

Ad hoc 网络节点不相交多路径距离矢量路由协议

郭显^{1,3} 冯涛² 袁占亭²

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院 兰州 730050)¹

(兰州理工大学计算机与通信学院 兰州 730050)² (甘肃联合大学电子信息工程学院 兰州 730000)³

摘要 AMR 算法是 Ad hoc 网络计算节点不相交最大路径集合的累积多路径路由机制。针对节点不相交多路径源路由协议 MNDP 及 SMNDP 存在的问题,整合按需距离矢量路由 AODV 和 AMR 算法,提出了节点不相交多路径距离矢量路由协议 MDVR。MDVR 协议建立的路径信息分布在网络节点中,可缩短路由分组长度以及减轻路由发现源节点建立路由的负担;可防止攻击者通过篡改路由消息中的路径信息攻陷协议。

关键词 Ad hoc 网络,流网络,节点不相交路径,距离矢量路由,多路径路由协议

中图分类号 TP393.04 **文献标识码** A

Multiple Node-disjoint Paths Distance Vector Routing for Ad hoc Networks

GUO Xian^{1,3} FENG Tao² YUAN Zhan-ting²

(School of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)¹

(School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)²

(School of Electronic Information Engineering, Gansu Lianhe University, Lanzhou 730000, China)³

Abstract The AMR algorithm used in computing the maximal set of multiple paths is an aggregated multi-path routing scheme for Ad hoc Networks. The MDVR protocol proposed in this paper is a derivative of AODV integrated with the AMR algorithm for the discovery and maintenance of multiple paths. The length of route packets can be shortened and the burden of source for route discovery can be lightened, because paths established by MDVR are saved in routing table. In addition, the attacks for MDVR by modifying paths in route packets can be efficiently avoided.

Keywords Ad hoc networks, Flow-network, Distance vector routing, Node-disjoint paths, Multi-path routing

无线 Ad hoc 网络是一种特殊的临时性移动网络,没有固定基础设施,网络节点既是主机又是路由器。同时,网络节点移动性导致网络拓扑动态变化,路由问题是 Ad hoc 网络可靠运行的关键问题之一。路由协议通常分为单路径路由协议和多路径路由协议。按需路由协议更适合大规模、随机、多跳 Ad hoc 网络。传统的按需单路径路由方式主要分为两大类:源路由方式和距离适量路由方式。源路由方式路由协议建立的路径存储在源节点中,如动态源路由协议 DSR^[1];距离矢量路由方式路由协议建立的路径分布在网络节点中,如 Ad hoc 按需距离矢量路由协议 AODV^[2]。基于传统按需单路径路由方式,在网络给定节点之间建立节点不相交多路径,能够改进 Ad hoc 网络的鲁棒性和安全性^[3]。

单次路由发现是基于传统按需单路径路由建立节点不相交最大路径集合的常用方法,如基于 DSR 协议的分裂多路径路由协议 SMR^[4]、文献[5]提出的协议、基于 AODV 协议的多路径距离矢量路由协议 AODVM^[6]等。这些协议中,中间节点按照规定的路由请求转发策略转发路由请求消息,目标节点或源节点负责计算节点不相交最大路径集合(除文献[6]

外),而且这些协议都设法通过单次路由发现过程计算给定节点之间的节点不相交最大路径集合。文献[7]已证明,无论在源节点还是目标节点,仅从一个路由请求消息的不同副本遍历所得到的路径中计算节点不相交最大路径集合是 NP-complete 问题。因此,通过单次路由发现保证计算给定节点之间的最大路径集合是不可能的。

基于流网络理论,文献[3]提出计算节点不相交最大路径集合的累积多路径路由 AMR(Aggregate Multi-path Routing)算法,其主要思想是:协议根据已发现节点不相交路径集合(参考路径 RP, Reference Paths)计算一条辅助路径 AP(Auxiliary Path);参考路径 RP 和辅助路径 AP 合并、重组;得到新的节点不相交路径集合,路径条数增加 1。文献[3]证明 AMR 算法能为计算给定节点之间节点不相交最大路径集合提供理论保证。通过集成 AMR 算法和动态源路由协议 DSR,文献[3]设计了节点不相交多路径路由协议 MNDP。文献[8,9]基于 MNDP 协议提出了可证明安全的节点不相交多路径源路由协议 SMNDP,并用不同方法分析了 SMNDP 协议的安全性。

