

# 一种基于判定区域的 AODV 路由的自适应修复算法

刘 思 张德干 刘晓欢 张 婷 吴 昊

(计算机视觉与系统部共建教育部重点实验室(天津理工大学) 天津 300384)

(天津市智能计算及软件新技术重点实验室(天津理工大学) 天津 300384)

(406690108@qq.com)

## An Adaptive Repair Algorithm for AODV Routing Based on Decision Region

Liu Si, Zhang Degan, Liu Xiaohuan, Zhang Ting, and Wu Hao

(Key Laboratory of Computer Vision and System (Tianjin University of Technology), Ministry of Education, Tianjin 300384)

(Tianjin Key Laboratory of Intelligent Computing & Novel Software Technology (Tianjin University of Technology), Tianjin 300384)

**Abstract** The significant advantages of ad hoc on-demand distance vector (AODV) in control overhead, energy consumption and bandwidth occupation make it widely used in mobile ad hoc networks (MANET). However, in the high-speed mobile environment such as emergency rescue and disaster relief, and in the environment with high requirements for delay, the self-repair of AODV routing has the problem of delay. In order to solve this problem and make the improved AODV routing protocol more suitable for the environment of rescue and relief, an adaptive repair algorithm for AODV routing based on decision region (AR-AODV) is proposed. Firstly, according to the characteristics of the network for the environment, i.e. the nodes are uniformly deployed, a search formula is proposed, and the optimal solution of the formula is obtained. Then, the condition threshold for initiating the self-repair process is determined. Finally, in order to reduce the control cost, an algorithm for determining the optimization area is given. The simulation results show that the repair algorithm improves the efficiency of the routing. The mobile devices such as vehicles that are uniformly deployed are taken as the network nodes. The adaptive repair algorithm is tested in the actual scene of rescue and relief environment. The results show that the algorithm is consistent with the simulation results, and the overall performance is improved significantly.

**Key words** mobile ad hoc networks (MANET); AODV; decision region; optimization; unified mobilizing; adaptive repair

**摘 要** 无线自组网按需平面距离向量(ad hoc on-demand distance vector, AODV)路由协议以其较低的控制开销、能量消耗和带宽占用而广泛应用于移动自组织网络(mobile ad hoc networks, MANET)。为了改善 AODV 在进行路由修复时存在的路由延迟的问题,提出了基于判定区域的 AODV 路由协议

收稿日期:2019-07-28;修回日期:2020-02-13

基金项目:国家自然科学基金项目(61571328);天津市重点自然科学基金项目(18JCZDJC96800);天津市科技重大专项(15ZXDSGX 00050);天津市科技创新团队基金项目(TD12-5016, TD13-5025, TD2015-23);天津科技服务业科技重大专项(16ZXFWGX00010, 17YFZCGX00360)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61571328), the Tianjin Key Natural Science Foundation (18JCZDJC96800), the Major Projects of Science and Technology in Tianjin (15ZXDSGX 00050), the Training Plan of Tianjin Science and Technology Innovation Team (TD12-5016, TD13-5025, TD2015-23), and the Major Projects of Science and Technology for Their Services in Tianjin (16ZXFWGX00010, 17YFZCGX00360).

通信作者:张德干(gandegande@126.com)

的自适应修复算法(adaptive repair algorithm for AODV routing based on decision region, AR-AODV).首先根据抢险救灾网络中节点是被统一调配的特点,提出搜寻公式,求出该公式的最优解;然后确定自修复过程发起的条件阈值;最后给出判定寻优区域的算法,减少控制开销.仿真结果表明,该修复算法改善了路由的效率.以接受统一调配的车载等移动设备为网络节点,在实际抢险救灾环境场景中对提出的自适应修复算法进行测试.结果显示,与仿真结果基本一致,整体性能改善明显.

**关键词** 移动自组织网络;无线自组网按需平面距离向量;判定区域;寻优;统一性调配;自适应修复

**中图法分类号** TP393.4

移动自组织网络(mobile ad hoc networks, MANET)是不依赖基础设施,自组织、可重构的多跳无线网络<sup>[1-3]</sup>.在抢险救灾环境中,散布的节点之间的通信依靠 MANET 实现.在 MANET 网络中,节点的移动性以及通信半径的限制,使得数据的传输相比传统网络更加复杂<sup>[4-5]</sup>.适用实际环境的高效路由技术的研究尤其重要.目前针对 MANET 的路由协议已取得一些成果,本文主要研究针对抢险救灾环境,使用路由协议的自适应修复技术.

在实施抢险救灾时,为了迅速实施救灾,自建建立 MANET.这是一种节点被统一调配的网络,即节点接受统一调配的高速移动的 MANET 网络.针对自组织网络特点和路由需求,国内外相关研究人员和机构以避免路由环路、控制路由开销、动态适应网络为目的,设计开发了不同方式的路由协议<sup>[6-8]</sup>.按照路由建立方式的不同,网络路由协议可分为先应式路由协议、按需路由协议和混合型路由协议<sup>[9-12]</sup>.无线自组网按需平面距离向量(ad hoc on-demand distance vector, AODV)路由协议作为典型的按需路由协议之一,可以自适应在移动自组织网络中完成数据传输<sup>[13-16]</sup>.路由建立的过程为:源节点首先通过组播方式广播路由请求(routing request, RREQ)信息.网络中的其他节点(不是目的节点)接收到 RREQ 后,在该节点缓存的路由记录里搜寻包含可以传送到目标节点的路由.如果包含,则该节点单向广播路由应答(routing response, RREP)信息;不包含,则继续广播 RREQ 信息<sup>[17-20]</sup>.

根据 AODV 的性质可知,当路由发生故障时, AODV 路由自身会进行路由维护,如果在维护时间内路由没有完成修复,故障节点则向源节点发送错误信息,源节点接收到错误信息以后,会再次发起路由建立的过程<sup>[21-24]</sup>.关于 AODV 路由协议的防洪控制改进算法有一些进步,但是针对环境的自适应修复很少,所以基于防洪控制的自适应修复算法研究很有必要<sup>[25-27]</sup>.

为了解决 AODV 路由在路径失效后才进行路由修复引起的网络延迟、扩大开销、影响网络生命周期等问题,提出了基于判定区域的 AODV 路由协议的自适应修复算法(an adaptive repair algorithm for AODV routing based on decision region, AR-AODV),目的是使改善后的路由更适应抢险救灾的 MANET 网络.本文首先根据网络中节点做统一性移动的特性,建立最优搜寻公式,并求出该公式的最优解;提出自修复过程发起的条件阈值;最后给出确定寻优区域的算法.仿真结果表明,该算法改善了平均端到端时延,减少了控制开销,并提高了数据包分组交付率.

## 1 相关研究

已有的相关研究中,文献[28]提出了一种具有速度感知的 AODV 路由改进算法 SA-AODV.SA-AODV 在路由发现阶段,根据节点的位置和通信半径以及节点间的相对移动速度选出一部分在通信范围内且与数据发送节点相对移动速度较小的路由节点,然后通过节点间的相对移动速度评估出每条可到达目的节点的路由线路的有效生存时间,根据有效生存时间的长短选择最佳路由方案.实验表明,SA-AODV 路由算法更适合运用在高速移动的节点网络中.文献[29]提出了一种基于网络拓扑变化,结合源路由的按需距离矢量路由算法 DS-AODV.DS-AODV 协议根据网络拓扑复杂性,采用高效的路由发现维护策略,使节点合理的使用网络带宽资源;根据对相邻节点移动预测链路持续时间结合节点最大速度分析网络拓扑稳定性,并通过不同稳定程度在路由发现过程加入源路由机制和路由维护周期更新机制,从而选择稳定性高的路由.结果表明,在拓扑变化不同的各种环境下提出的方法的平均分组投递率高,且综合端到端时延小.

