了算法,结果表明,该算法不仅能够有效地平衡网络负载,而且能够动态处理网络拓扑变化,提高可靠性,并可以显著地提高网络的吞吐量和稳定性.

**关键词:** 分簇;多路径路由;移动自主网;服务质量

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

MANET(mobile ad hoc networks)是最初由美国国防部发起的研究,称为移动分组无线网络(mobile packet radio network).当时,为了军事战术操作,人们对于路由和媒体访问控制问题做了大量工作.然而,由于移动结点固有的局限性,例如能量和处理能力有限等,限制了 MANET 的应用和研究.近年来,由于芯片技术的发展,设备

---

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.90104001, 60433040 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant Nos.2005CB321801, 2003CB314802 (国家重大基础研究发展规划(973)); the China Postdoctoral Science Foundation of China under Grant No.20060400344 (中国博士后科研基金); the Science Foundation of Shenzhen of China (深圳市科技基金)

Received 2004-11-07; Accepted 2006-04-26

的处理能力不断提高,能量消耗逐渐降低,且具有足够的资源来处理路由和通信任务.因此,人们对于不依靠固定结构(诸如基站)的无线设备之间相互通信的问题表现出了越来越强烈的兴趣.

相对于有线网络,在无线网络中实现通信具有较大的挑战性.有线网络和无线网络之间有明显的区别,有线网络具有相对较高的带宽,拓扑结构比较稳定;相反地,无线网络具有结点移动性高,带宽资源有限等特点.而且,由于连接中断率高导致网络分裂机率高.因此,由于传统的 Bellman-Ford 路由算法开销太大,收敛时间太长,不适合 MANET 网络.移动计算机的无线传输范围有限,MANET 中的信息必须通过多跳来转发.查找路径或者路由对于如何支持多跳无线传输来说是一个至关重要的机制.然而,结点的移动性和有限的通信资源使得在 MANET 中查找路由十分困难.移动性导致拓扑改变,可能中断现有的路径.因此,需要一个路由协议以期快速适应拓扑改变和有效搜索新的路径的目的.而另一方面,MANET 中有限的能量和带宽资源使得实现快速的适应性十分困难.最重要的是,MANET 中的资源约束需要路由协议在移动主机之间公平地分布路由任务.然而,大多数提出的 MANET 路由协议<sup>[1-3]</sup>并未考虑公平性.它们倾向于把重的负载分布到源-目的对的最短路径的主机上.结果是,超重负载的主机会迅速耗尽电源,这将导致网络分离,应用会话失败.因此,必须提出一些新的协议以解决这些问题.

MANET 的原始结构是平面的,即所有结点都是对等的,都肩负终端与路由器两项功能,只存在性能上的差异,没有功能上的不同.这种平面结构的优点之一是源结点与目的结点之间存在多条路径,因而可以通过多条路径来传送业务流,减少拥塞,并消除可能的“瓶颈”.因此,多路径路由是用多条好的路径来代替单条最好的路径以用于分布流量、减轻拥塞.多路径路由的目标是在源-目的对之间建立多条路径,以求更多的主机来承担路由任务.

但是,这种平面式结构在结点数目增多时,路由开销很大,因此可扩展性较差.采用适当的分簇算法构造分层的拓扑结构应该是解决这些问题的一个比较好的方法.一个适当的移动分簇算法能够很好地支持移动性,维持网络结构的稳定性和鲁棒性.为了支持 MANET 网络的多跳性和移动性,在网络拓扑改变后,通过分簇管理能够有效地实现快速配置、动态重构网络.相对于其他协议,分簇管理有 5 个突出优点:首先,它有效地利用多信道大幅度提高了系统容量,优化了网络带宽的应用,提高了共享信道的利用率<sup>[4-7]</sup>;第二,能够有效地减少交换路由控制信息的开销,强化结点管理<sup>[5-8]</sup>;第三,容易实现局部网络同步<sup>[5,7]</sup>;第四,对于多媒体服务提供有效的 QoS 服务<sup>[6,7,9]</sup>;最后,支持大规模的无线网络,具有可扩展性<sup>[8,10]</sup>.

因此,本文提出基于簇的多路径路由算法,利用分簇的层次结构管理来有效搜索多路径,利用多路径并行传输流量.本文第 1 节介绍相关研究,第 2 节详细介绍 CBMRP(cluster-based multi-path routing in MANET)算法.第 3 节是算法模拟与性能评价.最后是结论和进一步的研究工作.