到稿日期:2010-03-25 返修日期:2010-06-22 本文受国家自然科学基金(60972078),甘肃省高等学校基本科研计划项目(0914ZTB186),兰州理工大学博士点基金(BS14200901)资助。

郭显(1971—),男,博士生,讲师,主要研究方向为无线网络安全, E-mail: iamxg@163.com;冯涛(1970—),男,博士,研究员,主要研究方向为安全协议复合理论、无线传感器网络安全;袁占亭(1961—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络与软件、通信与信息系统。

源路由方式是 MNDP 协议和 SMNDP 协议的基础,参考路径存储在源节点中,网络节点根据路由消息中的参考路径信息计算辅助路径。协议返回辅助路径时,源节点执行合并重组算法,根据参考路径和辅助路径构造新的节点不相交多路径。基于源路由方式的累积多路径路由协议能够保证合并重组算法的正确性和安全性,并且有利于源节点选择多路径同时传输数据或选择性地采用备份路径传输数据。然而,在计算辅助路径的过程中,泛洪路由请求分组要包含参考路径集合,以便中间节点根据参考路径集合计算辅助路径。这样,随网络规模和路由发现次数的增加,路由请求分组的长度会不断增加,导致通信负载增加,降低网络性能。并且,参考路径和辅助路径合并重组算法在源节点中进行,增加了源节点的负担。另外,攻击者能够通过修改路由消息分组中的参考路径和辅助路径信息,达到攻陷协议的目的^[8]。

针对源路由方式路由协议 MNDP 及 SMNDP 存在的问题,本文整合 AODV 协议和 AMR 算法,提出了节点不相交多路径距离矢量路由协议 MDVR (Multi-path Distance Vector Routing)。MDVR 协议的特点是:(1)参考路径和辅助路径信息存储在网络节点中,避免攻击者通过篡改路由消息中的参考路径信息和辅助路径信息而攻陷协议;(2)路由消息中无需携带参考路径信息和辅助路径信息,减小了路由消息分组的长度,降低了网络通信负载,提高了网络性能;(3)在路由应答过程中,由辅助路径上的节点根据路由表完成合并重组算法,减轻了源节点的负担。

1 理论框架

文献[3]基于流网络理论提出了计算节点不相交最大路径集合的图论框架,并证明了在 Ad hoc 网络中的计算节点不相交路径集合的问题等价于流网络中的流分配问题。流分配算法中使用的重复 Ford-Fulkerson 方法^[10]不仅具有允许判断节点不相交多路径是否存在的属性,而且使按需构造存在的节点不相交路径集合更加方便。每次执行 Ford-Fulkerson 算法,试图使单位容量流网络的流值增加 1。如果没有达到最大流,则能够按需识别流网络中从源到目标节点的一条简单路径,该路径被称为增广路径 (augmenting path)。确定沿增广路径的单位流并和原流相加,使流网络的流增加 1。一旦达到最大流, Ford-Fulkerson 方法终止,并且再无法找到新的增广路径。

由流网络到 Ad hoc 网络的逆映射,增广路径和沿该路径的相应流能被映射成 Ad hoc 网络上的一条辅助路径,然而,辅助路径和参考路径并不一定是节点不相交的。辅助路径和参考路径必须合并重组,才能生成节点不相交路径集合。

文献[3]提出的图论框架由 3 个步骤组成:(1)把 Ad hoc 网络连通图转换为相应单位容量流网络;(2)Ad hoc 网络节点不相交路径集合映射为流网络的流值,针对流网络和当前流,执行一次 Ford-Fulkerson 算法,至少计算一条增广路径和沿该路径的流;(3)对每条增广路径和沿该路径的单位流在 Ad hoc 网络中构造一条辅助路径。合并辅助路径和已发现的路径获得新的节点不相交路径集合,新的 Ad hoc 网络节点不相交路径集合中的路径条数增加 1。重复(2)、(3)步,直到没有新的增广路径被发现为止。

1.1 Ad hoc 网络与流网络

用 $G=(V, E)$ 表示 Ad hoc 网络, V 是网络节点的集合, E

是双向通信链路的集合。通过用方向相反的两条有向边表示 E 中的每条无向边,把 Ad hoc 网络连通图转换成流网络 $G^F=(V^F, E^F)$,转换细节参见文献[3]。根据流网络理论,已证明 Ad hoc 网络 G 中存在 k 条节点不相交路径的充分必要条件是相应流网络 G^F 中存在值为 k 的流分配。

