

# 无线自组织网络基于洪泛控制的 动态路由协议 FCDR

刘桂开, 李青

(湖南科技大学 计算机科学与工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**针对无线自组织网络现有按需路由协议在路由维护时需要采用全网洪泛广播路由请求消息而导致大量额外开销的缺点,提出了一种无线自组织网络基于洪泛控制的动态路由协议 FCDR. FCDR 的主要思想是控制洪泛机制的使用范围,减少路由的维护开销,并使失效路由得到快速恢复.文中描述了 FCDR 协议的实现过程并对路由维护时消息传递的有效性进行了分析.分析表明:通过广播路由请求消息建立路由的情况下,消息传递的有效性将随着源结点和目的结点之间路径长度的增加而急剧下降,相比之下,FCDR 具有更好的有效性且其优势随着源结点和目的结点之间路径长度增加而更为显著.

**关键词:**无线自组织网络;按需路由协议;路由维护;广播;洪泛控制

**中图分类号:**TP393

**文献标识码:**A

**文章编号:**1672-9102(2013)03-0075-08

无线自组织网络中的结点具有路由器和主机2种功能,所以它不需要依赖任何特定的网络基础设施就可以实现自动组网,不在彼此覆盖范围之内的结点可以通过其它结点的中继进行通信,以多跳路由的方式来实现非相邻结点之间的数据传输.由于无线自组织网络具有无中心结点、自组织组网等特点,它可以广泛应用于军事、传感器网络、抢险救灾、商业应用、家庭网络等领域.

无线自组织网络的网络拓扑结构经常发生变化,加上网络的带宽有限和能量受限,而且链路容量也处在不断变化之中,诸多因素要求路由协议能够根据网络拓扑结构的变化自适应地对路由进行维护,因此,设计与无线自组织网络动态网络环境相适应的高效路由协议是实现组网的关键.现阶段,应用于无线自组织网络的路由协议有先应式(Proactive)和按需(On-demand)2大类,其中先应式路由协议是预先建立好结点之间的路由,每个结点都维护一

个到达其他结点的路由表,当有通信需求时,只要查找相应的路由就可以了,所以先应式路由协议也称为表驱动路由协议.典型的先应式路由协议有DSDV(Destination-Sequenced Distance-Vector Routing)<sup>[1]</sup>,OLSR(Optimized Link State Routing)<sup>[2]</sup>,LANMAR(Landmark ad hoc Routing Protocol)<sup>[3]</sup>,FSR(Fisheye State Routing)<sup>[4]</sup>,TBRPF(Topology Broadcast based on Reverse-Path Forwarding)<sup>[5]</sup>等,这种路由协议可以周期性地交换带宽、时延等网络信息,优点是可以支持实时业务,但不适合用于规模较大的网络,除了需要维护许多没有使用的路由,快速变化的拓扑结构导致路由更新的开销也相当大.按需路由协议是根据结点的通信需求来建立路由,有数据传输就建立路由,数据传输完成即释放路由,相比先应式路由协议,按需路由协议的资源利用率更高,更适合动态变化的无线自组织网络.AODV(Ad Hoc on Demand Distance Vector)<sup>[6]</sup>,TORA

收稿日期:2012-12-19

基金项目:湖南省科技计划项目(2010GK3045);湖南省教育厅科研项目(10C0687)

通信作者:刘桂开(1969-),男,湖南安化人,博士,高级工程师,主要从事宽带IP技术、无线网络技术研究. E-mail: guikailiu@gmail.com

(Temporally - Ordered Routing Algorithm)<sup>[7]</sup>, DSR (Dynamic Source Routing)<sup>[8]</sup>, ABR (Associativity - Based Routing)<sup>[9]</sup>等都是按需路由协议. 另外, 也有为了结合上述 2 种路由协议特点而提出的混合型路由协议, 如 ZRP (Zone Routing Protocol)<sup>[10]</sup>, STR (Subarea Tree Routing)<sup>[11]</sup>等.

先应式路由协议和按需路由协议采用了不同的路由维护机制. 先应式路由协议的路由维护是周期性的, 结点之间通过定期交换路由信息来维持路由的可用性. 按需路由协议采用的是触发式路由更新, 传统的方法是当路由失效或发生变化时由源结点利用洪泛机制重新建立路由, 但洪泛机制在全网范围内广播路由请求消息, 一方面会带来相当大的开销, 另一方面路由发现过程会导致业务时延增加<sup>[12]</sup>. 针对按需路由协议的上述路由维护问题, 文中提出了一种无线自组织网络基于洪泛控制的动态路由协议 FCDR (Flooding - Controlled Dynamic Routing), 在建立基本路由的同时, 就考虑为基本路由失效时实施恢复做准备, 一旦基本路由失效, 可以利用备份路由信息对基本路由进行快速修复. 基本路由仍以按需路由的方式建立, 而备份路由信息的建立主要依靠在限定范围以内的结点之间的信息交流, 避免使用全网洪泛, 以降低路由维护开销.

