

一种基于节点状态预测机制的高稳定性路由设计

李添泽^{*①②} 武穆清^{①②} 武岳巍^①

^①(北京邮电大学 北京 100876)

^②(先进信息网络北京实验室 北京 100876)

摘要: 该文旨在为拓扑动态变化的无线自组织网络设计一种稳定性路由机制。首先建模分析了动态变化网络中节点间通信路径存在的条件,以及数据包在该路径上可靠传输的条件,基于以上分析提出了保证路径有效的关键指标:链路持续时间、拥塞可能性因子。接下来提出基于节点当前运动情况计算链路持续时间,以及基于缓冲区队列长度与队列长度变化率计算节点拥塞可能性因子的算法。结合链路持续时间与节点拥塞可能性等信息,该文提出了一种面向路径可靠性及稳定性综合指标的按需路由机制(ODRP-DR),并利用NS2仿真平台对该机制性能进行分析,仿真结果表明,在网络拓扑结构动态变化的情况下能有效减小数据包丢包概率,路由重建次数。

关键词: 无线自组织网; 动态拓扑; 链路持续时间; 拥塞可能性; 稳定路由

中图分类号: TP393.08

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)06-1394-07

DOI: 10.11999/JEIT160923

High Stability Routing Design Based on the Node Status Predicting

LI Tianze^{①②} WU Muqing^{①②} WU Yüwei^①

^①(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

^②(Beijing Laboratory of Advanced Information Network, Beijing 100876, China)

Abstract: A high stability routing mechanism for the dynamic wireless Ad-hoc network is designed. Firstly, the condition of link existing between the dynamic nodes and the condition that packets can successfully transport across the link are analyzed. Based on the above analysis, two key indicators of link duration and congestion probability factor, which guarantee the effectiveness of the link are proposed. Secondly, the method to calculate the link duration based on the current movement states of those nodes, and the method to calculate the congestion probability factor based on the queue length of the buffer are put forward. Then, combining the link duration and the congestion probability factor, an On-Demand Routing Protocol based on link Duration and Reliability (ODRP-DR) is proposed. Finally, simulations are conducted to evaluate the effectiveness of the routing mechanism in NS2. The results show that the proposed routing mechanism can effectively reduce the probability of packet loss and routing reconstruction.

Key words: Ad hoc network; Dynamic topology; Path duration time; Congestion probability; Stable routing

1 引言

无线自组织网络有快速部署、动态组网、高抗毁性等优点,在军事通信、抗震救灾、工业控制等方面具有广阔的应用前景。无线自组织网络中传统的路由协议是以跳数等信息为参数建立路由,由于

网络结构的动态变化链路断裂的情况频繁发生,此时使用该链路通信的路由随之失效,触发源节点重新寻路,造成控制包开销增大,数据包丢失加重,端到端时延上升^[1]。面对以上问题,在移动自组织网络的相关领域研究人员进行大量研究,文献[2,3]分析了在车联网中节点间存在稳定链路的概率,文献[4]在考虑节点速度与加速度的情况下对节点间的链路连接时间进行分析,文献[5]利用马尔科夫链模型对链路上节点间的距离间隔进行建模,分析了节点距离间隔的分布特性,文献[6-10]从不同方面探讨了无线自组织网络中链路维持时间的预测方法。文献[10]首先统计链路质量信息,然后基于扩展链接支配集的方法来提高链路的稳定性,文献[11]根据节点少

收稿日期: 2016-09-12; 改回日期: 2017-02-21; 网络出版: 2017-04-14

*通信作者: 李添泽 litianze@bupt.edu.cn

基金项目: 网络体系构建与融合实验室主任基金(2016BKL-NSAC-ZJ-06), 国家科技重大专项 2016 年项目(2016ZX03001009-003)

Foundation Items: Director Funds of Laboratory of Network System Architecture and Convergence (2016BKL-NSAC-ZJ-06), The National Science and Technology Major Projects of 2016 (2016ZX03001009-003)