## 1 相关研究

多路径路由的许多优点在有线网络中已经进行了深入的研究<sup>[11-16]</sup>,但 MANET 中的多路径路由技术研究还处于初级阶段.某些 MANET 协议,例如 TORA(temporally-ordered routing algorithm)<sup>[11]</sup>,DSR(dynamic source routing)<sup>[3]</sup>和 SRL(supernode-based reverse labeling algorithm)<sup>[17]</sup>,使用多条路径,然而这些协议的多路径是用作备份或者辅助方法.如何有效搜索多条路径、如何选择适当的多路径以及如何使用它们,有待于更深入地进行研究.当前,也有不少 MANET 多路径路由方案被提了出来<sup>[2,16,18-26]</sup>.

文献[2]中提出的按需多路径路由机制是 DSR 的多路径的扩展,它维护备用路径,当主路径失败时就可以利用上它们;文献[2]论证了利用多路径路由的中断率比单路径路由相对少得多,能够更长时间地保持正确的端-端传输.换句话说,如果结点能够保持到目标的多条路径,则启动路径发现来搜索新路径的频率比在单路径路由中启动的频率要低得多.文献[2]首次深入研究 MANET 中的多路径的性能.然而,它们没有对网络负载平衡的多路径路由的性能提高进行研究.它们的性能研究是基于理论分析,因此没有考虑结点任意移动和不可靠的无线传输的影响.文献[19]中提出的算法 AODV-BR(backup routing in ad hoc network)是一个 AODV(ad hoc on demand distance vector routing)<sup>[27]</sup>的扩展,它维护多条路径,然而其流量分布不超过 1 条路径,只是在主路径失败

时才利用.文献[20]中提出的多路径源路由协议MSR(multipath source routing),提出一个基于启发的加权轮询多路径调度机制来分布负载,但没有提供其性能分析模型.文献[21]中探讨了移动 Ad hoc 网络中备用路径对于负载均衡的直接影响和端-端延时的问题,证明多路径路由能够平衡网络负载.他们还提出了一种多样性的注入方法来发现非交叉路径,比 DSR 查找的路径更多.然而,他们的工作是基于多信道的网络,在某些应用情况下并不可靠.文献[22]中提出的分裂多路径协议SMR(split multi-path routing),主要研究建立和维持最大化非交叉路径,负载被分布到每个会话的两条路径中.Tsirigos 和 Haas 对于在 MANET 网络中同时分布流量在多条路径中进行了一些研究工作,在文献[24]中提出了一个移动网络多路径结构及其分析模型,这个机制利用  $M$ -for- $N$  多样性编码机制,采用加扩展信息开销到每个报文的方法来解决网络固有的不可靠性.为了最小化报文丢失率,数据负载被分布到多条路径中以实现负载均衡,改进端-端延迟.文献[25]提出 MRP-LB(multi-path routing protocol with load balancing)算法,利用报文粒度的流量分布方法和负载均衡机制相结合来实现拥塞避免,通过调整传输能量到一个相应的水平来减少结点的干扰,这不仅可以通过增加空间重用来提高网络的能量,而且可以最小化能源消耗,于是提高了移动结点的生存时间,这对于资源有限的移动结点来说是十分重要的.文献[26]提出用协作报文高速缓存及最短多路径来实现减少报文丢失率和频繁的路由中断.

对多路径路由机制文献的研究发现,在将多路径路由技术应用到 MANET 方面仍有许多问题有待于解决:首先,在许多路由协议中,流量主要分布在主路径中,仅当这个路径中断时,流量才会转到备选路径中.很明显,采用这些机制并没有达到负载均衡的目的,也不能动态地处理 MANET 网络中的拓扑改变问题;其次,所有算法中都没有考虑由于 MANET 具有动态的拓扑、有限的带宽及采用电池供电等诸多特性而引起这种平面式结构在结点数目增多时的多路径的路由开销增大、可扩展性差的问题.显然,使用这些机制就会出现不可靠的问题.

本文采用适当的分簇算法构造分层的拓扑结构以试图解决这些问题.

## 2 基于簇的多路径路由

### 2.1 簇生成算法

为了更好地理解和描述,首先介绍一些算法所需的基本定义和符号.一个 MANET 可以被看作是一个简单有向图(无环和无多边), $G=(V,E)$ , $V$ 是非空结点集,代表网络结点集合; $E$ 是连接结点的边集,代表网络中结点间的链路集合.

**定义 1.** 在一个特定的 MANET 中, $G=(V,E)$ , $V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}$ ,结点  $v_i \in V$ ,其源结点集合、目标结点集合、源端邻居集合、目的端邻居集合、所有邻居集合分别由  $S_i=\{v_i \in V\}$ , $D_i=\{v_i \in V\}$ , $N_{S_i}=\{v_j | \langle v_j, v_i \rangle \in E, v_i \neq v_j\}$ , $N_{D_i}=\{v_j | \langle v_i, v_j \rangle \in E, v_i \neq v_j\}$ , $N_i=N_{S_i} \cup N_{D_i}$  来表示.