## 1 FCDR 协议

与已有的按需路由协议如 AODV, DSR 等不同, FCDR 是一种动态的无线自组织网络路由协议. 它首先建立从源结点到目的结点的的基本路由, 然后,

基本路由上的结点会与基本路由两侧的结点之间建立起邻居关系, 当基本路由出现中断时, 就可以利用已经建立的邻居关系以及所交流的路由信息对基本路由进行快速修复, 新的路由会随着网络拓扑结构的变化而自适应地进行动态调整, 从整体上限制洪泛范围并提高路由的鲁棒性和灵活性. FCDR 仍属于按需路由协议, 由以下几个部分组成:

- 1) 建立基本路由 (Primary routing);
- 2) 限定结点之间的信息交互;
- 3) 路由修复;
- 4) 路由选择.

### 1.1 建立基本路由

基本路由是指有数据发送需求的结点即源结点发起建立一条到达目的结点的路由. 设初始网络中所有结点的类型为初始结点 (Initial node), 在协议的执行过程中, 结点的类型会发生变化, 一旦基本路由建立起来后, 基本路由所经过的结点的类型就由初始结点转变成为基本结点 (Primary node). 基本路由建立过程开始后, 源结点首先以目的结点 ID 为发送目标向全网范围广播 Route Request (RREQ) 消息, RREQ 消息的格式如图 1 所示. 中间结点在第一次收到 RREQ 时, 会根据 RREQ 中的信息, 建立到达源结点的路由, 然后将自己的结点 ID 加入到 RREQ“所经过的结点序列”中, 如果一个结点收到了相同的 Route Request 消息, 则将其丢弃. 当中间结点有到达目的结点的路由时, 则它不再对 RREQ 进行广播, 而通过已有的路由传送 RREQ, 若没有路由则继续广播收到的 RREQ.

消息类型	目的结点ID	目的结点序列号	源结点ID	源结点序列号	所经过的结点序列	TTL (Time to Live)
------	--------	---------	-------	--------	----------	-----------------------

图 1 RREQ 消息格式  
Fig. 1 RREQ message format

目的结点收到 RREQ 后, 对所收到的 RREQ 进行比较, 选取一条满足最优条件的路由作为基本路由 (路由的最优条件是预先设定的, 可以是时延最小、或稳定度最高、或跳数最少、或能量消耗最慢等可以量化的度量值 (Metric)), 并沿所选基本路由的逆向路由向源结点发送 Route REPLY (RREP) 消息, RREP 消息的格式如图 2 所示. 如果一个结点收到了 RREP 消息且其 ID 属于“路由经过的结点序列”, 则设置自己为基本结点, 并建立一条到达目的结点的基本路由. 如果该结点不是源结点, 则继续向

源结点方向转发收到的 RREP 消息; 如果该结点是源结点, 则不再转发 RREP.

消息类型	目的结点ID	目的结点序列号	发送结点ID	路由经过的结点序列
------	--------	---------	--------	-----------

图 2 RREP 消息格式  
Fig. 2 RREP message format

例 1 设有一个由 15 个结点组成的无线自组织网络, 如图 3 所示, 开始的时候 15 个结点都是初始结点, 其中 S 是源结点、R 是目的结点, 2 个结点之

间有连线表示 2 个结点可以互相通信、收发消息. 经过基本路由建立过程, 得到基本路由为  $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow R$ , 这里最优路由的条件是跳数最少. 基本路由上的 7 个结点由初始结点变成了基本结点.

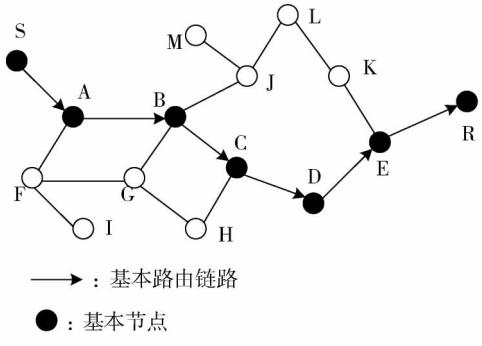


图 3 建立基本路由示意图  
Fig. 3 Establishing primary route

### 1.2 限定结点之间的信息交互

结点之间的信息交互过程在基本路由建立过程中就已经开始进行. 目的结点发送 RREP 消息后, 在 RREP 沿基本路由的反向路由向源结点方向传递时, 除了基本结点可以接收到 RREP, 基本结点的某些邻居也能够收到 RREP, 它们同样可以建立到达目的结点的路由, 这些结点称之为备份结点 (Backup node). 备份结点通过向自己的邻居结点发送 Hello 消息来交换邻居信息, Hello 消息的格式如图 4 所示. 备份结点的邻居结点不仅包括基本结点, 还包括与备份结点相连的初始结点, 它们之间都可以通过 Hello 消息来交换邻居信息.