为了更适应抢险救灾的 MANET 网络,解决 AODV 路由在路径失效后才进行路由修复引起的

网络整体效率的问题,提出了基于判定区域的 AODV 路由协议的自适应修复算法(AR-AODV).通过实验仿真以及实际场景测试,证明该算法有效改善了路由的效率.

## 2 自修复算法原理

### 2.1 寻优算法原理

**定义 1.** 自修复节点.在 AODV 路由中任意一条数据传输路径,如果在某一时间,链路发生故障,导致路径失效,则该故障链路的上一跳节点称为自修复节点.

**定义 2.** 最优节点.把自修复节点为了修复失效路由而搜索出的下一跳节点,称为最优节点.

**定义 3.** 联合概率密度.设最优节点分布在网络拓扑中的位置为  $M(x_t, y_t)$ ,自修复节点的分布位置设为  $G(x_t, y_t)$ ,则自修复节点寻找最优节点的过程(寻优过程)与最优节点的分布位置的联合概率密度设为  $p_f(m, G)$ :

$$p_f(m, G)dm = P[m \leq M \leq m + dm | S_{G(\varphi)}], \quad (1)$$

其中,  $0 \leq \varphi \leq t$ ,  $S_{G(\varphi)}$  表示自修复节点朝  $G(\varphi)$  这个方向没有搜寻到最优节点.

搜寻最优节点的概率  $h$ :

$$h = 1 - \int_{\text{region}} p_f(m, G)dm, \quad (2)$$

其中, region 表示最优节点在网络中分布的范围.

自修复节点搜寻最优节点的寻优过程的公式为

$$dp_f/dt = \left\{ -\beta(x_t, y_t, G) + \frac{1}{2}d^2(h_{11}(x_t, y_t)p_f)/dx_t^2 + d^2(h_{12}(x_t, y_t)p_f)/dx_t dy_t + \frac{1}{2}d^2(h_{22}(x_t, y_t)p_f)/dy_t^2 \right\}. \quad (3)$$

设  $T$  为自修复节点搜寻到最优节点的时间,则搜寻成功的所需要的平均时间为

$$E[T] = \int_0^\infty P[T > t]dt = \int_0^\infty \int_{\text{region}} p_f(m_t, G)dm dt. \quad (4)$$

假设在不同时间点对最优节点进行搜寻的过程是相互独立的,则自修复节点在  $t_1$  时的联合概率分布为:

$$p_f(m_{t+\Delta t}, U) = p_f(m_t, U)(1 - h(m_t, U)\Delta t), \quad (5)$$

$t_1 = t + \Delta t$ ,  $h(m_t, U)$  表示自修复节点沿着路径  $U$  搜寻最优节点的概率函数.

得到统一性调配的寻优公式:

$$p_{f_t}(m_t, U) = - \sum_{j \in N} (km_t p_f(m_t, U))_{x_j} - h(m_t, u) p_f(m_t, U), \quad (6)$$

其中,  $N$  为网络的最大节点数.

**引理 1.** 网络拓扑中节点接受统一调配,此场景下自修复节点可以通过 Ray-Algorithm 搜寻出最优节点<sup>[30]</sup>.

证明.由节点接受统一调配,此场景下建立的寻优等式(6)得出:

$$p_{f_t} + \sum_{j \in N} k_j m_t p_{f_{m_j}} = - p_f \left[ \sum_{j \in N} \partial k_j / \partial m_j + h(m_t, u) \right]. \quad (7)$$

令  $\Omega = \sum_{j \in N} \partial k_j / \partial x_j$ , 则式(7)可以记为

$$p_{f_t} + \sum_{j \in N} k_j m_t p_{f_{m_j}} = - p_f [\Omega + h(m_t, u)], \quad (8)$$

且  $m_j(0) = m_0$ .

得出:

$$dp_f/dv = - p_f [\Omega + h(m_t, t(\varphi), U(\varphi))], \quad (9)$$

$$p_f(0) = p_{f_0}(m_0).$$

利用 Ray-Algorithm 求式(9)的解,表示为

$$p_f(m_t, U) = p_{f_0}(m_0) \exp \left[ - \int (h(m_g, g, U_g) + \Omega(m_g, g)) dg \right]. \quad (10)$$

至此,采用 Ray-Algorithm 可计算出最优节点的寻优公式的解,即自修复节点可以通过 Ray-Algorithm 搜寻出最优节点得证. 证毕.

**定理 1.** 节点受统一性调配的 MANET,对 AODV 路由的任意自修复节点采用 Ray-Algorithm 搜寻最优节点其搜寻结果是最优解.

证明.1)根据引理 1 可知 AODV 路由的任意自修复节点采用 Ray-Algorithm 可以搜寻出最优节点.

2)设在  $t$  时,最优节点在搜索范围空间内的位置为  $m(x, y)$ ,自修复节点为  $m(x_0, y_0)$ ,使在  $t$  时以  $m(x_0, y_0)$  为起点的射线通过  $m(x, y)$ .如果  $p_{f_0}(m(x_0, y_0)) = 0$ ,有  $p_f(m_t(x, y), U) = 0$ ,算法结束;否则,根据等式(10)计算方程  $p_f(m_t(x, y), U) = 0$ <sup>[30]</sup>.所以,采用 Ray-Algorithm 搜寻的结果是最优解.

至此,节点受统一性调配的 MANET, AODV 路由的任意自修复节点采用 Ray-Algorithm 搜寻到的最优节点为最优解得证. 证毕.

**定义 4.** 寻优区域.根据定理 1,将自修复节点搜寻最优节点区域设为以自修复节点为顶点、自修复节点与目的节点的连线为中轴线的扇形区域,称为寻优区域.

设定的寻优区域可以在减少控制开销的同时增大自修复过程的成功率,而寻优区域的半顶角  $\psi$  的取值由 MANET 网络中节点运动状态、移动速度和能量大小等决定.当  $\psi^0=0$  时,寻优区域为经过目的节点的射线,搜寻到的节点则为通过 Ray-Algorithm 求得的最优解;当  $\psi^0=2\pi$  时,寻优区域变成整个圆区域,寻优过程转换为 AODV 路由自带修复过程.所以,顶角增大,寻优区域就变大,而控制开销则增多.

### 2.2 发起自修复的条件算法

AODV 路由发生失效时,以全网泛洪的方式广播路由信息<sup>[31]</sup>,增加了网络的控制开销,本文将通过限定区域来研究如何以更小的开销,建立发起自修复与网络环境的映射关系.

当节点 A 的传输路径  $l_i=1$ ,路由中任意节点 A 的最大传输距离为  $R$ ,稳定传输距离为  $r$ .当节点 A 的邻居节点位于稳定区域内时,传输路径强健;而当邻居节点移动到最大距离区域时,传输路径开始变得不稳定.因此节点从传输稳定距离移出进入最大距离时,应为最佳发起自修复时刻,所以稳定传输距离的边界设定为路由发起修复的条件.当节点 B 到达稳定传输距离边界时,节点 B 向节点 A 广播路由修复判定分组 (route repair decision report, RRDR),节点 A 接收到 RRDR 后,发起路由自修复.

为了减少控制开销,本文以节点的接收功率来判断节点移动变化,进而确定是否发起路由修复.也就是说,把稳定传输的距离的边界接收功率设为条件阈值,建立距离与路由修复的映射关系,在路由情况变差前提前发起修复.如图 1 所示:

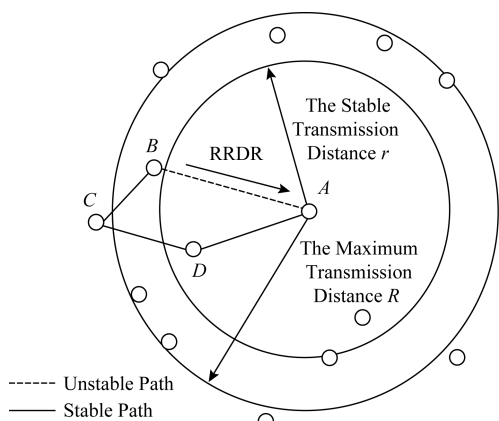


Fig. 1 Initiating self-repairing mapping relationships

图 1 发起自修复的映射关系

计算节点的接收功率  $S_r$ :

$$S_r = S_t / d^n, \tag{11}$$

其中,  $d$  表示发送数据节点与接收数据节点间的距离,  $S_s$  表示节点的发送功率,  $n$  是可调参数,本文设  $n=3$ .