文献[3]根据流分配原理和流网络 G^F 上计算增广路径的 Ford-Fulkerson 方法得出以下定理。

定理 1 假定 $RP(V_1, E_1)$ 是 Ad hoc 网络连通图 $G(V, E)$ 中节点不相交路径的集合,与 RP 相对应的辅助路径为 $AP(V_2, E_2)$,其中 $V_1, V_2 \subseteq V, E_1, E_2 \subseteq E, E_2$ 中的边是以下两种类型的边:

- (1) $(u, v) \notin E_1$ 并且 $(v, u) \notin E_1$
 - (2) $(u, v) \in E_2$ 但 $(u, v) \notin E_1$ 而 $(v, u) \in E_1, u, v \in V$
- 这两种类型边还必须满足以下要求:

假设 $u \in V_1$ 且 $u \in V_2, p \rightarrow u \rightarrow v$ 是构成辅助路径的一部分,即 $(p, u) \in E_2$ 且 $(u, v) \in E_2$,存在 3 种情况:

- ① p 是 RP 上节点 u 的后继,并且 v 既不是参考路径 RP 上节点 u 的前驱,也不是节点 u 的后继。如 $(u, p) \in E_1$ 但 $(u, v) \notin E_1$ 且 $(v, u) \notin E_1$ 。
- ② p 既不是参考路径 RP 上 u 的后继,也不是 u 的前驱,并且 v 肯定是参考路径 RP 上 u 的前驱。如 $(p, u) \notin E_1$ 且 $(u, p) \notin E_1$ 但 $(v, u) \in E_1$ 。
- ③ 如果 p 不是参考路径 RP 上 u 的后继 (p 显然不是参考路径 RP 上 u 的前驱),那么 v 肯定是参考路径 RP 上 u 的前驱。如 $(p, u) \notin E_1$ 且 $(u, p) \notin E_1$ 但 $(v, u) \in E_1$ 。

如图 1 中,假设参考路径 $RP(V_1, E_1) = \{\{S, 2, 5, T\}, \{S, 1, 4, T\}\}$,路径 $AP(V_2, E_2) = \{\{S, 3, 4, 1, 5, 2, 6, T\}\}$ (图中虚线表示的路径)是满足定理 1 要求的辅助路径。

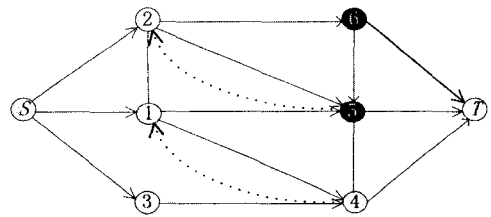


图 1 辅助路径示例

1.2 合并算法

根据定理 1 得出的辅助路径 AP 和已发现的参考路径集合 RP 不一定是节点不相交的,必须通过合并重组得出新的节点不相交路径集合作为下次辅助路径计算的参考路径集合,合并算法如下:

- (1)建立有向图 $H=(V^H, E^H)$, H 仅包含从源节点 S 到目标节点 T 的已发现节点不相交路径;
- (2)网络图 G 中辅助路径的顶点和边追加到有向图 H 中,仍用 $H=(V^H, E^H)$ 表示;
- (3)对 E^H 中的每条边 (u, v) ,如果 (v, u) 也在 H 中,从 E^H 中删除边 (u, v) 和 (v, u) ,得到新的有向图 $H=(V^H, E^H)$ 。

如图 1 中合并算法需删除重合链路 $(1, 4)$ 、 $(4, 1)$ 及 $(2, 5)$ 、 $(5, 2)$ 生成节点不相交多路径集合 $\{\{S, 1, 5, T\}, \{S, 2, 6, T\}\}, \{S, 3, 4, T\}$ 。

1.3 AMR 算法

假设 G 是源节点为 S 、目标节点为 T 的 Ad hoc 网络, RP 是图 G 中节点 S 和 T 之间已发现节点不相交多路径集合,即

参考路径集合,可通过以下步骤计算移动 Ad hoc 网络上节点不相交最大路径集合。

(1) $RP = \Phi$;

(2) 对参考路径集合 RP , 根据定理 1 计算图 G 中源节点 S 与目标节点 T 之间的一条辅助路径 AP ;