消息类型	目的结点ID	目的结点序列号	发送结点ID	邻居结点列表
------	--------	---------	--------	--------

图 4 Hello 消息格式  
Fig. 4 Hello message format

虽然基本结点和备份结点都可以接收到 RREP, 但只有基本结点会转发收到的 RREP, 因为基本结点属于基本路由“所经过的结点序列”, 而备份结点不是. 直到源结点收到 RREP 后才停止对 RREP 的转发.

有 2 种情况备份结点会发送 Hello 消息: 第一, 当一个结点由初始结点变成备份结点, 该结点会向邻居广播 Hello 消息, 告诉邻居自己是备份结点; 第二, 自己的邻居信息有更新时, 也会通过广播 Hello 消息将新的邻居信息通告给邻居结点. 如果一个初始结点收到了一个备份结点发来的 Hello 消息, 将以 Hello 消息应答, 将自己的邻居信息告诉给发送

Hello 消息的备份结点. 当一个基本结点收到一个备份结点的 Hello 消息, 不会做出应答, 只会将从 Hello 消息中所获取的信息记录下来.

在例 1 的基本路由建立过程中, E, D, C, B, A, K, J, H, G, F 等结点先后都会收到 RREP, 并建立起到达目的结点 R 的路由. 结点 A, B, C, D, E 由初始结点变成了基本结点, 结点 F, G, H, J, K 则成为了备份结点, 如图 5 所示.

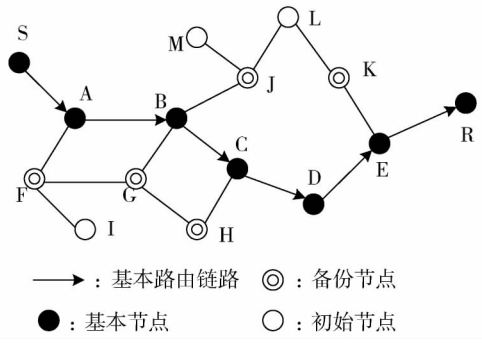


图 5 3 种类型的结点示意图  
Fig. 5 Three types of nodes

F, G, H, J, K 等备份结点将向自己的邻居结点广播 Hello 消息, 收到 Hello 消息的基本结点 A, B, C, D, E 和备份结点记录下从 Hello 消息中获取的信息. 从备份结点接收到 Hello 消息的 3 个初始结点 I, M, L 除了要记录下相关信息, 还要对收到的 Hello 消息做出应答, 于是分别向 F, J, J 和 K 发送 Hello 消息, 由此备份结点 F, J, K 才知自己的邻居中有初始结点, 这也是为什么初始结点需要应答 Hello 消息的原因. 收到 Hello 消息的结点, 都会提取 Hello 消息中的邻居结点列表信息并予以保存, 例如, 表 1 是例 1 中的结点 A 经过信息交互后所获取的邻居信息, 一个结点信息由结点 ID 和结点类型两部分组成, 基本结点由 0 表示, 备份结点由 1 表示, 初始结点由 2 表示.

表 1 结点 A 的邻居信息列表  
Tab. 1 Neighbor information of node A

节点 ID	邻居	邻居的邻居
A	S(0)	A(0)
	B(0)	A(0)
	F(1)	A(0), G(1), I(2)

当 F, G, H, J, K 等备份结点侦测到邻居结点信息发生变化时, 将通过广播 Hello 消息告知自己的邻居结点.

### 1.3 路由恢复

当基本路由出现中断时, 执行路由恢复过程, 对基本路由进行动态修复. 当一个基本结点发现下游

的基本路由出现中断(可能的原因是其下游的相邻基本结点移走或能量耗尽,也有可能是结点出现故障),立即查询自己的邻居列表,找出邻居中的所有备份结点并向它们发送 Route REStore (RRES) 消息,RRES 消息的格式如图 6 所示. 如果该基本结点

消息类型	目的结点ID	目的结点序列号	发送结点ID	失效结点ID	经过的结点序列
------	--------	---------	--------	--------	---------

图 6 RRES 消息格式

Fig. 6 RRES message format

消息类型	不可达目的结点ID	不可达目的结点序列号	不可达基本结点列表
------	-----------	------------	-----------

图 7 RERR 消息格式

Fig. 7 RERR message format

一旦备份结点收到来自基本结点的路由恢复消息 RRES,将进行下列 5 个步骤的操作:

1) 首先判断收到的 RRES 是否来自于自己的下游结点,如果是则执行步骤(5),不是则继续.

2) 搜索自己的邻居列表,查找邻居结点中是否有满足条件的基本结点,这里的条件是指基本结点没有失效、收到的 RRES 不是该基本结点所发送. 如果查找到满足上述条件的基本结点,则将 RRES 转发给它;如果找不到满足条件的基本结点,则继续向下执行.