量接收信号强度样本值建立牛顿插值多项式描述连续时间域上的信号强度，进而在不预测节点运动方向和速度等相关参数的情况下估计链路生存时间。无线自组织网络中稳定链路连接是数据包传输的必要条件，由于无线自组织网中节点的资源、无线带宽有限等限制，我们必须考虑网络的拥塞状况，以保障数据包可靠传输。文献[12]基于主动避免拥塞的设计思想，依据节点的拥塞预知度、剩余能量等指标提出了一种基于拥塞预知的多径寻优路由协议。文献[13]将缓冲区队列长度信息并引入状态机对节点的拥塞程度进行评估，提出一种适用于无线传感器网络的信息可靠传输协议。文献[14]提出了一种基于节点运动感知与拥塞预测的任播协议。文献[15,16]研究了在无线自组织网络中拥塞控制与负载均衡的方法。文献[17]提出基于信号强度监测来预测链路质量，进而提出基于链路质量的拥塞控制方法。以上文献都是从链路稳定状态或网络拥塞等单方面考虑路由稳定性问题，本文将两者结合起来，综合考虑链路稳定状态与网络拥塞情况，进而设计一种高稳定性路由机制。

本文首先建模分析动态变化网络中节点间通信路径存在的条件，以及数据包在该路径上可靠传输的条件，接下来基于节点当前运动情况提出节点间链路持续时间预测算法，基于缓冲区队列长度与队列长度变化率提出节点拥塞可能性因子，最后结合链路持续时间与节点拥塞可能性等信息，提出了一种面向路径可靠性及稳定性综合指标的按需路由机制(On-Demand Routing Protocol based on link Duration and Reliability, ODRP-DR)，并利用 NS2 仿真平台对该机制性能进行验证分析。

2 问题分析

在无线自组织网络中，引起路径失效的因素主要有节点移动性与网络拥塞，本文从以上两点出发，对路径有效的条件进行分析。

无线自组织网络中信息以无线信号的形式传输，由于无线信号的衰减特性，当节点间距离较大时由于连接中断信息便不能正常传输。假设网络中相邻两个节点 i, j 之间的距离为 r_{ij} ，节点间可以保持连接的最大距离为 r_{\max} ，假设节点 i, j 间存在连接 $l(i, j)$ 的概率为 p_l ：

$$p_l = P(r_{ij} < r_{\max}) \quad (1)$$

对于网络中的某条路径 Pt_n ，假设其由 k 条链路组成，对路径 Pt_n 中的 k 条链路从源节点到目的节点依次排序，第 i 条链路记为 l_i ，则路径 Pt_n 连通的概率 Φ_n 为

$$\Phi_n = P(r_{l1} < r_{\max}, r_{l2} < r_{\max}, \dots, r_{lk} < r_{\max}) \quad (2)$$

对于节点 i ，假设其 t_0 时刻的位置为 $L_i(t_0) = [x_i(t_0), y_i(t_0)]^T$ ，则节点 i, j 间的距离可表示为

$$r_{ij}(t_0) = \sqrt{(x_i(t_0) - x_j(t_0))^2 + (y_i(t_0) - y_j(t_0))^2} \quad (3)$$

假定 t_0 时刻节点 i, j 间链路存在，即： $r_{ij}(t_0) = |L_i(t_0) - L_j(t_0)| < r_{\max}$ 。

在时间 $(t_0, t_0 + \Delta t)$ 内，节点 i 的速度为： $v_i(t) = [v_i^x(t), v_i^y(t)]$ ，则在时刻 $t_0 + \Delta t$ 节点 i 的位置为

$$\begin{aligned} L_i(t_0 + \Delta t) &= \begin{bmatrix} x_i(t_0) \\ y_i(t_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_i^x(t_0 + \Delta t) \\ s_i^y(t_0 + \Delta t) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_i(t_0) \\ y_i(t_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} v_i^x(s) ds \\ \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} v_i^y(s) ds \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

此时节点 i 与节点 j 间的距离可表示为

$$r_{ij}(t_0 + \Delta t) = |L_i(t_0 + \Delta t) - L_j(t_0 + \Delta t)| \quad (5)$$