(3) 根据合并算法重组 RP 和 AP 得到新的节点不相交路径集合, 仍用 RP 表示。

重复(2)、(3)步, 直到已发现所需路径为止, 或找不到新的辅助路径, 即已发现节点不相交最大路径集合为止。

2 现有累积多路径路由协议问题

MNDP 协议和 SMNDP 协议是整合动态源路由协议 DSR 和 AMR 算法而设计的节点不相交多路径路由协议, 如图 1 所示。假设参考路径集合 $RP = \{\{S, 2, 5, T\}, \{S, 1, 4, T\}\}$, 由于已获得网络拓扑信息 RP 存储在源节点 S 中, 网络中间节点和目标节点 T 收到的来自源节点 S 的路由请求分组必须包含参考路径信息 RP 和辅助路径信息 AP , 如在第三次路由发现中, 目标节点收到的路由请求分组应为 $\{RREQ, \dots, RP = \{\{S, 2, 5, T\}, \{S, 1, 4, T\}\}, AP = \{\{S, 3, 4, 1, 5, 2, 6, T\}\}$, 这样, 随网络规模的增加和路由发现次数的增加, 泛洪路由请求分组的长度会不断增加, 导致通信负载增加, 降低网络性能。显然, 最后一次路由发现请求消息中包含整个网络拓扑信息, 如 $\{RREQ, \dots, RP = \{\{S, 1, 5, T\}, \{S, 2, 6, T\}\}, \{S, 3, 4, T\}\}$ 。再者, MNDP 协议和 SMNDP 协议的合并算法在源节点中执行, 增加了源节点的负担。

另外, 攻击者通过修改路由消息中的参考路径和辅助路径信息, 导致 MNDP 协议无法完成建立节点不相交多路径路由的目标^[6]。

3 MDVR 协议

MDVR 协议是整合 AODV 协议和 AMR 算法的累积多路径路由协议, 该协议主要步骤如下: 在首次路由发现中, 首先使用 AODV 协议识别从源节点 S 到目标节点 T 的一条路径, 参与路由发现的节点在路由表中记录转发路由请求消息 RREQ 的节点信息。当目标节点 T 收到 RREQ 时, 就建立了一条从源节点 S 到目标节点 T 的逆路径。然后, 目标节点 T 生成路由应答消息 RREP, 从目标节点 T 到源节点 S 收到 RREP 的中间节点在路由表中建立该节点到目标节点 T 的转发路径, 转发路径上的下跳节点是给它转发路由应答消息的节点。中间节点再把路由应答消息 RREP 单播给它转发路由请求消息的节点。这样, 当源节点 S 收到路由应答消息时, 即在路由表中建立了首条参考路径 RP 。第 $k(k > 1)$ 次路由发现中, 中间节点根据定理 1 基于第 $k-1$ 次生成的参考路径 RP 识别辅助路径 AP , 辅助路径的建立过程与首条参考路径的建立过程类似。不同的是, 在路由请求转发阶段, 中间节点根据定理 1 中对辅助路径的要求转发路由请求; 在路由应答过程中, 辅助路径 AP 上的节点要根据合并算法建立或修改该节点到目标节点 T 的路径; 重复第二步, 直到已建立所需路径或找不到新的辅助路径为止。

MDVR 协议中网络节点路由表如图 2 所示。网络节点的路由表项表示存在一条经过该节点从身份为 l_s 的源节点到身份为 l_T 的目标节点的路径。路径上该节点的前驱节点是身份为 l_{pre} 的节点, 后继是身份为 l_{suc} 的节点。有两种类型

的路由表项: $rte_ID=0$ 的路由表项用于记录经过该节点的参考路径信息, 即已发现节点不相交路径信息; $rte_ID=1$ 的路由表项用于记录新发现路径信息, 即首条参考路径或辅助路径信息。与 AODV 协议所使用路由表不同的是, AODV 协议所用网络节点路由表只记录了该节点到目标节点路径上该节点的后继节点信息。

l_s : 源节点标识符
l_T : 目标节点标识符
l_{pre} : 前驱节点标识符
l_{suc} : 后继节点标识符
rte_ID : 路由标识

图 2 路由表

3.1 MDVR 协议路径建立机制

3.1.1 MDVR 协议路由请求传播策略

根据本文第 1 节定理 1, MDVR 协议计算辅助路径的路由请求传播策略如表 1 所列。假设消息发送者节点的身份为 l_{snd} , 消息接收者节点的身份为 l_{rec} 。 l_s, l_T 分别是源节点和目标节点的身份, $RP_x (RP_x \subseteq RP)$ 是任意一条参考路径。