3) 在找不到满足条件的基本结点的情况下,查找自己的邻居中是否有满足条件的备份结点,这里的条件是备份结点必须是自己的下游结点. 将所有满足条件的备份结点都找出来并将 RRES 发给它们,如果没有满足要求的备份结点则继续向下执行.

4) 如果满足要求的备份结点仍然找不到,则查询自己的邻居结点中是否有初始结点,找出所有的初始结点并将 RRES 发给它们. 如果初始结点也没有找到则继续向下执行.

5) 路由恢复消息 RRES 无法继续传递,于是 RRES 被丢弃. 并向发来 RRES 的结点回复 REStore Failure (RESF) 消息,报告路由修复失败. RESF 消息的格式如图 8 所示.

消息类型	目的结点ID	目的结点序列号	接收结点ID	发送结点ID
------	--------	---------	--------	--------

图 8 RESF 消息格式

Fig. 8 RESF message format

在它的邻居列表中查询不到备份结点,则无法对基本路由实施修复,只能通知源结点重新建立路由,于是,它向源结点发送 Route Error (RERR) 消息,RERR 消息的格式如图 7 所示. 源结点收到 RERR 消息就会重新建立基本路由.

RRES,首先判断自己到达目的结点的路由是否仍然有效,如果有效,则沿 RRES 传递的逆向路由应答 REStore Reply (RESR) 消息,RESR 消息的格式如图 9 所示. 如果到达目的结点的路由已经失效,则以 RESF 消息应答,说明自己无法修复路由. 当初始结点收到来自备份结点的 RRES,首先判断自己的邻居中是否还有其他的备份结点,如果有,则将 RRES 发给它们;如果没有,则以 RESF 应答.

消息类型	目的结点ID	目的结点序列号	发送结点ID	经过的结点序列
------	--------	---------	--------	---------

图 9 RESR 消息格式

Fig. 9 RESR message format

一个结点(包括备份结点、初始结点、基本结点)可能会收到多个 RESR 应答,但它们只会接收或转发第一个 RESR,以后收到的 RESR 和 RESF 都会被丢弃. 如果一个初始结点或备份结点收到的都是 RESF 应答,则它同样以 RESF 应答发给自己 RRES 的结点. 如果发出 RRES 的基本结点收到了 RESR,则以 REStore Confirm (RESC) 消息对发出 RESR 的基本结点予以应答,RESC 消息的格式与 RESR 相同,如图 9 所示. 在 RESC 的传递过程中,不仅在 RESC“经过的结点序列”中的结点会收到 RESC,某些不在 RESC“经过的结点序列”中的结点也会收到 RESC,则前者成为基本结点,后者成为备份结点.

当发出 RRES 的基本结点收到的所有应答都为 RESF 时,说明无法对路由进行修复,必须由源结点重新建立路由. 于是它向源结点发出 RERR 消息,通知源结点重新发起路由的建立过程. 通过修复或重新建立而得到了一条新的基本路由后,不再属于基本路由的原基本结点将成为备份结点或初始结点,已经没有基本结点与其相连的原备份结点将成为初始结点. 路由恢复的完整流程如图 10 所示.

下面以图 5 为例说明路由的修复过程.