**定义 2.** 在一个特定的 MANET 中, $C_i=\{V_{ij}\}$ 代表簇、簇成员、簇首及簇首的相邻簇首集合,簇成员能听到的相邻簇首集合分别用  $V_{ij}$ , $CH_i$ , $N_{CH_i}$  和  $N'_{CH_i}$  来表示, $Id(v_i)$ 标识网络结点  $v_i$ , $Token(v_i)$ 标识  $v_i$  的令牌属性, $ChooseHead()$ 用于结点间选举簇首.

在 MANET 中,每个结点都具有唯一标识  $Id(v_i)$ ,可以基于结点的功能和资源对其进行赋值. $Token(v_i)$ 是结点是否具有成为簇首的资格属性,其取值为 1 或 0,一个结点拥有了令牌,就具备了成为簇首的候选资格. $ChooseHead()$ 是用于在结点间选举簇首的过程,以 OTF(owning token first,拥有令牌优先)和 MIF(minimum Id first,最小标识优先)为原则,即拥有令牌的结点率首先成为簇首;当有多个结点拥有令牌或都不拥有令牌时,标识最小的结点将成为簇首.

#### 2.1.1 簇的初始化

MANET 中每个结点  $v_i(v_i \in V)$ 进行标识及令牌赋值,构建各自的邻居集合  $N_{S_i}$ , $N_{D_i}$ , $N_i$ ,相邻结点间交互信息,利用  $ChooseHead()$ 选举簇首,实现簇的初始化.成为簇首的结点向所有邻居结点广播通告,对于尚未加入其他簇的结点获得通告以后,立即应答,宣布加入该簇.簇首获得应答以后,将该结点加入簇成员集合  $C_i=\{V_{ij}\}$ .初始化结束之后,簇内成员距离簇首均为 1 跳(这里无须像 CEDAR(core-extraction distributed ad hoc routing algorithm)那样进行复杂的核心理提取和能量消耗计算),一个成员结点只属于一个簇首结点,它的路由表记录其簇首结点的地

址,簇首结点则记录所有从结点的地址,簇首结点还有一个邻居结点表,记录其相邻的簇首结点.

### 2.1.2 簇的更新

所有结点采用分布式推进方法交换信息,簇成员保留其他能听到的簇首结点的 IP 地址.随着网络结点的移动,网络的拓扑也随之动态改变,这必将导致簇及簇成员的改变.为此,定义如下规则:每个结点规则地广播一个 HELLO 信息.簇成员结点把自己的 IP 地址加到 HELLO 信息中,簇首结点把所有成员的 IP 地址加入到 HELLO 信息中.当一个簇成员连接 3 次没有收到其簇首的 HELLO 信息时,就认为它们之间的连接中断了(或者以前的簇首结点被移走时).这时,该结点必须根据规则利用 *ChooseHead()*重新选举新的簇首;如果它不能找到现存的簇首,就将自己变成簇首.当一个新的结点加入到簇时,该结点也拥有令牌,利用 *ChooseHead()*,在新结点和原簇首结点中选取最终的管理者.如果前者胜出,则新簇产生;如果后者胜出,则原簇继续存在,只增加簇成员.

## 2.2 虚拟路由发现

$s$  表示源结点, $d$  表示目的结点( $D_i$  为以簇  $C_i$  的成员为目标的结点集, $S_i$  为以簇  $C_i$  的成员为源结点的集合),当  $s \in C_1$ ,源  $s$  试图建立到  $d$  的连接时,它向簇首  $CH_1$  发起一次路径请求 RREQ,路径需求信息包括如下域: {源地址  $s$ ,目的地址  $d$ ,会话 ID,路径 QoS 需求  $P_{lower}$ ,路径可靠性  $P$ ,虚拟路径 VR} (其中:虚拟路径为路径的 IP 地址序列;  $P_{lower}$  根据文献[16]中的模型获得).