表 1 路由请求传播策略

l_{rec} 与任意参考路径 RP_x 的关系	l_{rec} 策略		策略序号	
	建路由表项	传播		
身份为 l_{rec} 的节点路由表中无 $rte_ID=0$ 的表项	$(l_s, l_T, l_{snd},$ 空值, 1)	广播	1	
	$l_{snd} = l_{suc}$	$(l_s, l_T, l_{snd},$ 空值, 1)	广播	2
身份为 l_{rec} 的节点有路由表项 $(l_s, l_T, l_{pre}, l_{suc}, 0)$	$l_{snd} = l_{pre}$	不建路由表项	不转发	3
	$l_{snd} \neq l_{pre}$ 且 $l_{snd} \neq l_{suc}$	$(l_s, l_T, l_{snd},$ 空值, 1)	单播给身份为 l_{pre} 的节点	4

3.1.2 MDVR 协议路由请求算法

源节点 S 首先判断路由表中是否存在到目标节点 T 的路径。根据存在/不存在设置 $f_flag=0/1$, 以区别是首次路由发现还是第 k 次路由发现。然后通过给它的第一跳邻居广播以下路由请求消息 RREQ, 启动路由发现过程:

$$S \rightarrow brdcast: (RREQ, f_flag, l_s, l_T, N_s, t)$$

$brdcast$ 表示广播消息, RREQ 是路由请求标识符, l_T 是目标节点 T 的身份标识, N_s 是随机数, t 是建立该路由请求消息的时间。当第一跳节点 $first_hop_id$ 收到来自源节点 S 的路由请求消息 RREQ 时, 节点 $first_hop_id$ 通过 (l_s, N_s, t) 验证它是否处理过该 RREQ。如果这些验证失败, 取消 RREQ 不转发; 否则, 节点 $first_hop_id$ 在路由表中建立路由表项 $(l_s, l_T, l_s, \text{空值}, 1)$, 然后按图 3 算法转发路由请求消息。

MDVR 协议中间节点 i 处理 RREQ 算法

假设节点 i 收到来自节点 $i-1$ 的如下路由请求消息 RREQ

$$i-1 \rightarrow brdcast/unicast: (RREQ, f_flag, l_T, l_T, cert_s, N_s, t)$$

节点 i 通过 (l_s, N_s, t) 验证它是否处理过该 RREQ。如果验证失败或节点 i 已处理过该 RREQ, 则取消 RREQ 不转发; 验证成功, 节点 i 根据 f_flag 是 0/1 按以下两种情况转发新生成的 RREQ:

- $f_flag=1$, 是首次路由发现, 中间节点 i 在它的路由表中建立路由表项 $(l_s, l_T, l_{i-1}, \text{空值}, 1)$, 然后广播新生成的路由请求 RREQ 给它的所有邻居。
- $f_flag=0$, 第 k 次路由发现, 节点 i 验证它的路由表中是否存在路由表项 $(l_s, l_T, l_{pre}, l_{suc}, 0)$, 即是否存在从源节点 S 到目标节点 T 经过节点 i 的某条参考路径, 根据判断结果如表 1 转发路由请求。

图 3 MDVR 协议中间节点处理 RREQ 的算法

3.1.3 MDVR 协议路由由应答算法

MDVR 协议路由由应答算法主要完成以下任务:(1)假设路由表中记录的从源节点 S 到目标节点 T 路径 AP 的逆路径为 $(l_n=l_T, \dots, l_{i+1}, l_i, l_{i-1}, \dots, l_1=l_S)$, 该路径上的节点 i 收到来自节点 $i+1$ 的路由应答消息 RREP 时, 该节点 i 路由表中路由由请求转发阶段建立的路由表项 $(l_S, l_T, l_{i-1}, \text{空值}, 1)$ 修改为 $(l_S, l_T, l_{i-1}, l_{i+1}, 1)$, 这样就建立了从源节点 S 到目标节点 T 的路径 AP 。该路径上节点 i 的前驱节点是身份为 l_{i-1} 的节点, 后继节点是身份为 l_{i+1} 的节点;(2)根据路由表判断是否存在经过节点 i 的参考路径, 根据判断结果和合并算法建立或修改经过节点 i 从源节点 S 到目标节点 T 的新路径信息。具体处理过程如图 4 所示, 路由应答算法情况(1)中①、②操作的结果是删除重合链路。