当基本结点收到来自备份结点的路由修复消息

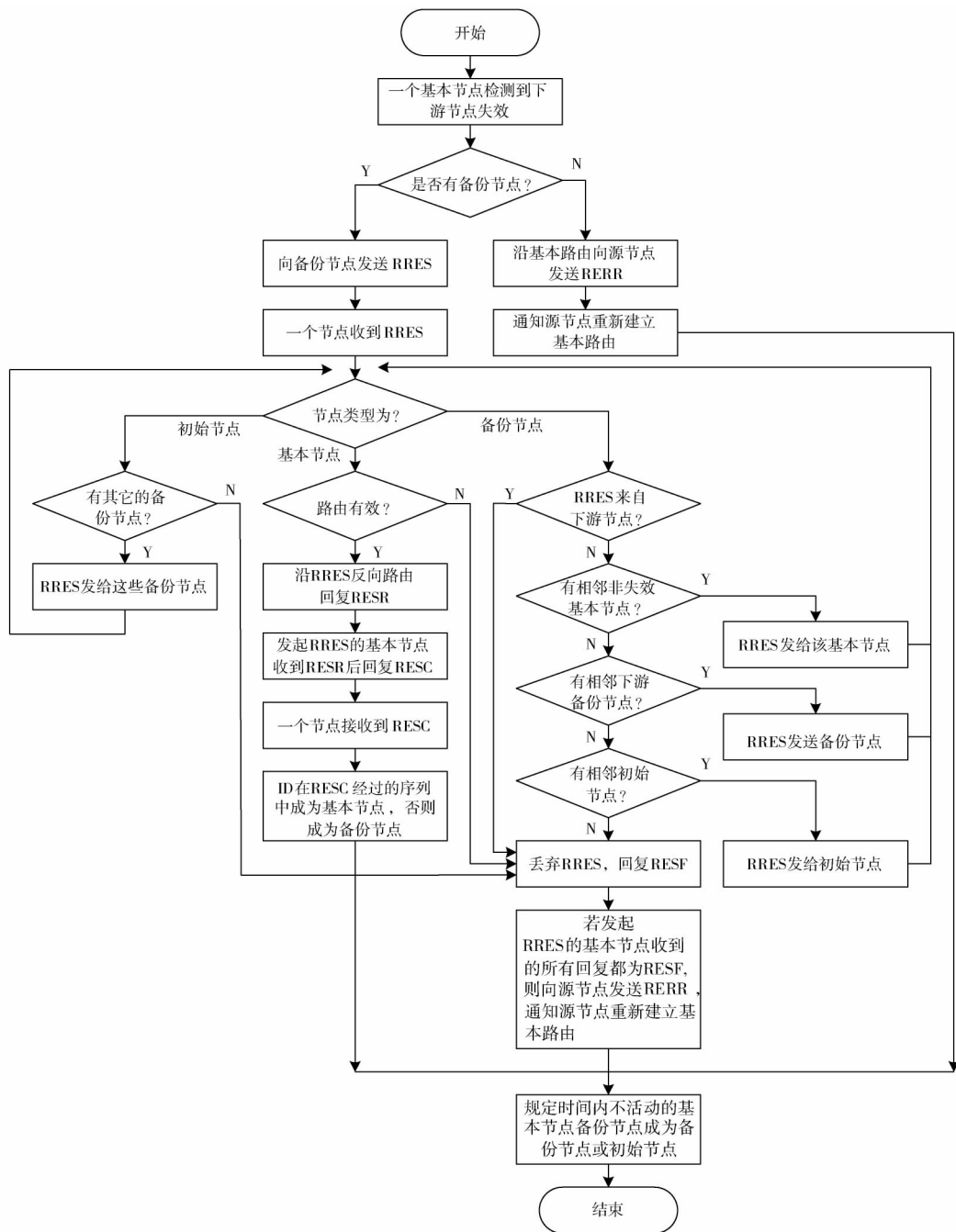


图 10 路由恢复流程图

Fig. 10 Flowchart of route recovering

### 1) B 节点出现失效的情形

B 作为基本节点, 失效将导致其与 A 之间的链路出现中断, A 结点会检测到到达目的结点 R 的基本路由失效. 由于 A 的邻居列表中有备份结点 F, 于是 A 向 F 发出 RRES 消息进行路由修复, F 收到 RRES 后, 查询到自己的邻居列表中有一个位于其下游的备份结点 G, 于是, F 就将路由修复消息 RRES 转发给结点 G. G 收到 RRES 后, 首先查找邻居中是否有基本结点, 但与 G 相连的基本结点 B 已

失效, 于是找到邻居列表中位于其下游的备份结点 H, G 随即将 RRES 消息发送给结点 H. H 收到 RRES 后, 发现自己的邻居列表中有一个运行正常的基本结点 C, H 就将收到的 RRES 发给结点 C. 这时 C 到达目的结点 R 的路由 C→D→E→R 仍然是有效路由, 所以, 当结点 C 收到 RRES 消息后, 会沿着 RRES 消息的反向路由由 C→H→G→F→A 向结点 A 发送路由修复应答消息 RESR.

基本结点 A 收到 RESR 消息后, 将沿路由 A→F

→G→H→C 向基本结点 C 回复修复确认消息 RESC. 由于 RESC 经过的结点序列 AFGHC 将成为新的基本路由的一部分, 这样原来是备份结点的 F, G, H 3 个结点将成为基本结点. 结点 I 原来是初始结点, 由于它也接收到了 RESC 消息, 但它又不属于 RESC 消息所经过的结点序列, 所以, I 由初始结点变为备份结点. 原来的备份结点 J 已没有基本结点与之相连, 所以 J 成为初始结点. 路由修复过程如图 11 所示.