在 $t_0 + \Delta t$ 时刻，链路 $l(i, j)$ 存在的概率为

$$p_l(t_0 + \Delta t) = P(r_{ij}(t_0 + \Delta t) \leq r_{\max}) \quad (6)$$

则对于路径 Pt_n ，根据式(2)可知 $t_0 + \Delta t$ 时刻该路径存在的概率 $\Phi_n(t_0 + \Delta t)$ 为

$$\begin{aligned} \Phi_n(t_0 + \Delta t) &= P(r_{l1}(t_0 + \Delta t) \leq r_{\max}, r_{l2}(t_0 + \Delta t) \\ &\leq r_{\max}, \dots, r_{lk}(t_0 + \Delta t) \leq r_{\max}) \end{aligned} \quad (7)$$

假设网络中节点 i 在 t_0 时刻的队列长度 $QL_i(t_0)$ ，节点最大队列长度为 $QL_{i, \max}$ ，在时间 $(t_0, t_0 + \Delta t)$ 内数据包到达率为 $v_{i, \text{arr}}(t)$ ，节点的服务速率为 $v_{i, \text{ser}}(t)$ ，则

$$\begin{aligned} QL_i(t_0 + \Delta t) &= QL_i(t_0) + \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} v_{i, \text{arr}}(t) dt \\ &\quad - \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} v_{i, \text{ser}}(t) dt \end{aligned} \quad (8)$$

若 $QL_i(t) > QL_{i, \max}$ ，则节点进入拥塞状态，故在 $t_0 + \Delta t$ 时刻节点可以提供服务的条件为

$$\begin{aligned} QL_i(t_0) + \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} v_{i, \text{arr}}(t) dt - \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} v_{i, \text{ser}}(t) dt \\ < QL_{i, \max} \end{aligned} \quad (9)$$

3 模型建立

3.1 链路持续时间

假设节点在连续的几个时间间隔内保持匀速直线运动，两节点 i, j 间的相对运动情况可以看做一个节点固定，另一节点按相对速度运动。假设节点相对运动速度为 v ，节点间的相对距离可以通过测量信号强度获得。假设节点 i 在 s 点静止，节点 j 以相对运动速度 v 在其周围经过，节点 i, j 间链路存在的最大距离为 R ，如图 1 所示。

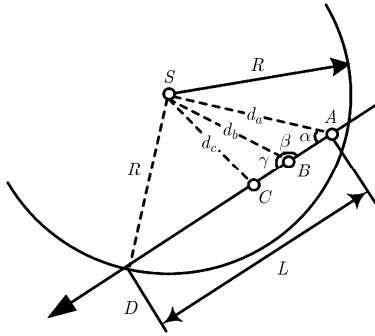


图 1 两节点相对运动示意图

定理 1 假设节点 j 初始时刻在 A 点, 与 i 的距离为 d_{sa} , Δt 时间之后到达 B 处, 与 i 的距离为 d_{sb} , $2\Delta t$ 时间之后到达 C 处, 与 i 的距离为 d_{sc} , 则节点 i , 节点 j 间链路持续时间为

$$T_{ij} = \frac{d_{sa} \cos \alpha + \sqrt{R^2 - d_{sa}^2(1 - \cos \alpha^2)}}{v} - 2\Delta t$$

其中,

$$v = \frac{\sqrt{\frac{1}{2}(d_{sa}^2 + d_{sc}^2) - d_{sb}^2}}{\Delta t}, \cos \alpha = \frac{d_{sa}^2 + (v \cdot \Delta t)^2 - d_{sb}^2}{2d_{sa} \cdot (v \cdot \Delta t)}$$

证明 在 $\triangle BAS, \triangle BCS$ 中由余弦定理可知:

$$d_{sb}^2 + |AB|^2 - 2d_{sb} \cdot |AB| \cos \beta = d_{sa}^2 \quad (10)$$

$$d_{sb}^2 + |BC|^2 - 2d_{sb} \cdot |BC| \cos \gamma = d_{sc}^2 \quad (11)$$

由于节点在连续的几个时间间隔内保持匀速直线运动, 故单位时间内走过的距离相等:

$$|AB| = |BC| = v \cdot \Delta t \quad (12)$$

联立式(10), 式(11), 式(12)并求解可得

$$v = \frac{\sqrt{\frac{1}{2}(d_{sa}^2 + d_{sc}^2) - d_{sb}^2}}{\Delta t} \quad (13)$$