路径发现过程如图 1 所示,详细说明如下:

4~6 行,表示源结点  $s$  与目的结点  $d$  为同一簇的成員的路径查找情况,它在簇内建立起多条从  $s$  到  $d$  的非交叉、无环路的路径;

8~13 行,表示源结点  $s$  与目的结点  $d$  不在同一簇的路径查找情况:

(1) 源结点  $s$  的簇首查找目标结点所在的簇,形成到目的的路由导向  $\{s, C_2, \dots, C_{m-1}, d\}$ ;

(2) 分阶段依路由导向的次序形成各簇内及簇间的多条不相交、非循环的链接,依次把各阶段的链接连接起来,形成多条从源结点  $s$  到目的结点  $d$  的非交叉、无环路的完整路径;

14~18 行是路径选择过程,它首先计算出前面形成的各候选路径的路径质量  $P$  (路径质量的计算有很多种方法,这里主要根据路径延时来评估路径质量.由于篇幅有限,这里不再详细介绍),然后,根据应用需求选择满足条件的路径 ( $P \geq P_{lower}$ ).

这时形成的路径只是可能的路径,称为虚拟路径.

```

1  Set VirtualRouteSet ∈ {}
2  Set CandidateRouteSet ∈ {}
3  int VirtualRouteDiscovery(id, CandidateRouteSet) {
4  if ( $s \in C_i$  and  $d \in C_i$ ) {
5      setup multiple path  $r_k = \{s, V_{i1}, V_{i2}, \dots, d\}$ ;
6      insert path  $r_k$  into CandidateRouteSet;
7      VirtualRouteSelection(id, VirtualRouteSet); }
8  if ( $s \in C_i$  and  $d \notin C_i$ ) {
9      search for a stable and optimal route as a directional guideline  $\{s, C_2, \dots, C_{n-1}, d\}$ ;
10     setup multiple path  $r_k = \{s, V_{i1}, \dots, d\}$ ;
11     insert path  $r_k$  into CandidateRouteSet;
12     VirtualRouteSelection(id, VirtualRouteSet); }
13     return failure; /* Unable to find a set so far */ }
14 int VirtualRouteSelection(id, VirtualRouteSet) {
15 For each path  $r_k \in$  CandidateRouteSet
16     Compute path-quality  $P$ ;
17     if ( $P \geq P_{lower}$ ) {
18         insert path  $r_k$  into VirtualRouteSet (VR);
19     }
20 }
```

Fig.1 Virtual route discovery procedure

图 1 虚拟路径查找程序

### 2.3 反向连接标记

反向标记连接尽可能多地发现沿着虚拟路由上的真实路径,同时满足不交叉和特定会话的 QoS 需求.目标  $d$  产生一个一跳的广播 RREP 信息来发送反向标记信息.这个信息主要由下列域组成: {源地址  $s$ , 标记源地址  $L$ , 会话 ID, QoS 需求  $P_{lower}$ , 虚拟路径  $VR$ , 跳数  $H$ , 累计延时  $AD$ }.

累计延时  $AD$  应用于对延时要求敏感的会话服务.

在开始反向连接标记过程之前,当其他域与路径需求信息中的域相同时, $d$  把  $L$  作为自己的 IP 地址, $H$  和  $AD$  设置为 0.为了以后再广播报文,收到反向标记信息的每个结点将进行下列处理:

- (1) 跳数  $H$  按 1 递增;
- (2) 把它的延时加到  $AD$  中;
- (3) 将  $L, H$  和  $AD$  记录到路由表;
- (4) 用它的 IP 地址代替  $L$ , 但该结点必须满足下列条件:
  - 它有足够带宽(一般认为结点的带宽足够大);
  - 累计延时  $AD$  不超过  $P_{lower}$  中的延时需求;
  - 跳数  $H$  小于最大可靠跳数( $H_{max}$ );
  - 它不是一个叶结点;
  - 它不是源结点  $s$ .

中间结点也记录来自其他比  $H$  大的源地址  $L$  的标记信息,但不广播信息.

这样,就在  $s$  和  $d$  之间发现多条满足条件的路径,它们由会话 ID 标记的连接组成.

### 2.4 路由策略及流量分配

源结点收到反向标记信息后,即建立起源到目的的多条路径,这是实际的多路径.根据收到路径的跳数( $h$ )、延迟( $d$ )和带宽( $b$ )等信息,将路径分为最优路径、最短路径及带宽最佳路径等.对于具有特殊要求的用户和报文应用,将其要求定义为不同类别的优先等级(例如,如果报文对时间敏感,则定义最短路径优先级;如果报文对带宽敏感,则定义最佳带宽优先级),源结点根据需求选择满足要求的路径进行流量分配.

对于一般的应用,算法将进行以下处理:

- (1) 根据路径信息,即路径的跳数( $h$ )和延迟( $AD$ )等,计算出路径权重  $w$ ;
- (2) 根据文献[24]中的编码机制,将扩展信息开销加到报文中,然后进行报文分割以解决网络传输固有的不可靠性;
- (3) 根据报文的 QoS 需求和路径权重,将分割的数据流按比例分配到多条路径中,对于权重大的路径分布较多的流量;反之,对于权重较小的路径相应地分配少一点流量.