因为稳定传输距离的边界接收功率为条件阈值,则发起路由修复的条件阈值为

$$S_{th} = S_{se} / r^n, \tag{12}$$

其中,  $r=R-\tau$ .

节点的接收功率的平均值为:

$$S_{r-av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_r^i, \tag{13}$$

当  $S_{r-av} < S_{th}$  时,则节点发起路由修复过程.

**算法 1.** 发起路由修复的条件算法.

```

Ptmp = Pmatrix(hopE, :); /* 条件算法 */
Precv = mean(Ptmp(find(Ptmp < 100)));
/* 计算功率平均值 */
if Precv < Pth /* 启动路由修复定时器 */
    Trepair = Trepair + 1;
    Counter_RRDR = 1; /* 跳数计数器 */
end if
if flag_1 = 1
    if distance(hopE) > (distance(hopS) +
        transmat(hopS, hopE))
        distance(hopE) = (distance(hopS) +
            transmat(hopS, hopE));
        queue = [queue, hopE];
    end if
end if
    
```

### 2.3 寻优区域的判定算法

通过确定寻优区域,必先确定最优节点所在位置.为了计算方便,减少不必要的控制开销,本文以最优节点的角度来代替其所处拓扑的位置.而节点的角度以节点接受数据的角度代替.AODV 数据传输的是从上一跳节点向邻居节点传输.以  $i$  代表节点  $A_i$  的跳数值.设节点  $A_i$  在网络中的角度为  $\alpha_i$ ,表示从跳数为  $i+1$  的节点接收数据的角度.跳数为  $i$  的节点直接向目的节点传输数据的角度为  $\delta_i$ .如图 2 所示:

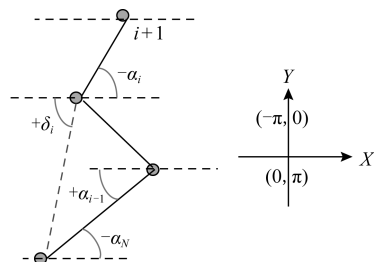


Fig. 2 The angle of nodes located in the network

图 2 节点所处网络的角度

$$\delta_i = \sum_{j=i}^N \alpha_j, \quad (14)$$

其中,  $\alpha_j \in (-\pi, +\pi]$ . 如图 2 所示, 处于  $x$  轴上方的传输方向为正向.

节点的寻优区域的判定算法处理步骤, 描述如下:

1) AODV 中某条路由中节点  $C$  的传输路径  $l_C=1$ , 某一时刻, 计算得出节点  $C$  的平均接收功率小于阈值, 判定传输路径不稳定, 节点  $C$  向上一跳节点  $B$  发送 RRDR. RRDR 包含  $ID_{MAC}, S_r, t_r$  三个信息, 其中  $S_r$  代表节点的接收功率,  $t_r$  代表节点的接收时间. 当网络中的节点收到一个 RRDR, 就在判定报告 RRDR 中更新  $ID_{MAC}, S_r, t_r$  信息.

2) 节点  $B$  接收到 RRDR, 发起路由自修复过程, 广播路由修复请求 (query repair, QRYR), QRYR 记录角度  $\delta_B$  信息, 并加入一个预设的半顶角  $\psi^0$ .

3) 节点  $A$  收到 QRYR, 计算节点  $A$ 、节点  $B$  与目的节点  $D$  的夹角  $\angle ABD = \psi$ , 由已知的节点  $A$  和节点  $E$  的角度  $\alpha_A$  和  $\alpha_E$ , 可以计算得出  $\psi = |\alpha_A + \alpha_E + \delta_B|$ , 其中  $|\alpha_A| = -\alpha_A, |\alpha_E| = +\alpha_E, |\delta_B| = -\delta_B$ . 如图 3 所示:

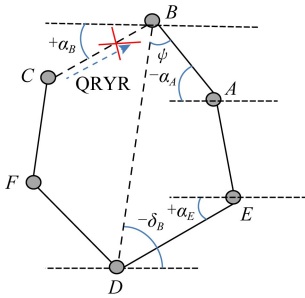


Fig. 3 Calculating for all angles  
图 3 各个角度计算

4) 当  $\psi \leq \psi^0$  时, 节点  $A$  位于寻优区域内. 利用式(14)计算得到节点的  $\delta_A$ , 并记录到 QRYR 中. 如果当  $\psi > \psi^0$  时, 节点  $A$  不在寻优区域内, 该节点删除 QRYR 报告.

**算法 2. 角度计算.**

```

theta_0 = arctan((Y(hopE) - Y(hopS)) /
(X(hopE) - X(hopS))); /* 角度的计算 */
if flag_2 == 1
theta_0 = arctan((Y(hopE) - Y(hopS)) /
(X(hopE) - X(hopS)));
dist_2 = dismatrix(hopE, :);
[V, I] = sort(dist_2);
end if
    
```

**2.4 AR-AODV 算法描述**

本节提出基于判定区域的 AODV 路由协议的自适应修复算法. 首先对自修复节点搜寻最优节点建立寻优公式, 根据 Ray-Algorithm 确定搜寻结果, 并证明该搜寻结果即为搜寻最优节点过程的最优解; 然后给出判定自修复的条件算法, 确定自修复过程发起的条件阈值. 为了减少控制开销, 给出寻优区域定义并提出确定寻优区域的算法. 具体实现步骤如图 4 所示:

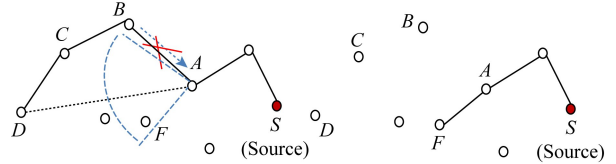


Fig. 4 Searching for optimal nodes by self-repairing nodes  
图 4 自修复节点搜寻最优节点

具体描述如下:

1) AODV 中路由的任意节点, 据式(12)计算节点的条件阈值  $S_{th}$ . 当节点  $B$  根据式(11)得出节点的接收功率的平均值  $S_{r-av}$ , 此时,  $S_{r-av} < S_{th}$ , 节点  $B$  检查出自身传输路径值  $l_C=1$  时, 节点  $B$  向上一跳节点  $A$  发送路由修复判定报告 RRDR, 通知上一跳节点  $A$  进行路由自修复, 并根据式(4)求得  $T_{re}$ , 开启路由修复定时器记为  $T_{re}$ .  $T_{re}$  表示修复失效路径的时间. 初始化高度值计数器  $Counter_{RRDR}$ . 节点  $A$  收到判定报告 RRDR 并转发时,  $Counter_{RRDR}$  加 1, 调用算法 1.

2) 当节点  $A$  收到记录  $Counter_{RRDR}$  的 RRDR 报告后, 将在  $\psi_0 = \pi/3$  寻优区域内广播记录节点  $A$  的与目的节点角度的 QRYR 修复数据包, 调用算法 2. 根据式(6)(9)建立寻优公式搜寻, 此处调用算法 3, 据式(10)在寻优区域内搜索最优节点.