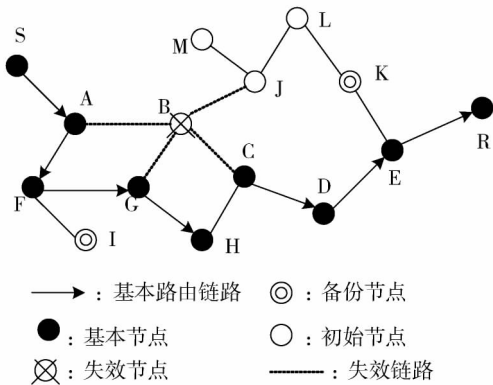


图 11 结点 B 失效时的路由修复

Fig. 11 Route recovering while node B is failed

### 2) 假设基本结点 C 失效

C 失效时, 结点 B 能侦测到自己与 C 之间的链路中断以及到达目的结点 R 的基本路由失效. B 的邻居列表中有 2 个备份结点 G 和 J, 于是, B 同时向备份结点 G 和 J 发送 RRES 消息进行路由修复. 结点 G 收到 RRES 消息后, 将它转发给位于自己下游的备份结点 H, 由于基本结点 C 已经失效, 而 H 已经只有 G 一个邻居了, 于是向 G 回复 RESF, G 将 RESF 转发给基本结点 B, B 收到 RESF 消息说明从结点 G 的方向无法修复路由. 另一个备份结点 J 从结点 B 收到 RRES 消息后, J 的其它邻居中没有备份结点, 只有 2 个初始结点 L 和 M, J 就将 RRES 消息同时发给结点 L 和 M. M 只有结点 J 一个邻居, 显然无法完成修复, 即向 J 回复 RESF. 另一个初始结点 L 收到 RRES 消息后, 因为 L 还有一个邻居结点 K 是备份结点且位于 L 的下游方向, 于是 L 就将 RRES 消息发送给结点 K, 接着 K 结点将 RRES 消息转发给基本结点 E. 由于 E 有到达目的结点 R 的路由 E→R, 所以结点 E 收到路由修复消息 RRES 后, 就沿着 RRES 消息传播的逆向路由 E→K→L→J→B 发送 RESR, 结点 J 收到 RESR 消息后, 丢弃从结点 M 收到的消息 RESF.

基本结点 B 收到 RESR 消息后, 沿路由 B→J→

L→K→E 向 E 回复路由修复确认消息 RESC, 原来的备份结点 J, K 和初始结点 L 成为基本结点, M 由初始结点变为备份结点. 由于结点 D 已经不是基本结点, 不过基本结点 E 与之相连, 所以 D 由基本结点变为备份结点. 备份结点 H 由于基本结点 C 失效而变为初始结点. 结点 C 失效后进行动态路由修复的情形如图 12 所示.

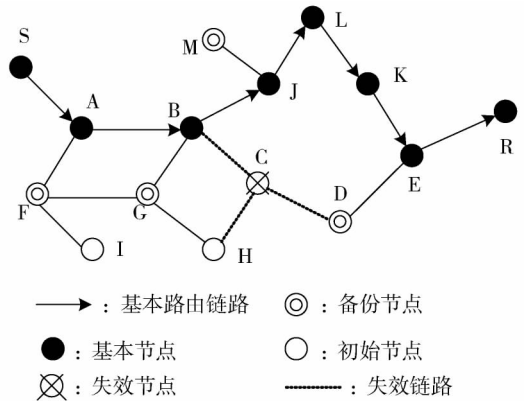


图 12 结点 C 失效时的路由修复

Fig. 12 Route recovering while node C is failed

### 3) 假设基本结点 D 失效

D 失效时, 结点 C 能检测到与结点 D 之间的链路中断以及到达目的结点 R 的基本路由失效. 由于 C 只有一个邻居 H, H 为备份结点, 于是 C 向结点 H 发送 RRES 消息进行路由恢复. 结点 H 有 2 个邻居 C 和 G, 收到 RRES 消息后, 只可能向 G 转发, 但 G 位于 H 的上游, G 收到 H 转发给它的 RRES 消息后, 将向结点 H 回复路由修复失败消息 RESF. 基本结点 C 也会收到消息 RESF, 说明路由无法修复. 在这种情况下, C 沿基本路由 C→B→A→S 向源结点 S 发送路由出错消息 RERR, 源结点 S 收到 RERR 消息后, 重新建立到达目的结点 R 的基本路由.

## 1.4 路由选择

在 FCDR 协议中, 当源结点到达目的结点的基本路由建立, 基本结点之间就建立起了到达彼此的路由. 虽然不存在基本路由的备份路由, 但结点之间的信息交互为基本路由的修复打下了基础, 一旦基本路由出现中断, FCDR 对基本路由实施快速修复, 源结点即可通过修复的基本路由向目的结点发送数据. 如果修复不成功, 源结点重新发起建立到达目的结点的基本路由. 另外, 在基本路由建立完成后, 备份结点也具备了到达目的结点的路由, 当有路由消息或数据需要发送时, 可以选择利用这些已有的路由进行传输.

## 2 洪泛控制分析

当基本路由出现中断时,FCDR 采用的是动态修复的方法,并且将路由修复请求消息控制在一定的范围内传递;如果不进行洪泛控制,就相当于由源结点重新建立一条路由.下面分析2种情况下恢复路由时消息传递的有效性,有效性的的大小由所修复路由的长度与消息数量的比值来衡量,如果以较少的消息传递能够修复长度相同的路由就说明具有更好的有效性.