### 2.5 动态路径维护和修补

当网络结点发生移动时,网络的拓扑也随之动态改变,这必将导致簇及簇成员的改变.这时,根据第 2.1 节中的方法进行簇的更新,并更新路由表.

当由于结点移动或移走而引起中间某结点对之间一个连接中断时,选择原来冗余的连接标记来替换中断的连接,将原连接会话的流量、QoS 需求及连接标记都切换到更新的连接.当中间某一结点加入时,簇首向上游簇首报告该成员 IP 地址,上游簇以其簇成员为源结点,以该成员为目标结点,形成新的不交叉连接;同时,该成员以下游簇成员为目标结点形成新的不交叉连接.当其他某一连接中断或者不能满足需求时,选择满足条件的新的连接段取代原来的连接段,并将原连接会话的流量、QoS 需求及连接标记都切换过来.

在路径中的某个簇消失、出现或者几乎所有的路径都被破坏的情况下,源结点不作任何检查,立即初始化一次新的路由发现,即重新启动路由查找程序.

### 3 模拟与性能评估

#### 3.1 模拟模型及参数配置

采用 OPNET 的模拟器来模拟提出的算法.在模拟中,将移动主机的信道设置为 2Mbps.采用具有一定阈值的自由传播模型作为信道模型.在自由空间模型中,信号天线的能量为  $1/r_2$ ,  $r$  为移动主机之间的距离.在模型中采用无线局域网 802.11 的 DCF(distributed coordination function)作为 MAC(media access control)协议,它能向网络层报告连接中断.

在模拟中,采用 1500m×500m 的矩形区域,移动时间为 900s.相对于正方形区域,矩形区域可以扩大平均路径的长度,以便发现在单路径和多路径上的性能区别.结点的初始位置用统一的分布方式获得.假设每个结点以相同的平均速度独立移动.所有结点有相同的传输范围为 250m.在移动模型中,结点从物理地形中随机地选择一个目标,朝着目标的方向,在最大速度(30m/s)和最小速度(0m/s)之间均匀地选择合适的速度移动.当它到达目标后,结点在那里停留一个暂停时间,然后继续移动.模拟中,在 0~900s 范围内改变暂停时间值来分析不同移动性的性能影响,0s 的停留时间代表持续移动性,900s 的停留时间代表不移动.

模拟的流量为固定比特流(CBR).随机地选择具有相同概率的 20 个源结点和 20 个目标结点.发送报文的时间间隔为 250ms.所有报文大小设置为 512bytes.几次重传后,若没有收到消息或者没有缓存来容纳报文就将报文丢弃.为了给结点足够的时间来完成初始化处理,模拟启动 30s 后开始收集统计数据,产生流量.对于每一阶段操作,采用不同的随机种子操作运行 10 次,取其平均结果.

#### 3.2 性能评价标准

本文采用两种方法来研究 CBMRP 的性能:一种方法是,选择一种具有平面结构的多路径路由算法——SMR 与 CBMRP 进行比较;另一种方法是,将 CBMRP 与单路径路由算法 CBRP(cluster-based routing protocol)进行比较.两种比较方法都在不同移动速度下进行.主要根据下列评价标准来进行性能评估:

吞吐率:单位时间传输报文流量的大小.

控制开销:目标端收到一定的数据分组总数而需要的路由控制分组总数.

路由发现进程启动频率:单位时间内路径发现进程的启动次数.

平均端-端延迟:从源结点到目的结点的所有生存下来的数据报文端-端延迟的平均值.

负载平衡:对于一个 MANET 网络  $G=(V,E)$ ,使用状态函数  $CoV(f) = \frac{f(v_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(v_i)}$  作为负载平衡的评价标

准<sup>[28]</sup>.这里  $f(v_i)$  为结点  $v_i$  转发的数据分组数,  $CoV(f)$  越小,负载平衡越好.

#### 3.3 比较结果

通过实验,得到如下结果:

图 2 和图 3 显示了结点在移动速度为 0m/s 和 10m/s 两种情况下的吞吐量.显然,在移动速度为 0 的情况下,吞吐量相对要大一些.这是因为移动速度增加,网络拓扑改变频率增大,网络开销增大,吞吐量就会减少.图中显示出多路径的吞吐量比单路径路由相对来说要大得多,这是由于多路径采用了多条路径来发布流量.但是, CBMRP 的吞吐量相对于 SMR 要小,这是因为采用分簇算法后,用来传输报文的的路径数要明显减少,因而吞吐量也要减少.