3) 节点  $F$  收到 QRYR 数据包, 计算夹角  $\angle FAD$ , 即  $\psi$ , 当  $\psi \leq \psi^0$  时, 则接收到 QRYR 报告的节点  $F$  位于寻优区域中. 该节点根据式(14)计算得到  $\delta_F$ , 并将结果写入 QRYR 中重新广播发送. 当  $\psi > \psi^0$  时, 节点  $F$  处于修复区域之外, 该节点将丢弃接收到的节点  $A$  的 QRYR 报告. 此处调用算法 4. 直到目的节点收到 QRYR 并发送新的 QRYR, 完成路由更新, 则确定路由自适应修复完成. 图 4 给出了 AODV 协议中任意一个节点自修复的过程.

4) AODV 中自修复节点与目的节点间的跳数之差距不能大于修复长度阈值  $MaxRepair\_l$ , 否则自修复节点不能发起修复. QRYR 的修复长度  $Tl$ , 设为

$\max(\text{MinRepair}_l, 0.5 \times i_{th}) + \text{LocalAdd}_l$ ,

其中  $i_{th}$  表示超出传输范围的节点的高度值,  $\text{MinRepair}_l + \text{LocalAdd}_l \leq 1$ .

5) 在修复定时器  $T_{re}$  时间内, 自修复节点收到目的节点的 QRYR 报告, 则 AODV 自适应修复完成. 如果  $T_{re}$  超时, AODV 的自修复节点将广播删除报告, 删除失效路由.

**算法 3.** 寻优搜索最优节点.

```
if  $flag_3 == 1$  /* Ray-Algorithm 的伪代码 */
  Ker = 3
  for  $jj = 1 : Ker$ 
     $\theta(jj) = \arctan((Y(I(jj)) - Y(hopS)) / (X(I(jj)) - X(hopS)))$ ;
  end for
end if
 $\theta_{total} = \text{sum}(\theta)$ ;
if  $\theta_{total} > \theta_0$ 
  if  $\text{transmat}(hopS, hopE) \leq \text{MaxRepair}_l$ 
     $queue = [queue, hopE]$ ;
     $parent(hopE) = hopS$ ;
  end if /* 判断是否在最大修复距离之内 */
end if
```

**算法 4.** QRYR 数据包处理算法.

```
if  $Precv < pth$  /* 链路质量变差 */
  counter = 0;
  while  $flag == 1$ 
    counter = counter + 1;
     $dist_2 = \text{dismatrix}(hopE, :)$ ;
     $[V, I] = \text{sort}(dist_2)$ ;
    Ker = 3;
  end while
  if  $Ker + counter \geq \text{length}(I)$ 
    flag = 0;
    for  $jj = counter : Ker + counter$ 
       $\theta(jj) = \arctan((Y(I(jj)) - Y(hopS)) / (X(I(jj)) - X(hopS)))$ ;
       $\theta_{total} = \text{sum}(\theta)$ ;
    end for
  end if
end if
if  $\theta_{total} > \theta_0$  /* 位于修复区域之外 */
  queue = [];
```

$flag_4 = 1$ ;

```
if  $flag_4 == 1$ 
   $hNC = \text{lenfth}(queue)$ ;
  sets =  $\max(\text{MinRepair}_l, 0.5 \times i_{th} + \text{LocalAdd}_l)$ ;
  if sets >  $\text{MinRepair}_l + \text{LocalAdd}_l$ 
    /* 修复长度大于修复节点到目的节点的跳数 */
    queue = [queue, hopE];
     $parent(hopE) = hopS$ ;
  end if
end if
if  $\text{transmat}(hopS, hopE) \leq \text{MaxRepair}_l$ 
  /* 判断是否在最大修复距离之内 */
  queue = [queue, hopE];
   $parent(hopE) = hopS$ ;
end if
```

### 3 议仿真与分析

#### 3.1 仿真环境设置

本实验借助 MATLAB 平台, 对本文提出的 AR-AODV 自适应修复算法进行仿真分析. 将本文协议和经典的 AODV 协议及已提出的 SA-AODV 协议<sup>[28]</sup>和 DS-AODV 协议<sup>[29]</sup>进行对比. 分别在不同的节点数据包发送速率、不同的节点移动速度、不同的网络节点数目以及链路失效率, 对节点之间平均端到端的时延、数据包分组交付率、路由拓扑控制开销进行仿真分析. 本节仍采用 Random Way-point 移动模型<sup>[30]</sup>仿真统一性调配运动. 仿真参数如表 1 所示:

**Table 1 Simulation Parameters**

**表 1 仿真参数**

Parameter of Simulation	Value
Node Distribution Range/m	1 000 × 1 000
Total Number of Nodes	50
Initial Energy of the Node/J	1
Node Communication Radius/m	250
Node Movement Speed/(m · s <sup>-1</sup> )	[0 V <sub>max</sub> ], V <sub>max</sub> = 10
Packet Delivery Rates/s	[0 S <sub>max</sub> ], S <sub>max</sub> = 10
Packet Length/b	1 024
Reliable Communication Radius/m	240

Continued (Table 1)

Parameter of Simulation	Value
Link Failure Rate/(packet·s <sup>-1</sup> )	1
Maximum Transmission Rate/Mbps	2
MAC Layer Protocol	IEEE 802.11 DCF
$\psi_0$	$\pi/3$
$T_{\text{repair}}/\text{ms}$	250
$n$	3
Standard Output Power/W	100

仿真实验主要测量指标有 3 个:

1) 平均端到端时延. 从节点产生数据流或者接收到数据后开始, 到该数据成功被下一跳节点接收的平均延时时间.

2) 数据包递交率. 每个节点除了发送路由维护信息包之外, 还需要发送自己的消息信息数据包, 根据源节点发送的数据包数量和目的节点接收到的数据包数量, 计算出数据包成功递交率.

3) 拓扑控制开销. 由于 AODV 为按需路由协议, 路由请求普遍采用泛洪广播形式. 且路由一旦建立, 除非出现路由不再使用或路由异常中断这 2 种情况, 否则节点都会维护该路由. 所以, 对这些维护路由拓扑信息的数据包开销进行分析.

实验仿真的网络拓扑如图 5 所示:

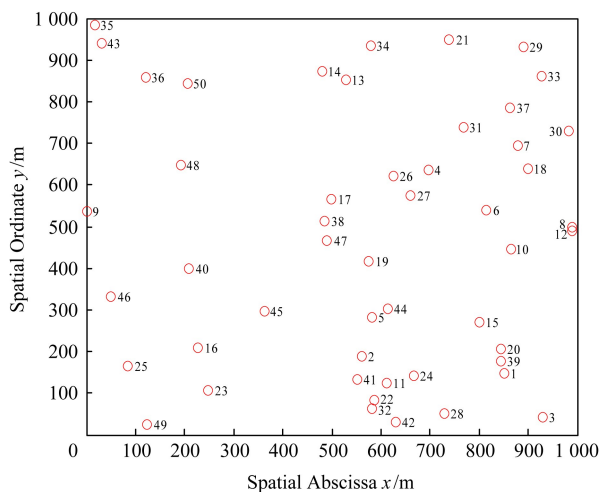


Fig. 5 Network topology diagram of experimental simulation

图 5 实验仿真的网络拓扑图

### 3.2 仿真结果分析

图 6~8 为在节点速度不变、不同数据包发送速率的情况下各种路由算法的网络性能变化.