首先来看不进行洪泛控制的情形,由源结点 S 广播 RREQ 重新查找到达目的结点 R 的路由,这种情况下,RREQ 的数量主要与 RREQ 的传播范围和结点的度(degree)2个因素有关.RREQ 的传播范围可以由 TTL 来控制,当 TTL = 0 时就是不对 RREQ 的传播范围进行控制,这与 TTL 取很大的值,超过网络的直径是一样的,即全网范围,这里规定 TTL > 0.对于结点的度,为了简单起见,用结点度的平均值来衡量,设结点度的平均值为  $d$ .于是,

当 TTL = 1 时,RREQ 的数量 = 1,因为是无线信道,发送一次,邻居都能收到;

当 TTL = 2 时,RREQ 的数量 =  $1 + d$ ;

当 TTL = 3 时,RREQ 的数量 =  $1 + d + d^2$ ;……

当 TTL =  $n$  时,RREQ 的数量 =  $1 + d + d^2 + \dots +$

$$d^{n-1} = \sum_{i=1}^n d^{i-1} = \frac{d^n - 1}{d - 1}.$$

设从源结点 S 到目的结点 R 的路由为  $P_{S,R}$ ,RREQ 沿  $P_{S,R}$  传播的数量即为  $P_{S,R}$  的长度,记为  $|P_{S,R}|$ .

当  $n < |P_{S,R}|$  时,RREQ 无法到达目的结点 R,找不到从源结点 S 到达 R 的路由,意味着所有的 RREQ 都是无效的,这种情况下无法恢复路由.

当  $n = |P_{S,R}|$  时,RREQ 正好可以到达目的结点 R,从而建立从 S 到达 R 的路由  $P_{S,R}$ ,这种情况下

$$\text{RREQ 的数量为: } \frac{d^{|P_{S,R}|} - 1}{d - 1}.$$

当  $n > |P_{S,R}|$  时,RREQ 的传播范围半径超出了  $|P_{S,R}|$ ,可以建立从 S 到达 R 的路由  $P_{S,R}$ ,但 RREQ 的数量大于  $\frac{d^{|P_{S,R}|} - 1}{d - 1}$ .因此,在不进行洪泛控制重新建立起路由的情况下,RREQ 消息所传递数

$$\text{量的最小值是 } \frac{d^{|P_{S,R}|} - 1}{d - 1}.$$

另外一个消息是路由应答消息 RREP 的传递,因为 RREP 是由目的结点 R 沿最优路由的反向路径

向源结点 S 发送,所以,RREP 的数量 =  $|P_{S,R}|$ .设不进行洪泛控制时的最佳有效性记为  $U_{\text{Flooding}}$ ,于是有

$$U_{\text{Flooding}} = |P_{S,R}| \div (\text{RREQ 数量的最小值} + \text{RREP 数量}) \\ = \frac{|P_{S,R}|}{\frac{d^{|P_{S,R}|} - 1}{d - 1} + |P_{S,R}|} = \frac{|P_{S,R}|(d - 1)}{d^{|P_{S,R}|} - 1 + |P_{S,R}|(d - 1)}. \quad (1)$$

接下来分析 FCDR 协议成功修复路由时的消息传递有效性,包括路由修复消息 RRES、修复应答消息 RESR、修复确认消息 RESC 等3种消息的传递.

路由修复消息 RRES 在传播中,首先是基本结点将 RRES 发给备份结点,然后是备份结点可以将 RRES 发给基本结点、备份结点和初始结点,而初始结点只能将 RRES 发给备份结点,这就将 RRES 的传播限制在基本路由两侧的两跳范围之内,而且在基本路由由一侧传递的 RRES 不会传递到基本路由的另一侧,也不会往基本路由的上游方向传递.如果设从发送 RRES 的基本结点到目的结点 R 的路由长度为  $L$ ,则 RRES 的数量  $\leq L \times (1 + d + d^2)$ .

修复应答消息 RESR 和修复确认消息 RESC 都是沿着恢复的路由段传递,所以2种消息传递的数量近似等于  $L$ .设 FCDR 协议的有效性记为  $U_{\text{FCDR}}$ ,于是

$$U_{\text{FCDR}} = |P_{S,R}| \div (\text{RRES 数量} + \text{RESR 数量} + \text{RESC 数量}) \\ \geq \frac{|P_{S,R}|}{L \times (1 + d + d^2) + 2L} = \frac{|P_{S,R}|}{L \times (3 + d + d^2)}. \quad (2)$$