MDVR 协议路由由应答算法

- 目标节点 T 收到如下路由由请求消息 RREQ
 $last_hop_id \rightarrow broadcast/unicast; (RREQ, f_flag, l_S, l_T, N_S, t)$
 $broadcast/unicast$ 表示广播/单播消息, 目标节点 T 首先在路由表中建立路由表项 $(l_S, l_T, last_hop_id, \text{空值}, 0)$, 然后生成如下路由由应答消息 RREP, 并单播给它转发路由由请求的节点 $last_hop_id$, 目的节点 T 删除 RREQ 的其他副本。
 $T \rightarrow last_hop_id; (RREP, f_flag, l_S, N_S, t)$
- 中间节点 i 收到来自新发现路径 AP 上它的后继节点 $i+1$ 的路由由应答消息 RREP 时,
 $i+1 \rightarrow i; (RREP, f_flag, l_S, N_S, t)$
 节点 i 首先修改路由由请求转发阶段建立的路由表项 $(l_S, l_T, l_{i-1}, \text{空值}, 1)$ 为 $(l_S, l_T, l_{i-1}, l_{i+1}, 1)$, 然后, 如果 $f_flag=1$, 如下(2)处理路由由应答消息; $f_flag=0$, 验证路由表中是否存在经过节点 i 从源节点 S 到目标节点 T 的参考路径:
 (1) 节点 i 路由表中有路由表项 $(l_S, l_T, l_{pre}, l_{suc}, 0)$, 即存在经过节点 i 从源节点 S 到目标节点 T 的参考路径 $RP_j \subseteq RP (1 \leq j < k)$:
 ① 节点 i 验证新发现路径 AP 上身份为 l_{i-1} 的前驱节点是否是节点 i 所在参考路径 RP_j 上的后继节点, 如果 $l_{i-1} = l_{suc}$, 节点 i 修改路由表中的路径信息, 经过节点 i 从源节点 S 到目标节点 T 路径上的后继节点是节点 $i+1$, 前驱节点不变, 路由表项为 $(l_S, l_T, l_{pre}, l_{i+1}, 0)$ 或
 ② 节点 i 验证新发现路径 AP 上节点 i 的后继节点 l_{i+1} 是否是节点 i 所在参考路径 RP_j 上它的前驱节点, 如果 $l_{i+1} = l_{pre}$, 节点 i 修改路由表中的路径信息, 经过节点 i 从源节点 S 到目标节点 T 路径上的前驱节点是新发现路径 AP 上的前驱节点 $i-1$, 后继节点不变, 路由表项为 $(l_S, l_T, l_{i-1}, l_{suc}, 0)$ 。
 (2) 节点 i 路由表中不存在经过该节点从源节点 S 到目标节点 T 的路径, 即该节点路由表中只有路由表项 $(l_S, l_T, l_{i-1}, l_{i+1}, 1)$
 节点 i 在路由表中建立路径信息, 经过节点 i 从源节点 S 到目标节点 T 路径上的后继节点是新发现路径 AP 上的后继节点 $i+1$, 前驱节点是新发现路径 AP 上的前驱节点 $i-1$, 新建路由表项 $(l_S, l_T, l_{i-1}, l_{i+1}, 0)$ 。
 随后, 节点 i 读取路由表中 $rte_ID=1$ 的路由表项 $l_{pre} = l_{i-1}$ 的信息并删除该路由表项, 给身份为 l_{i-1} 的节点 $i-1$ 继续单播路由由应答消息 RREP。
- 源节点 S 收到如下路由由应答消息 RREP 时,
 $first_hop_id \rightarrow S; (RREP, f_flag, l_S, N_S, t)$
 源节点 S 建立到目标节点 T 的新路径信息, 其到目标节点 T 路径上的第一跳节点是节点 $first_hop_id$, 前驱节点为空值, 新建路由

表项是 $(l_S, l_T, \text{空值}, l_{first_hop_id}, 0)$ 。此时, 建立了从源节点 S 到目标节点 T 的首条参考路径或 $k+1$ 条节点不相交路径。

图 4 MDVR 协议路由由应答算法

用图 5 举例说明路由由应答算法如何通过合并重组删除重合链路。图 5(a) 中实线表示参考路径, 虚线表示辅助路径。当前节点 u 的路由表项为 $(l_S, l_T, l_v, l_T, 1), (l_S, l_T, l_S, l_v, 0)$, 由于辅助路径上节点 u 的前驱 l_v 是参考路径上节点 u 的后继, 节点 u 通过修改 $(l_S, l_T, l_S, l_v, 0)$ 为 $(l_S, l_T, l_S, l_T, 0)$ 删除链路 (u, v) 。当前节点 v 的路由表项为 $(l_S, l_T, l_S, l_u, 1), (l_S, l_T, l_u, l_T, 0)$, 由于辅助路径上节点 v 的后继 l_u 是参考路径上节点 v 的前驱, 节点 v 通过修改 $(l_S, l_T, l_u, l_T, 0)$ 为 $(l_S, l_T, l_S, l_T, 0)$ 删除链路 (v, u) , 这样合并重组生成两条节点不相交路径, 如图 5(b) 所示。