如图 6~8 所示, 随着数据包发送速率的提高, 网

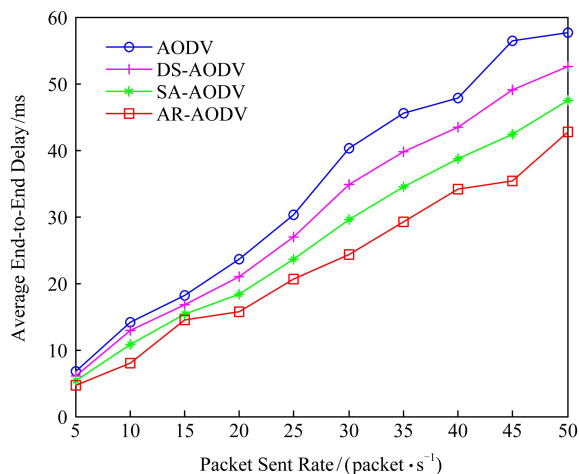


Fig. 6 Average end-to-end delay diagrams with different packet delivery rates

图 6 不同的数据包发送率下平均端到端的时延

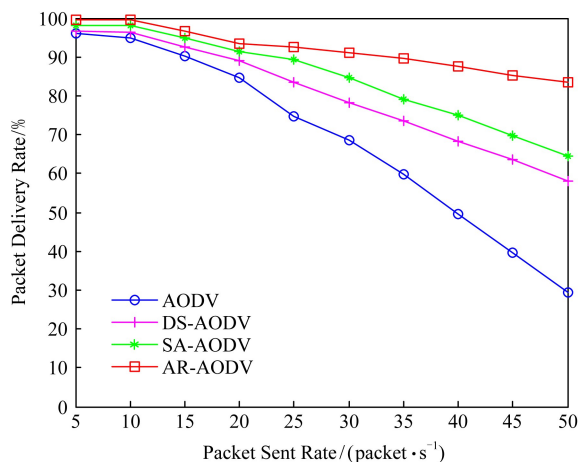


Fig. 7 Packet delivery rate with different packet delivery rates

图 7 不同的数据包发送率下数据包分组交付率

络的平均端到端时延、网络的路由控制拓扑开销都是增长趋势, 而数据包交付率则呈整体下降趋势. 因为随着数据包发送速率的提高, 网络中数据增多, 导致整个网络拥挤, 发送数据需要排队, 更加重网络的负载, 导致网络延时增大. 但是本文提出的 AR-AODV 算法, 相比传统 AODV 时延减少 30% 左右, 比 DS-AODV 减少时延 21% 大小, 比 SA-AODV 减少 10% 左右. 实验仿真表明, 提出的算法整体时延减少效果显著. 网络负载增大、网络控制请求大量增多导致网络路由控制开销增大. 实验仿真结果显示, 本文提出的 AR-AODV 路由算法, 比传统 AODV 控制开销降低 35% 左右, 与 DS-AODV, SA-AODV 相比, 控制开销分别降低 28% 和 19% 左右. 控制开销改进明显.

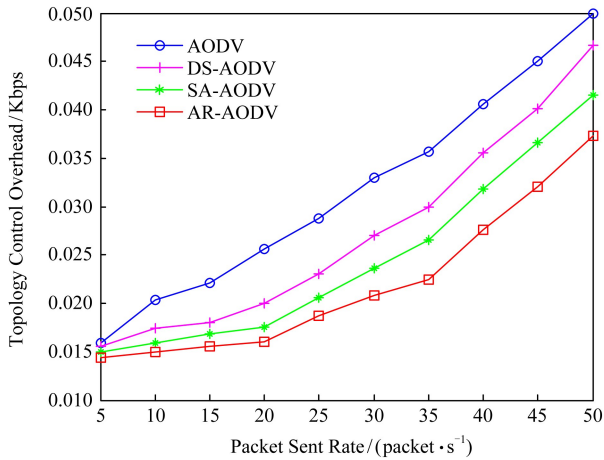


Fig. 8 Routing topology control overhead with different packet transmission rates

图 8 不同的数据包发送率下路由拓扑控制开销变化

链路失效、网络拥堵,导致的数据包传输需要排队,导致交付率明显降低,但是本文提出的算法交付率提高明显.比传统 AODV 数据包交付率提高 31%左右,与 DS-AODV,SA-AODV 相比,数据包交付率分别提高 15%和 9%左右.

图 9~11 在不同的节点速度下对网络应用不同的改进路由所产生的网络平均端到端时延、网络的路由控制拓扑开销和数据包交付率进行仿真分析.

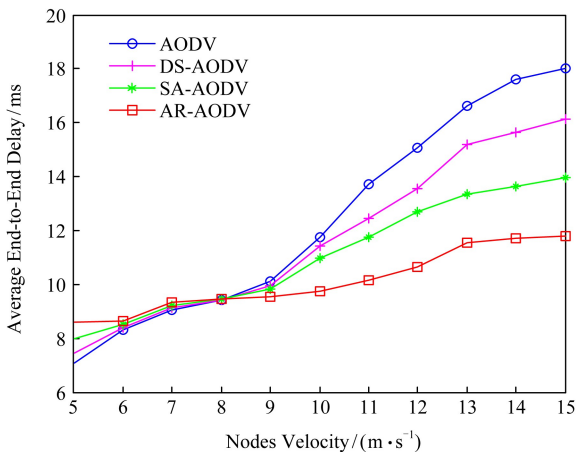


Fig. 9 Average end-to-end delay variation with different node speeds

图 9 不同节点速度下平均端到端时延变化

图 9 表明随着节点速度增大,4 种改进路由的网络的平均端到端时延都是增加趋势.图 10 表明随着节点速度增大,4 种改进路由的数据包分组交付率是减少的,图 11 表明随着节点速度增大,4 种改进路由的路由拓扑控制开销也是增大的.网络的节点

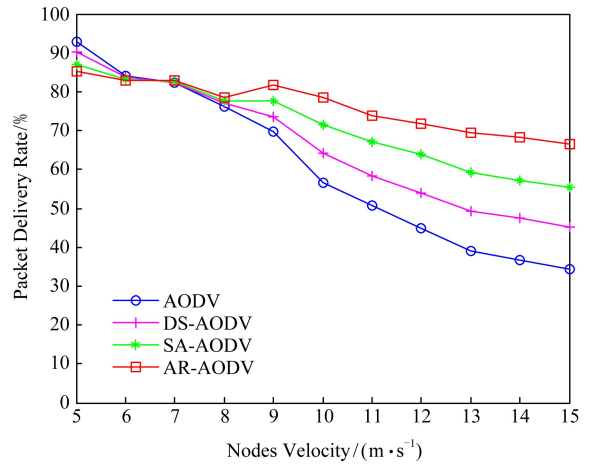


Fig. 10 Packet delivery rate with different node speeds

图 10 不同节点速度下数据包分组交付率变化

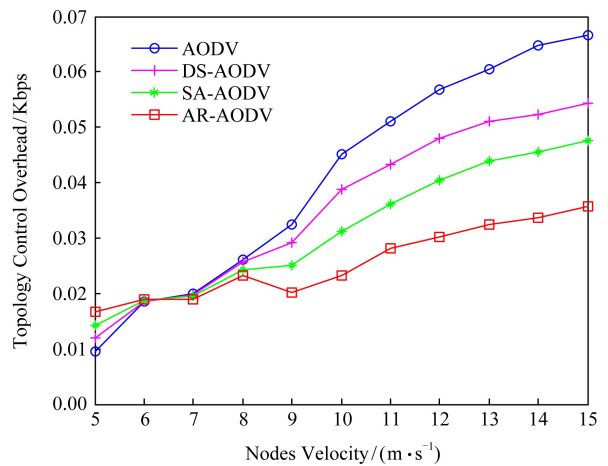


Fig. 11 Routing topology control overhead with different node speeds

图 11 不同节点速度下路由拓扑控制开销变化

速度增大,导致整个网络的移动性加大,链路失效率大大增加,从而导致数据传输受阻,传输数据进行排队等待,网络拥堵网络时延增大明显.而修复路由导致路由控制开销增长、整个网络数据交付率下降.但是本文提出的 AR-AODV 算法,在减少时延方面,比传统 AODV 时延减少 30%左右,比 DS-AODV 减少时延 20%大小,比 SA-AODV 减少 15%左右.比传统 AODV 数据包交付率提高 28%左右,与 DS-AODV,SA-AODV 相比,数据包交付率分别提高 25%和 20%左右;比传统 AODV 控制开销降低 50%左右,与 DS-AODV,SA-AODV 相比,控制开销分别降低 33%和 25%左右.控制开销改进效果明显.