$$\geq \frac{1}{3 + d + d^2}. \quad (3)$$

对式(1)和式(2)进行比较,式(1)中结点度的幂与源结点和目的结点之间的路径有关,当结点的度一定时,通过广播 RREQ 重新建立路由时消息传递的有效性随着源结点和目的结点之间的路径长度增加而急剧下降.式(2)中结点度的幂与路径长度无关且幂值最高为2,当源结点和目的结点之间的路径长度一定时,FCDR 协议修复路由时的消息传递有效性只与  $L$  有关,其取值范围是  $2 \leq L \leq |P_{S,R}|$ ,一般情况下, $L$  远小于  $|P_{S,R}|$ ,因此与式(1)相比,式(2)具有更好的有效性,而且二者之间的差距会随着源结点和目的结点之间路径长度的增加而加大.另外,相比式(1)的变化, $U_{\text{FCDR}}$  的变化幅度不是很大,呈现相对平稳的状态.式(3)表明,当  $L = |P_{S,R}|$  时, $U_{\text{FCDR}}$  达到最小,其值不低于  $\frac{1}{3 + d + d^2}$ .

### 3 结论

本文提出了一种无线自组织网络基于洪泛控制的动态路由协议 FCDR (Flooding - Controlled Dynamic Routing), 在基本路由开始建立的时候, 同时考虑当基本路由失效时如何快速恢复. 通过有限范围内结点之间的信息交互, 建立起恢复基本路由的备份路由信息, 一旦基本路由出现中断, 利用已有的备份路由信息就可以对失效的基本路由实施快速修复. FCDR 对洪泛机制的使用范围进行控制, 只允许基本结点及基本路由两侧的结点使用洪泛机制交互信息, 克服了全网洪泛开销大的缺点, 使路由由维护的有效性得到了提高. 分析表明, FCDR 在有效性方面的优势随着源结点和目的结点之间路径长度的增加而更加明显.

#### 参考文献:

[1] Perkins C E. Highly dynamic destination - sequenced distance - vector routing (DSDV) for mobile computers [C]// Proceedings of ACM SIGCOMM. London England UK; ACM, 1994.

[2] Clausen T, Jacquet P. Optimized link state routing protocol (OLSR) [S/OL]. IETF (USA), October 2003, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626>.

[3] Pei G, Gerla M, Hong X. LANMAR: landmark routing for large scale wireless ad hoc networks with group mobility [C]// Proceedings of IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. Boston; IEEE, 2000.

[4] Pei G, Gerla M, Chen T W. Fisheye state routing in mobile ad hoc networks [C]//Proceedings of the International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). Taipei; IEEE, 2000.

[5] Ogier R, Templin F, Lewis M. Topology broadcast based on reverse - path forwarding (TBRPF) [S/OL]. IETF (USA), February 2004, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3684>.

[6] Perkins C E, Belding - Royer E M, Chakeres I. Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing [S/OL]. IETF (USA); July 2003, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561>.

[7] Park V, Corson S. Temporally - ordered routing algorithm (TORA) version 1 functional specification [EB/OL]. IETF (USA); July 2001. <http://tools.ietf.org/id/draft-ietf-manet-tora-spec-04.txt/>.

[8] Johnson D, Hu Y, Maltz D. The dynamic source routing protocol (DSR) for mobile ad hoc networks for IPv4 [S/OL]. IETF (USA); February 2007, <http://www.ietf.org/rfc/rfc4728>.

[9] Toh C K. Associativity - based routing for ad hoc mobile networks [J]. Wireless Personal Communications, 1997, 4(2): 103 - 139.

[10] Haas Z J. A new routing protocol for the reconfigurable wireless networks [C] //Proceedings of IEEE 6th International Conference on Universal Personal Communications Record. San Diego, CA USA; IEEE, 1997.

[11] Guikai L, Chun L S, Gang W, et al. Subarea tree routing in multi - hop wireless ad hoc networks [C]//Proceedings of IEEE ICCS. Guangzhou, China; IEEE, 2008.

[12] 樊里略, 苏文莉, 陈佳. 一种基于文件路由表的移动 P2P 文件共享系统 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2012, 35 (1): 39 - 42.

Fan L L, Su W L, Chen J. A mobile P2P file sharing system based on file routing table [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2012, 35 (1): 39 - 42.

## Flooding - controlled dynamic routing in wireless Ad hoc network

LIU Gui - kai, LI Qing

(School of Computer Science and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Aiming at adapting broadcasting routing request message for on - demand routing maintenance in wireless ad hoc network and inducing much additional overhead, a Flooding - Controlled Dynamic Routing (FCDR) protocol was proposed. FCDR limits flooding within two hops of primary routing to decrease routing maintenance overhead and repair failed primary routing quickly, and then service stability. The message transmission efficiency of routing maintenance was analyzed. The analytical result shows that the efficiency drop rapidly with path length increment between source node and destination under the circumstance of no flooding - controlled. By contrast, FCDR has better efficiency and its advantage is more prominent with path length increment between source node and destination.

**Key words:** wireless ad hoc network; on - demand routing protocol; routing maintenance; broadcast; flooding - controlled