而图 4 和图 5 说明,单路径路由的控制开销低于多路径路由.这是因为,相对于单路径用按需路由方法搜索路径来说,用多路径的方法来搜索不同的多路径可能付出的代价要高一些;CBMRP 相对于 SMR 来说代价相对低一些,特别是在结点数增加时, CBMRP 的开销相对于 SMR 要小得多.这是因为,利用簇的层次管理来进行路径搜索比起在整个网络普遍搜索代价要低得多,特别是网络规模越大, CBMRP 相对于 SMR 的开销就越小.

图 6 显示了相对移动性的路由发现进程启动频率的结果.相对于单路径路由方法,多路径路由 SMR 和 CBMRP 的启动路径发现进程的频率较低.这个结果与文献[2]中的理论分析结果相一致.多路径路由 SMR 和

CBMRP 的启动路由发现进程次数几乎一样,这是由于启动路径发现进程主要依赖于选定的多路径的连接中断而不是使用的多路径方法.

图 7 显示了平均端-端延迟结果.端-端延迟包括每个主机队列延迟及从源到目的的传播延迟.多路径路由将减少队列延迟,因为流量分布在不同的路径中.另一方面,它又会增加传播延迟,因为某些数据分组可能沿着次优路径来转发.由图 7 可以看到,相对于多路径,单路径的平均端-端延时稍微高一点,CBMRP 的平均端-端延迟比 SMR 又稍微高一点.这证明多路径路由可以并行发布流量,减少端-端延迟时间;但在低于 300s 的暂停时间内,这个提高是有限的.随着暂停时间的减少,多路径路由和单路径路由的平均端-端延迟时间都将增加,因为暂停时间越短,拓扑变化就越频繁,将会激发更多的路由发现进程.因此,源结点数据分组的队列延迟将会增加,这将导致平均端-端延迟的增加.

图 8 给出了负载均衡的结果.单路径路由的网络负载 CoV 比多路径路由的网络负载要高.这是因为,多路径路由可能沿着不同的路径发布.单路径路由总是用源-目的之间的最短路径,数据流主要分配到沿着最短路径的结点上;CBMRP 的负载均衡比 SMR 要好,这可能是因为 SMR 只在两条路径上分布流量,而 CBMRP 在所有非交叉的多条路径并行地分布流量.随着暂停时间的减少,单路径路由和多路径路由的网络负载 CoV 都会减少.这表明移动性增加可能带来结点流量的负载均衡性的改善.这是因为移动性“热点”可能被消除掉所造成的.