图 12~14 通过不断增大网络密度即增加网络节点数目,来分析网络应用不同的改进路由所产生的网络的平均端到端时延、网络的路由控制拓扑开销和数据包交付率的变化规律。

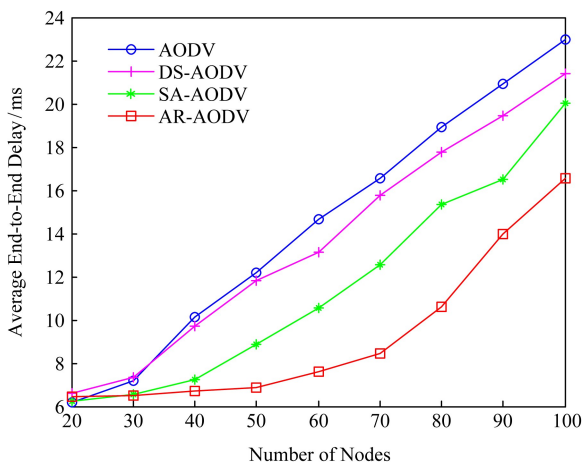


Fig. 12 Average end-to-end delay with different number of nodes

图 12 不同节点数目下平均端到端时延变化

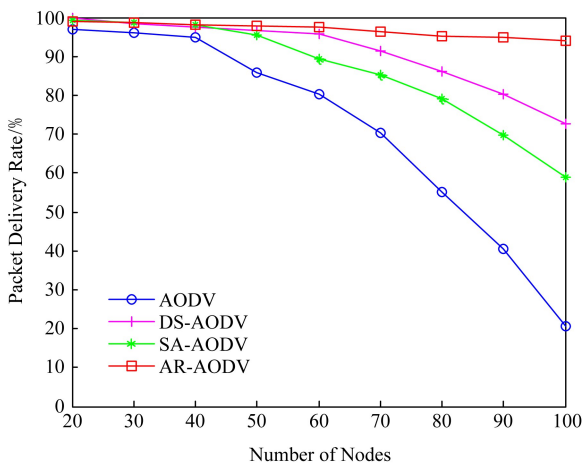


Fig. 13 Packet delivery rate with different number of nodes

图 13 不同节点数目下数据包分组交付率变化

图 12 表明随着网络密度的增大,网络的平均端到端时延增大.图 13 表明随着节点数目增多,数据包分组交付率也随之降低.图 14 所示随着节点数目增多,路由拓扑控制开销也增大.网络中节点数目增多,路由失效率降低,路由修复导致的时延、开销也增大,而数据包交付率降低速度也减慢.本文提出的改进算法随着节点数目增多效果越明显.提出的 AR-AODV 算法,在减少时延方面,比传统 AODV 时延减少 45%左右,比 DS-AODV 减少时延 40%大

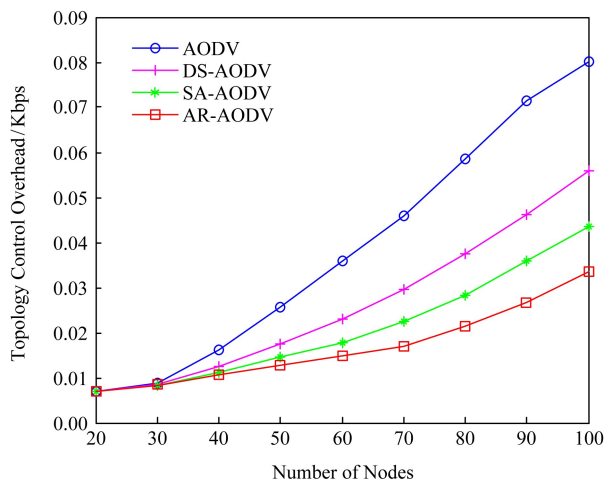


Fig. 14 Routing topology control overhead with different number of nodes

图 14 不同节点数目下路由拓扑控制开销变化

小,比 SA-AODV 减少 35%左右.比传统 AODV 数据包交付率提高 70%左右,与 DS-AODV, SA-AODV 相比,数据包交付率分别提高 30%和 25%左右;比传统 AODV 控制开销降低 60%左右,与 DS-AODV, SA-AODV 相比,控制开销分别降低 30%和 25%左右.整体控制开销改进效果明显.

如图 15 所示,在不同的链路失效率,对网络应用不同的改进路由所产生的网络的平均端到端时延的变化进行仿真分析.结果表明随着链路失效率的增大,4 种改进路由的网络的平均端到端时延都是增加趋势.网络的链路失效率增大,数据传输受阻,网络拥堵网络时延增大明显.但是本文提出的 AR-AODV 路由修复算法,在减少时延方面,比传统

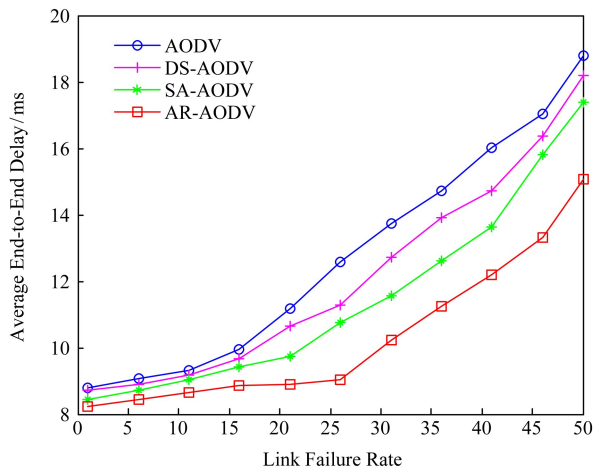


Fig. 15 Average end-to-end delay with different link failure rates

图 15 不同链路失效率下平均端到端时延变化

AODV 时延减少 39%左右,比 DS-AODV 减少时延 37%大小,比 SA-AODV 减少 34%左右.在改进路由修复方面效果明显.

### 3.3 实际场景测试

本文研究基于实际抢险救灾等服从统一调配的应用背景下,即网络节点做确定性移动的环境.为了验证本改进算法的实际效果,我们在实际抢险环境中,在 1000 m×1000 m 的范围内实际随机布置 50 个车载等移动网络节点,统一调配.实验参数布置如表 2 所示:

Table 2 Test Parameters

表 2 测试参数

Parameter of Simulation	Value
Node Distribution Range/m	1000×1000
Total Number of Nodes	50
Initial Energy of the Node/J	1
Node Communication Radius/m	250
Node Movement Speed/(m·s <sup>-1</sup> )	[0 V <sub>max</sub> ], V <sub>max</sub> = 10
Packet Delivery Rate/s	[0 S <sub>max</sub> ], S <sub>max</sub> = 10
Packet Length/b	1024
Reliable Communication Radius/m	240
Link Failure Rate/(packet·s <sup>-1</sup> )	1
Maximum Transmission Rate/Mbps	2
MAC Layer Protocol	IEEE 802.11 DCF
$\psi_0$	$\pi/3$
$T_{repair}/ms$	250
$n$	3
Standard Output Power/W	100

MANET 在被灾害所导致无线基站被毁、通信线路瘫痪、道路交通受限的极端环境中仍能够实现稳定高效的通信,满足抢险救援过程中的通信指挥功能需求.MANET 网络拓扑结构如图 16 所示:

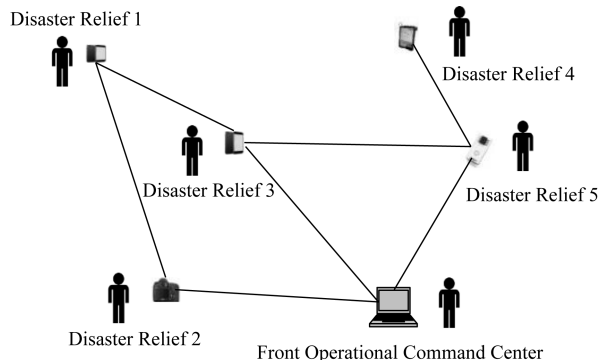
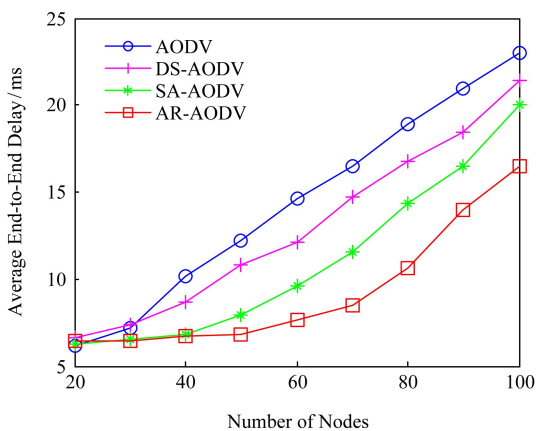


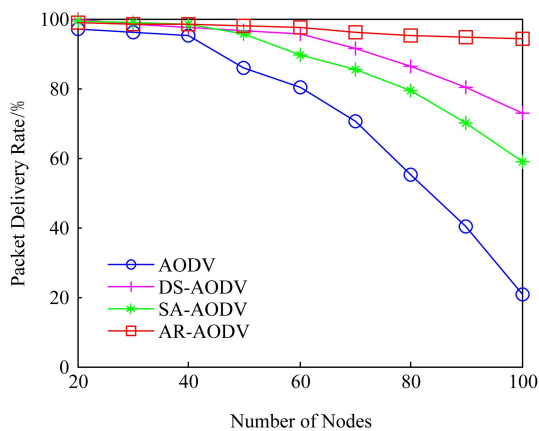
Fig. 16 The topology of MANET network

图 16 MANET 网络拓扑结构

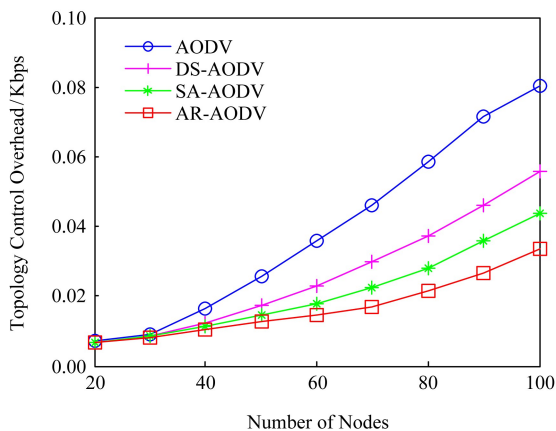
如图 17~1 显示,提出的 AR-AODV 改进算法在实际环境的结果略低于仿真效果,但是与仿真结果基本一致,且与 SA-AODV 协议<sup>[28]</sup>和 DS-AODV 协议<sup>[29]</sup>相比,无论在控制开销、数据包交付率,还是



(a) Change of average end-to-end delay



(b) Change of packet delivery rate



(c) Change of topology control overhead

Fig. 17 Network performance with different number of nodes

图 17 不同节点数目下网络性能变化

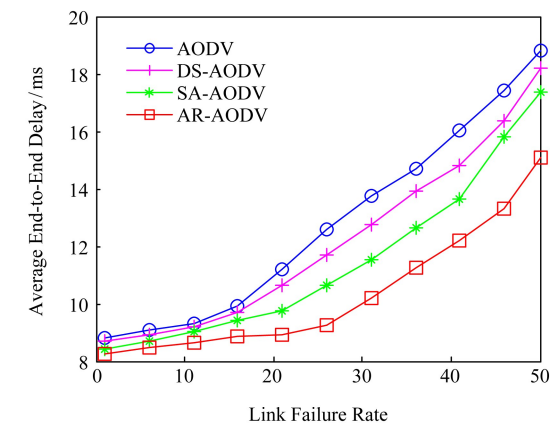
端到端时延都有明显的改善,说明所提出的算法在实际抢险环境中能够取得期待效果,能够降低控制开销同时减少网络时延,AR-AODV 算法基本实现改进效果。

## 4 结 论

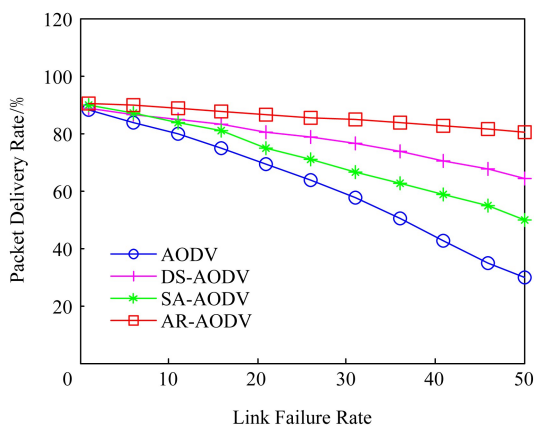
本文主要研究了针对抢险环境构建的 MANET 网络在应用 AODV 进行数据传输时,网络环境变化导致路径失效后的修复问题.目的是使改进后的 AODV 更适应抢险救灾网络的数据传输.首先将 AODV 路由的修复问题转换成自修复节点对最优节点的寻优问题,建立统一性调配网络的寻优公式,求出公式解,并证明该解为最优解;然后将发起路由自修与节点距离建立映射关系,提出节点进行自修复的条件算法,计算出条件阈值,根据节点距离变化自适应地发起路由修复;最后提出自修复节点的寻优区域确定算法,既提高了路由的自修复的成功率,又减少了控制开销.仿真结果表明,提出的 AR-AODV 自适应算法在改善网络控制开销方面效果明显,在提高数据包分组交付率方面也获得明显的效果,明显改善了节点之间平均端到端的时延.为了进一步分析所提算法的实际应用效果,以车载等移动设备为网络节点,并服从统一调配,在实际抢险救灾环境中进行测试.结果显示,提出的 AR-AODV 算法在实际场景中大大减低了控制开销,提高了数据包交付率,且改善了端到端时延,整体性能改善明显。

## 参 考 文 献

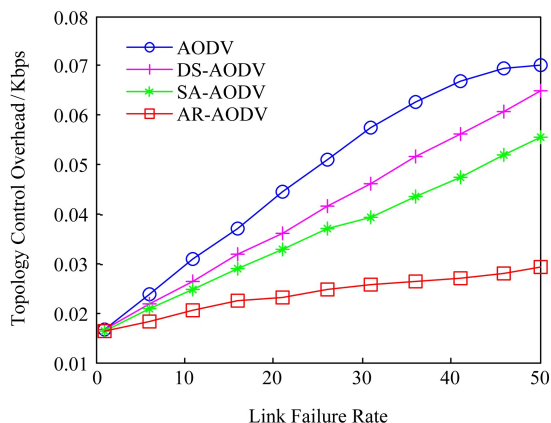
- [1] Li Guangyu, Boukhatem L, Wu Jinsong. Adaptive quality-of-service-based routing for vehicular ad hoc networks with ant colony optimization [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(4): 3249-3264
- [2] Zhou Shan, Tang Yameng. A low duty cycle efficient MAC protocol based on self-adaption and predictive strategy [J]. Mobile Networks & Applications, 2018, 23(4): 828-839
- [3] Edoardo F, Alessandro C. Lattice-based turn model for adaptive routing [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2018, 29(5): 1117-1130
- [4] Zhang Degan, Zhang Ting. A new power-resource allocation algorithm with interference restraining based on FBMC-OQAM [J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(11): 2511-2521 (in Chinese)  
(张德干, 张婷. 一种基于 FBMC-OQAM 干扰抑制的功率资源分配新算法[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(11): 2511-2521)
- [5] Nadeem J, Saman C, Mariam A. Balanced energy consumption based adaptive routing for IoT enabling underwater WSNs [J]. IEEE Access, 2017, 5(1): 10040-10051