在 $\triangle SAB$ 中:

$$d_{sa}^2 + |AB|^2 - 2d_{sa} \cdot |AB| \cos \alpha = d_{sb}^2 \quad (14)$$

由式(14)可知:

$$\cos \alpha = \frac{d_{sa}^2 + (v \cdot \Delta t)^2 - d_{sb}^2}{2d_{sa} \cdot (v \cdot \Delta t)} \quad (15)$$

在 $\triangle SAD$ 中,

$$d_{sa}^2 + |AD|^2 - 2d_{sa} |AD| \cos \alpha = R^2 \quad (16)$$

$|AD| = l, l \geq 0, R \geq d_{sa}$, 式(16)可转化为

$$d_{sa}^2 + l^2 (\cos \alpha^2 + \sin \alpha^2) - 2d_{sa} \cdot l \cos \alpha = R^2 \quad (17)$$

由于 $l \geq 0, R \geq d_{sa}$, 求解式(17)可得

$$l = d_{sa} \cos \alpha + \sqrt{R^2 - d_{sa}^2(1 - \cos \alpha^2)} \quad (18)$$

j 节点在 C 处, 经 T_{ij} 时间后达到 D 处, 此后便不在 i 节点的覆盖范围内, 则可知节点 i 和 j 维持连接的时间为: $T_{ij} = d_{sa} \cos \alpha + \sqrt{R^2 - d_{sa}^2(1 - \cos \alpha^2)} / v - 2\Delta t$,

定理 1 得证。

规定无线自组织网络中一条路径 Pt_n 的持续时间为该路径中所有链路持续时间的最小值, 即

$$T_{Pt_n} = \min_{l(i,j) \in Pt_n} (T_{ij}) \quad (19)$$

易知路径 Pt_n 在路径持续时间内连通的概率 Φ_n 为 1, 超过路径持续时间后便不再连通。

$$\Phi_n(t_0 + t) = \begin{cases} 1, & t \leq T_{Pt_n} \\ 0, & t > T_{Pt_n} \end{cases} \quad (20)$$

3.2 节点拥塞可能性因子

由式(8)可知:

$$\int_{t_0 - \Delta t}^{t_0} v_{i,arr}(t) dt - \int_{t_0 - \Delta t}^{t_0} v_{i,ser}(t) dt = QL_i(t_0) - QL_i(t_0 - \Delta t) \quad (21)$$

在微小的时间间隔 $(t_0 - \Delta t, t_0)$ 内可认为节点数据包到达率 $v_{i,arr}(t)$ 与节点服务速率 $v_{i,ser}(t)$ 为固定值, 即 $v_{i,arr}(t) = v_{i,arr}(t_0)$, $v_{i,ser}(t) = v_{i,ser}(t_0)$, 由式(21)可知:

$$v_{i,arr}(t_0) - v_{i,ser}(t_0) = [QL_i(t_0) - QL_i(t_0 - \Delta t)] / \Delta t \quad (22)$$

规定:

$$T = \frac{QL_{i,max} - QL_i(t_0)}{v_{i,arr}(t_0) - v_{i,ser}(t_0)} \quad (23)$$

即 T 代表按照目前数据包到达速率与节点服务速率, 节点趋向于拥塞的程度, 规定拥塞可能性因子 $\mu = \Delta t / T$, 即节点拥塞程度的变化率为

$$\mu = \frac{QL_i(t_0) - QL_i(t_0 - \Delta t)}{QL_{i,max} - QL_i(t_0)} \quad (24)$$

节点拥塞可能性因子 μ 与节点缓存空间队列长度、节点剩余缓存空间等有关, 可以反映节点拥塞程度的大小, 其具体含义如表 1 所述。

由表 1 可知, 节点拥塞可能性因子可以为正值也可以为负值, 当节点拥塞可能性因子的绝对值一定时, 其值为正的拥塞可能性较其值为负时高。为把节点拥塞可能性因子映射到非负区间, 规定正值

表 1 节点拥塞可能性因子的说明

参数 μ 的范围	参数意义说明
$\mu = 0$	队列长度无变化, 到达率与服务率相等
$0 < \mu < 0.1$	队列长度增加很慢, 或剩余空间较多, 拥塞可能性较小
$0.1 < \mu < 1$	队列长度增加较慢, 或剩余空间较少, 拥塞可能性较大
$\mu \geq 1$	队列长度增加很快, 或剩余空间很少, 拥塞可能性很大
$-0.1 < \mu < 0$	队列长度较慢减小, 或剩余空间较多, 拥塞可能性较小
$\mu < -0.1$	队列长度在减小, 剩余空间较少, 拥塞可能性较小