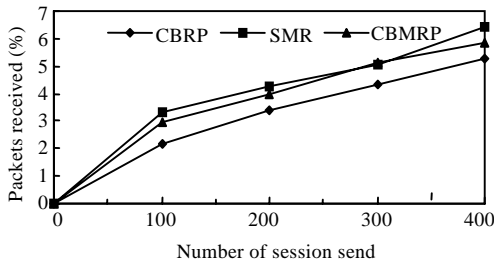


Fig.2 Throughput at speed of 0m/s

图 2 移动速度为 0 的吞吐量

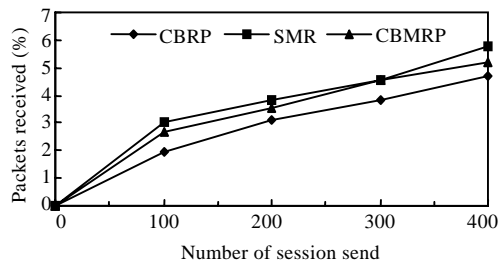


Fig.3 Throughput at speed of 10m/s

图 3 移动速度为 10m/s 的吞吐量

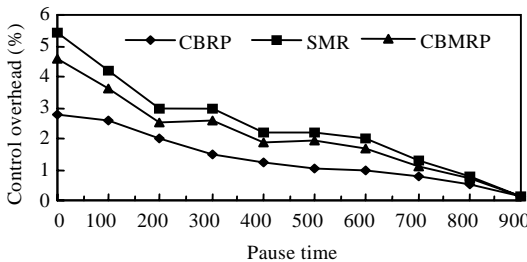


Fig.4 Control overhead with varying speed

图 4 不同移动速度的控制开销

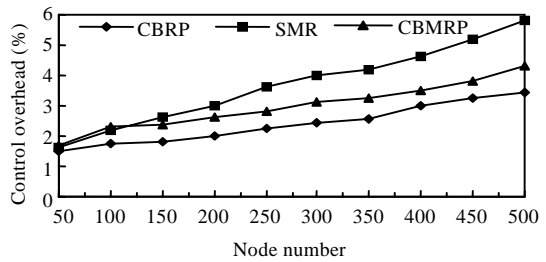


Fig.5 Control overhead with varying network nodes

图 5 不同结点数控制开销

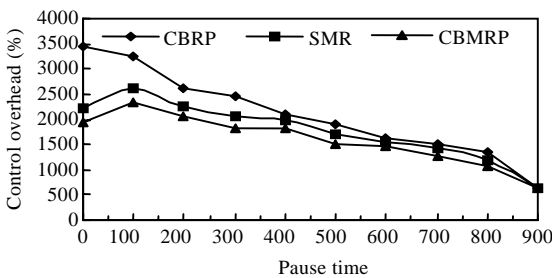


Fig.6 Number of route discovery with varying speed

图 6 不同移动速度的路径发现启动次数

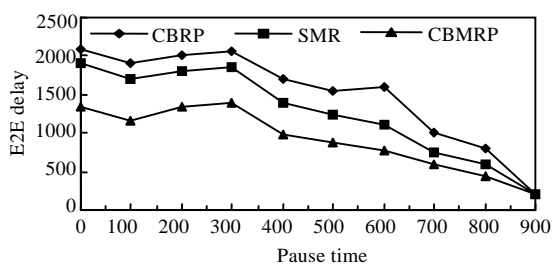


Fig.7 Average end-to-end delay with varying speed

图 7 不同速度的端-端延迟

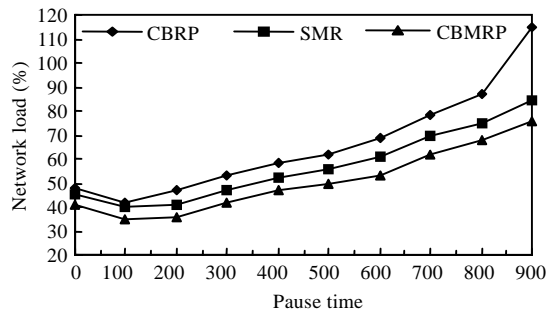


Fig.8 CoV of the network load with varying speed

图 8 不同速度的网络负载平衡 CoV

#### 4 结束语

基于簇的多路径(CBMRP)一方面利用多路径并行传输流量,增大了吞吐量,从而实现了拥塞避免和负载平衡,优化了网络带宽的应用,提高了共享信道的利用率;另一方面,利用基于簇的层次结构管理,动态处理网络拓扑变化,能够减少路由管理开销和路由维护的代价,提高网络的可扩展性、可靠性等.通过理论分析和模拟验证,说明基于簇的多路径路由对于 MANET 网络来说是一个比较理想的方法.然而,这些优点没有考虑数据分组在目的结点重新组装还可能存在的错误和增大控制开销等问题.将来,我们将针对多路径动态流量分配算法及基于纠错报文分割算法等问题作进一步研究.

#### References:

- [1] Park VD, Conson MS. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM'97. Kobe, 1997. 451-459. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=843010&dl=G&coll=GUIDE>
- [2] Nasipuri A, Das SR. On-Demand multi-path routing for mobile ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE ICCCN'99. Boston, 1999. 64-70. <http://citeseer.ist.psu.edu/nasipuri99demand.html>
- [3] Johnson D, Maltz D. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks, mobile computing. In: Imielinski T, Korth H, eds. Mobile Computing. Kluwer Academic Publishers, 1996. 153-181.
- [4] Ephremides A, Wieselthier JE, Baker DJ. A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling. Proc. of the IEEE, 1987,75(1):56-73.
- [5] Gerla M, Tsai TC. Multicluster, mobile, multimedia radio network. ACM-Baltzer Journal of Wireless Networks, 1995,1(3): 255-265.
- [6] McDonald AB, Znati TF. A mobility based framework for adaptive clustering in wireless ad hoc networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999,17(8):1466-1487.
- [7] Lin CR, Gerla M. Adaptive clustering for mobile wireless networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(7):1265-1275.
- [8] Feng YX, Wang GX, Liu ZG, Jiang YQ. A clustering algorithm applied to the management of mobile ad hoc network. Journal of Software, 2003,14(1):132-138 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/132.htm>
- [9] Chen S, Nahrstedt K. Distributed quality-of-service routing in ad hoc networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999,17(8):1488-1505.
- [10] Iwata A, Chiang CC, Pei G, Gerla M, Chen TW. Scalable routing strategies for ad hoc wireless networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999,17(8):1369-1379.
- [11] Cidon I, Rom R, Shavitt Y. Analysis of multi-path routing. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1999,7(6):885-896.
- [12] Ogier RC, Ruthenburg V. Minimum-Expected-Delay alternate routing. In: Proc. of the Infocom'92. Florence, 1992. 617-625. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=643>
- [13] Nageswara SV, Batsell SG. Algorithm for minimum end-to-end delay paths. IEEE Communication Letters, 1997,1(15):152-154.
- [14] Suzuki H, Tobagi FA. Fast bandwidth reservation scheme with multi-link & multi-path routing in ATM networks. Computer Communications Review, 1994,24(5):81-106.