(a) Change of average end-to-end delay



(b) Change of packet delivery rate



(c) Change of topology control overhead

Fig. 18 Network performance with different link failure rates

图 18 不同链路失效率下网络性能变化

- [6] Fei Ning, Xu Lijie, Cheng Xiaohui. Implementation and evaluation of cooperative routing in software defined wireless networking [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2019, 56(5): 967-976 (in Chinese)  
(费宁, 徐力杰, 成小慧. 基于软件定义无线网络的协作式路由实现和性能分析[J]. *计算机研究与发展*, 2019, 56(5): 967-976)
- [7] Zhang Degan, Gao Jinxin, Liu Xiaohuan. Novel approach of distributed & adaptive trust metrics for MANET [J]. *Wireless Networks*, 2019, 25(6): 3587-3603
- [8] Zhang Mingxiao. Research on improvement of Internet of things routing algorithm based on AODV [J]. *Practical Electronics*, 2017, 33(24): 55-59
- [9] Niu Hongli, Liu Si. Novel PEECR-based clustering routing approach [J]. *Soft Computing*, 2017, 21(24): 7313-7323
- [10] Li Ruangyu, Lila B, Wu Jinsong. Adaptive quality-of-service-based routing for vehicular ad hoc networks with ant colony optimization [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(4): 3249-3264
- [11] Zhang Ting, Zhang Jie. A kind of effective data aggregating method based on compressive sensing for wireless sensor network [J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018, 15(2): 145-159
- [12] Stratis I, Edmund Y. Jointly optimal routing and caching for arbitrary network topologies [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(6): 1258-1275
- [13] Tang Yameng, Cui Yuya. Novel reliable routing method for engineering of Internet of vehicles based on graph theory [J]. *Engineering Computations*, 2019, 36(1): 226-247
- [14] Tu Panpeng, Wang Xingwei, Li Jie, et al. BIRI: A BBO-inspired MSN routing algorithm with information-centric paradigm support [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2019, 56(9): 1918-1926 (in Chinese)  
(涂盼鹏, 王兴伟, 李婕, 等. BIRI: 支持信息中心范型的 BBO 启发式 MSN 路由算法[J]. *计算机研究与发展*, 2019, 56(9): 1918-1926)
- [15] Cui Yuya, Zhang Ting. New quantum-genetic based OLSR protocol (QG-OLSR) for mobile ad hoc network [J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 80(1): 285-296
- [16] Tang Mingtang, Lin Xiaola, Maurizio P. The repetitive turn model for adaptive routing [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2017, 66(1): 138-146
- [17] Zhang Ting, Dong Yue. Novel optimized link state routing protocol based on quantum genetic strategy for mobile learning [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2018, 42(1): 37-49
- [18] Zhang Degaan, Song Xiangdong. A kind of new anti-collision approach based on ID [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2015, 52(12): 2725-2735 (in Chinese)  
(张德干, 宋孝东. 一种基于关联 ID 的防碰撞新方法[J]. *计算机研究与发展*, 2015, 52(12): 2725-2735)
- [19] Liu Si, Liu Xiaohuan. Novel dynamic source routing protocol (DSR) based on genetic algorithm-bacterial foraging optimization (GA-BFO) [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2018, 31(11): 41-60
- [20] Chen Jieqiong, Mao Guoqiang. Capacity of cooperative vehicular networks with infrastructure support: Multiuser case [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(2): 1546-1560
- [21] Zhang Ting, Liu Xiaohuan. Novel self-adaptive routing service algorithm for application in VANET [J]. *Applied Intelligence*, 2019, 49(5): 1866-1879
- [22] Guo Hong, Li Yongcheng, Li Longfei. Adaptive modulation and regeneration-aware routing and spectrum assignment in SBPP-Based elastic optical networks [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 125-141
- [23] Tang Minghua, Lin Jin, Maurizio P. The suboptimal routing algorithm for 2D mesh network [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2018, 67(5): 704-716
- [24] Zhang Ting, Liu Xiaohuan. Novel self-adaptive routing service algorithm for application in VANET [J]. *Applied Intelligence*, 2019, 49(5): 1866-1879
- [25] He Rongxi, Lei Tianying, Lin Ziwei. Multi-constrained energy-saving routing algorithm in software-defined data center networks [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2019, 56(6): 1219-1230 (in Chinese)  
(何荣希, 雷田颖, 林子薇. 软件定义数据中心网络多约束节能路由算法[J]. *计算机研究与发展*, 2019, 56(6): 1219-1230)
- [26] Liu Si, Liu Xiaohuan. Dynamic analysis for the average shortest path length of mobile ad hoc networks under random failure scenarios [J]. *IEEE Access*, 2019, 7(1): 21343-21358
- [27] Mehdi H, Hamzeh B. Impairment-aware many cast routing, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks [J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2019, 11(5): 179-189
- [28] He Dong, Yu Jiyan. Speed aware routing algorithm for multi-missile network based on AODV [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(5): 137-141
- [29] Hu Bo, Chen Kansong, Gu Haoshuang, et al. Improved on-demand routing protocol based on network topology change [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2019, 40(3): 589-593
- [30] Qin Danyang. Research on self-adaptive routing algorithms for mobile ad hoc network [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2011
- [31] Costa R L, Drummond C A. New distance-adaptive modulation scheme for elastic optical networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(2): 282-285



**Liu Si**, born in 1987. PhD from Tianjin Key Laboratory of Intelligent Computing and Novel Software Technology, Key Laboratory of Computer Vision and System, Ministry of Education, Tianjin University of Technology. Her main research interests include WSN and industrial application.



**Liu Xiaohuan**, born in 1988. PhD candidate in Tianjin University of Technology. Her main research interests include WSN and mobile computing.



**Zhang Degan**, born in 1970. PhD from Northeastern University. He was a visiting professor of the School of Electronic and Information Engineering, University of Sydney, Australia in 2018. Professor of Tianjin Key Laboratory of Intelligent Computing and Novel Software Technology, Key Laboratory of Computer Vision and System, Ministry of Education, Tianjin University of Technology. His main research interest is service computing.



**Zhang Ting**, born in 1973. PhD candidate in Tianjin University of Technology. Her main research interest is WSN.



**Wu Hao**, born in 1994. PhD candidate in Tianjin University of Technology. His main research interests include WSN and mobile computing.

## 《计算机研究与发展》征订启事

《计算机研究与发展》(Journal of Computer Research and Development)是中国科学院计算技术研究所和中国计算机学会联合主办、科学出版社出版的学术性刊物,中国计算机学会会刊。主要刊登计算机科学技术领域高水平的学术论文、最新科研成果和重大应用成果。读者对象为从事计算机研究与开发的研究人员、工程技术人员、各大专院校计算机相关专业的师生以及高新企业研发人员等。

《计算机研究与发展》于1958年创刊,是我国第一个计算机刊物,现已成为我国计算机领域权威性的学术期刊之一。并历次被评为我国计算机类核心期刊,多次被评为“中国百种杰出学术期刊”。此外,还被《中国学术期刊文摘》、《中国科学引文索引》、“中国科学引文数据库”、“中国科技论文统计源数据库”、美国工程索引(EI)检索系统、日本《科学技术文献速报》、俄罗斯《文摘杂志》、英国《科学文摘》(SA)等国内外重要检索机构收录。

国内邮发代号:2-654;国外发行代号:M603

国内统一连续出版物号:CN11-1777/TP

国际标准连续出版物号:ISSN1000-1239

### 联系方式:

100190 北京中关村科学院南路6号《计算机研究与发展》编辑部

电话: +86(10)62620696(兼传真); +86(10)62600350

Email: crad@ict.ac.cn

http://crad.ict.ac.cn