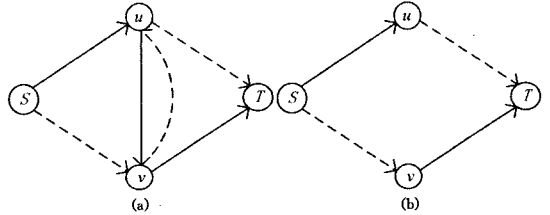


图 5 合并示例

另外, 如果源节点 S 在规定时间内接收不到来自目标节点 T 的路由由应答消息, 源节点 S 将重新启动路由发现过程, 超时时间由网络规模决定。

3.2 MDVR 协议路由由维护

在数据转发阶段, 如果源节点 S 从某条路径第一跳节点上收到路径错误的消息, 则 S 启动路由由发现过程, 重新建立节点不相交路径集合。从 MDVR 协议路由由请求算法可以看出, 一般情况下, 协议会以其它路径作为参考路径识别一条辅助路径, 再建立新的节点不相交路径集合。在最坏情况下, 已发现节点不相交路径全部中断, 则源节点 S 从 $RP = \Phi$ 开始, 重新启动路由由发现过程。

4 相关协议方案比较

假设 V 是 Ad hoc 网络中网络节点的集合, $\deg(v)$ 是节点 $v \in V$ 邻居节点的个数, S 与 T 是源与目标节点。通信负载是 Ad hoc 网络路由协议复杂性和性能的主要指标。对按需路由协议而言, 通信负载主要是单播消息和广播消息。在大规模的 Ad hoc 网络中, 单播负载仅占广播负载的一小部分。因此, 在比较这些协议的效率时, 主要考虑广播负载, 即网络节点转发路由由请求的次数。

AODVM 协议中, 除目标节点外其他网络节点都转发一次路由由请求 RREQ, 因此转发路由由请求的总数是 $|V|-1$ 。MNDP 协议、MDVR 协议类似, 网络节点仅转发第一次收到的路由由请求消息 RREQ, 一次路由由发现需转发 $|V|-1$ 次路由由请求, 发现 k 条节点不相交路径需转发路由由请求的次数是 $k(|V|-1)$ 。

SMR 协议和文献[5]协议通过单次路由由发现计算节点不相交多路径路由集合。从一次路由由发现找到的多条路径中, 在路由由发现的源节点 S 或目标节点 T 选择节点不相交多路径集合, 因此这两个协议都要求中间节点转发所有收到的路由由请求。这样, SMR 协议和文献[5]协议至少需转发的路由由请求次数应是 $|V|-1$, 最多需转发的路由由请求次数是

$\max_{v \in (V - \{S, T\})} \text{deg}(v) * (|V| - 2) + 1 - \text{deg}(T)$ 。本文对 MDVR 协议以及相关协议方案的比较结果如表 2 所列。

表 2 节点不相交多路径路由方案比较

多路径路由	距离矢量路由			源路由	
	AODVM	MDVR	MNDP	SMR	文献[5]协议
累计多路径	否	是	是	否	否
路由请求转发次数	$ V -1$	至少 $ V -1$ 最多 $k(V -1)$	至少 $ V -1$ 最多 $k(V -1)$	至少 $ V -1$ 最多 $\max_{v \in (V - \{S, T\})} \text{deg}(v) * (V -2) + 1 - \text{deg}(T)$	至少 $ V -1$ 最多 $\max_{v \in (V - \{S, T\})} \text{deg}(v) * (V -2) + 1 - \text{deg}(T)$

从表 2 可看出, MNDP 协议和 MDVR 协议的路由请求数在相同区间 $[|V|-1, k(|V|-1)]$ 上, 但由于 MNDP 协议路由请求消息 RREQ 和路由应答消息 RREP 需包含参考路径信息和辅助路径信息, 这样基于源路由方式的累积多路径路由 MNDP 协议具有比 MDVR 协议更高的通信负载。