化的节点 i 的拥塞可能性因子为 u_i ，其中： $u_i =$

$$\begin{cases} \mu_i, & \mu_i \geq 0 \\ -0.5\mu_i, & \mu_i < 0 \end{cases}$$

对于某一条路径 P_{t_n} ，定义路径拥塞度为式(25)，其为该路径中所有节点的正值化拥塞可能性因子之和，反映该路径整体的拥塞可能性程度。

$$\mu_{P_{t_n}} = \sum_{i \in P_{t_n}} (u_i) \quad (25)$$

路径有效时间为

$$\tilde{T}_{P_{t_n}} = \min \left(T_{P_{t_n}}, \frac{1}{\mu_{P_{t_n}}} \right) \quad (26)$$

4 路由机制设计

基于路径有效时间，本文提出一种新的面向路径可靠性及稳定性综合指标的按需路由机制(ODRP-DR)，该机制基于按需路由下协议 AODV，修改了路由建立过程，并引入路径维护控制消息。首先节点需要根据接收的信号强度大小判断与邻居节点之间的距离，方法参照文献[10]，然后按照 3.1 节介绍的方法根据节点距离计算与邻居的链路持续时间，同时监测自己链路层队列长度并按照 3.2 节介绍的方法计算节点自身拥塞度，寻路过程中将以上信息附在路由请求数据包包头中，以便目的节点根据以上信息选择最优路径。

4.1 信息收集

无线自组织网络中的节点周期性地发送 hello 数据包通告自己的存在，以帮助邻居节点建立相邻节点列表，并根据前文介绍的方法计算与邻居节点的链路持续时间，维护与邻居节点的链路存在时间表。同时节点需要维护一个自身信息列表，该列表包含节点在网络中的标示，自身的队列长度以及节点拥塞可能性因子。

4.2 发起寻路

当源节点需要发送数据给目的节点时，查询自己的路由表，若保存有到达目的节点的路由且未过期则按照保存的路由表发送数据，否则源节点发送广播包 RREQ 发起寻路过程。RREQ 数据包中包含有源节点序列号 source_id，目的节点序列号 destination_id，数据包类型 packet_type，节点列表 node_list，链路存在时间 PT，距离源节点跳数 hop_count，生存时间 TTL 等信息。当中间节点收到此数据包时会进行以下判断：

- (1) 自己不是目的节点；
- (2) 自己的拥塞程度较低；
- (3) 自己不在节点列表 node_list 中；
- (4) 为相同的节点转发路由请求消息未达到限制次数。

制次数。

为了使路由应答消息有多个反向路径，规定每个中间节点将为相同的节点转发 3 次路由请求消息。若以上条件都满足则节点更新 RREQ 信息并向邻居节点发送此广播包。若条件(2)、条件(3)、条件(4)任一个不满足则丢弃该广播包，若条件(1)不满足则转向路由确立阶段。

4.3 路由确立

按照上述转发方式，目的节点会收到多个广播包，当目的节点收到广播包时对其进行保存并开启时间窗口，同时对收到的请求数据包进行计数。当时间窗口计时器到时或者数据包计数器到达预设的门限值时停止收集相应的请求数据包。

若路径跳数过大，则端到端时延会明显增大，同时数据流干扰造成的数据包丢失现象也会增大，因此在选择路径的过程中还需要考虑跳数问题，本文提出的 ODRP-DR 机制对路径跳数 PL 做如式(27)规定(PL_{\min} 为收集的所有路由条目中路径跳数的最小值)：

$$PL \in \begin{cases} [PL_{\min}, PL_{\min} + 2], & PL_{\min} \leq 4 \\ [PL_{\min}, PL_{\min} + 4], & 4 < PL_{\min} < 9 \\ [PL_{\min}, 1.3 \cdot PL_{\min}], & PL_{\min} \geq 9 \end{cases} \quad (27)$$

经过以上过程目的节点处会收集到大量路由请求数据包，目的节点首先根据式(27)去除不满足条件的数据包，然后在所有的路径中选择有效路径时间 $\tilde{T}_{P_{t_n}}$ 最大的路由条目作为最终路由。