- [15] An HY, Lu XC. A review of routing protocol for mobile ad hoc networks. *Computer Engineering & Science*, 2006,28(2):4-9 (in Chinese with English abstract).
- [16] An HY, Lu XC, Peng W, Gong ZH. A cluster-based multipath dynamic source in MANET. *Journal of Computer Research and Development*, 2006,43(3):381-388 (in Chinese with English abstract).
- [17] Dong YX, Yang TZ, Makrakis D, Lambadaris I. Supernode-Based reverse labeling algorithm: QoS support in mobile ad hoc wireless networks. In: Anderson J, ed. *Proc. of the CCECE 2002*. Winnipeg, 2002. 1368-1373.
- [18] Leung R, Liu JL, Poon E, Chan ALC, Li BC. MP-DSR: A QoS-aware multi-path dynamic source routing protocol for wireless ad-hoc networks. In: *Proc. of the 26th Annual IEEE Conf. on Local Computer Networks. LCN 2001*, Tampa, 2001. 132-141. <http://citeseer.ist.psu.edu/leung01mpdsr.html>
- [19] Lee SJ, Gerla M. AODV-BR: Backup routing in ad hoc network. In: *Proc. of the IEEE WCNC 2000*. Chicago, 2000. 1311-1316. <http://www.cs.ucla.edu/NRL/wireless>
- [20] Wang L, Zhang LF, Shu YT, Dong M. Multipath source routing in wireless ad hoc networks. In: *Proc. of the Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering*, 2000. 479-483. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/6844/18407/00849755.pdf>
- [21] Pearlman MR, Haas ZJ, Sholander P, Tabrizi S. On the impact of alternate path routing for load balancing in mobile ad hoc network works. In: *Proc. of the MobilHOC 2000*. 2000. 150. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/6981/18823/00869207.pdf>
- [22] Lee SJ, Gerla M. Split multi-path routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks. Technical Report, Los Angeles: Computer Science Department, University of California, 2001.
- [23] An HY, Lu XC, Peng W. A cluster-based multipath routing for MANET. In: Akyildiz IF, ed. *Proc. of the Med-Hoc-Net 2004*. Bordum: Kluwer Academic Publisher, 2004. 405-413.
- [24] Tsirigos A, Haas ZJ. Multi-Path routing in the present of frequent topological changes. *IEEE Communications Magazine*, 2001.
- [25] Pham PP. Congestion avoidance using multipath routing and power control in mobile ad hoc network [Ph.D. Thesis]. Australia: Telecommunications University of South Australia, 2002.
- [26] Valera A, Seah WKG, Rao SV. Cooperative packet caching and shortest multipath routing in mobile ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2003*. <http://citeseer.ist.psu.edu/valera03cooperative.html>
- [27] Perkins CE, Belding-Royer EM, Chakeres I. Ad hoc on demand distance vector (AODV) Routing. IETF Internet draft, draft-perkins-manet-aodvbis-00.txt, 2003.
- [28] Wu K, Harms J. On-Demand multipath routing for mobile ad hoc networks. *Journal of Communication Software and Networks* (Special Issue on Innovations in Ad Hoc Mobile Pervasive Network), 2002,4(1):48-58.

#### 附中文参考文献:

- [8] 冯永新,王光兴,刘治国,姜月秋.一个应用于移动 Ad Hoc 网络管理的簇生成算法. *软件学报*,2003,14(1):132-138. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/132.htm>
- [15] 安辉耀,卢锡城.移动自主网络多路径技术研究进展. *计算机工程与科学*,2006,28(2):4-9.
- [16] 安辉耀,卢锡城,彭伟,龚正虎.MANET 中基于簇的多路径动态源路由. *计算机研究与发展*,2006,43(3):381-388.



安辉耀(1972 - ),男,湖南邵阳人,博士,副教授,主要研究领域为移动网络,专家系统.



彭伟(1973 - ),男,博士,副研究员,主要研究领域为高性能计算机网络.



卢锡城(1949 - ),男,教授,博士生导师,中国工程院院士,CCF 高级会员,主要研究领域为高性能计算机,高性能网络技术,分布与并行处理技术.