结束语 累积多路径路由算法 AMR 是计算 Ad hoc 网络给定节点之间节点不相交最大路径集合的有效方法, MDVR 协议是 AMR 算法和距离矢量路由协议 AODV 相结合提出的节点不相交多路径距离矢量路由协议。通过在网络节点中存储参考路径和辅助路径的方法, 有效缩短了路由分组的长度, 减轻了路由发现源节点计算节点不相交多路径路由的负担。本文在假设网络可信的情况下, 设计了 MDVR 协议。引入密码学机制设计基于 MDVR 协议的安全路由协议, 是以后的重要工作。其次通过让 MDVR 协议首次路由发现找到尽可能多的节点不相交路径集合, 可提高效率。因此提高 MDVR 协议的效率, 并对其性能进行仿真研究, 是以后的另一重要工作。

参考文献

[1] Johnson D B, Maltz D A. Dynamic Source Routing in Ad Hoc

Wireless Networks[J]. Mobile Computing, 1996, 12(6): 10-23

[2] Perkins C, Royer E. Ad hoc on-demand distance vector routing [J]. Mobile Systems and Applications, 1999, 24(3): 59-81

[3] Liu Changwen, Yarvis M, Conner W S, et al. Guaranteed On-demand Discovery of Node-disjoint Paths in Ad hoc Networks[J]. Computer communications, 2007, 30(14/15): 2917-2930

[4] Lee S J, Gerla M. SMR: Split Multipath Routing with Maximally Disjoint Paths in Ad hoc Networks[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC 2001). 2001, 10: 3201-3205

[5] Wu K, Harms J. On-demand multipath routing for mobile ad hoc networks[C] // Proceedings of 4th European Personal Mobile Communication Conference (EPMCC 01). Vienna, Austria, February 2001. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.133.9938>

[6] Ye Z, Krishnamurthy S V, Tripathi S K. A Framework for Reliable Routing in Mobile Ad Hoc Networks[C] // Proceedings of Twenty-Second Annual Joint Conference on the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE INFOCOM 2003). 2003, 1: 270-280

[7] Abbas A M, Jain B N. Path Diminution is Unavoidable in Node-disjoint Multipath Routing in a Single Route Discovery[C] // Proceedings of 1st IEEE International Conference on Communication Software and Middleware (COMSWARE). 2006: 1-10

[8] 冯涛, 郭显, 马建峰, 等. 可证明安全的节点不相交多路径源路由协议[J]. 软件学报, 2010, 20(7): 1717-1731

[9] 冯涛, 郭显, 马建峰, 等. MANET 节点不相交多路径安全源路由协议[J]. 计算机学报, 2009, 32(6): 1126-1133

[10] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L. Introduction to Algorithms (Second Edition)[M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 1993

(上接第 78 页)

传统 DV-Hop 算法的定位过程, 且无附加的硬件设备, 使原算法的低成本优势得以保留。仿真结果表明, 与 DV-Hop 算法相比, 改进算法可以有效地提高节点定位精度。

参考文献

[1] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 135-136

[2] Chen Hongyang, Deng Ping, Xu Yongjun, et al. A Robust Location Algorithm with Biased Extended Kalman Filtering of TDOA Data for Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Comput, 2005, 0-7803-9335-X: 883-886

[3] 周艳. 基于 RSSI 测距的传感器网络定位算法研究[J]. 计算机科学, 2009, 36(4): 119-120

[4] Chuang W C, Ha D S. An accurate ultrawideband (UWB) ranging for precision asset location[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies Reston. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 389-393

[5] Girod L, Estrin D. Robust range estimation using acoustic and

multimodal sensing [C] // Proc of the IEEE/RSJ Int'l Conf on Intelligent Robots and Systems, 2002: 1312-1320

[6] 彭刚, 曹元大, 孙利民. 无线传感器网络节点定位机制的研究[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(35): 27-29

[7] Heidemann B N J, Estrin D. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 28-34

[8] 赵军, 裴庆祺, 徐展琦. 无线传感器网络近似三角形内点测试定位算法[J]. 计算机工程, 2007, 33(5): 109-112

[9] Niculescu D, Nath B. DV based positioning in ad hoc networks [J]. Journal of Telecommunication Systems, 2003, 22(1-4): 267-280

[10] Nagpal R, Shrobc H, Bachrach J. Organizing a global coordinate system from local information on all Ad hoc sensor network[C] // 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Network. USA: Springer-Verlag Press, 2003: 333-348

[11] Jonathan B, Christopher T. Handbook of sensor networks[C] // Stojmenovic II, ed. Proc of Localization in Sensor Networks. 2005: 1-18