4.4 路由维护

转发路径中相邻节点链路持续时间及节点拥塞情况会不断发生变化，本文通过对相应指标设定阈值来实现路由的动态维护。假设路径持续时间为 $T_{P_{t_n}}$ ，建立当前路由所需要的时间为 $t_{P_{t_n}}$ ，路径中某节点 i 拥塞可能性因子为 μ_i ，其与相邻节点的链路持续时间为 $T_{ij, l(i,j) \in P_{t_n}}$ ，规定当满足式(28)时，节点 i 便向源节点发起路由维护请求。

$$\left. \begin{aligned} T_{ij, l(i,j) \in P_{t_n}} &< \min \{ 0.1 \cdot T_{P_{t_n}}, 1.5 \cdot t_{P_{t_n}} \} \\ \mu_i &> 1 \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

当源节点收到路由维护请求时便重新发起寻路过程，找到当前时刻的最优路由。该路由维护机制可以保障数据包在近乎最优的路径上传输，减少重新寻路时延。

5 仿真分析

本文采用 NS2 平台对所提出的 ODRP-DR 路由机制进行仿真，以便分析该路由机制的性能，并与 ADVO 机制的性能进行对比。具体的仿真参数如下：

仿真场景为 $1200\text{ m} \times 1200\text{ m}$ ，节点数为 30，每个节点的无线信号覆盖范围为 250 m ，节点移动方式为随机路点模型，网络中 5 对节点间存在 CBR 数据流，链路带宽为 2 Mbit/s ，数据包大小为 512 Byte ，包产生速率为 4 packet/s ，分别控制节点运动速度与暂停时间分析暂停时间与节点运动速度对分组投递率，路由重建次数，端到端时延等指标的影响，对每个场景执行 10 次仿真取每个指标的平均值作为结果，每次仿真运行时间为 1000 s ，仿真中的具体参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数表

参数名称	参数值	参数名称	参数值
MAC	IEEE802.11DCF	节点信号覆盖范围	250 m
物理层	WirelessPhyExt	载波监听门限	-82 dB
包产生速率	4 packet/s	发射功率	0.001 W
数据流	CBR	载波频率	5.18 GHz
带宽	1 Mbit/s	仿真时间	1000 s
队列长度	50	无线传播模型	双线模型
分组大小	512 Byte		

在 ODRP-DR 与 AODV 机制中，端到端时延随节点移动速度的变化情况如图 2 所示，随节点移动速度上升，ODRP-DR 与 AODV 机制中的端到端时延都上升，由于 AODV 机制的路径更短，当速度小于 4 m/s 时，其时延小于 ODRP-DR，当速度变大时链路不稳定性增加，此时 ODRP-DR 机制由于其路径更稳定，故表现出相对较好的时延特性。

在 ODRP-DR 与 AODV 机制中，分组投递率随节点移动速度的变化情况如图 3 所示，随节点移动速度上升，ODRP-DR 与 AODV 机制中的分组投递率都下降。分组投递率一般受链路断裂及节点拥塞等情况的影响，链路断裂时上游节点会缓存数据包以等待路由重新建立，此段时间内缓存会迅速占

满，造成后续到达的数据包大量丢失。由于 ODRP-DR 机制的链路稳定性高且节点拥塞发生的可能性小，随节点移动速度的增大 ODRP-DR 机制的分组投递率特性较 AODV 机制具有明显的优势。

在 ODRP-DR 与 AODV 机制中，路由重建次数随节点移动速度的变化情况如图 4 所示，随节点移动速度上升，ODRP-DR 与 AODV 机制中路由重建次数都上升。由于 ODRP-DR 机制建立的路由更稳定，故路由重建次数较 AODV 机制低。

在 ODRP-DR 与 AODV 机制中，端到端时延随节点暂停时间的变化情况如图 5 所示。ODRP-DR 机制所建立路由的跳数通常会大于 AODV 机制，中间节点及目的节点需要花费更多的时间转发与收集路由请求数据包。在无线自组织网络中端到端时延除受传输时延、传播时延还受信信道随机接入过程，链路断裂时重新寻路，链路切换等因素影响，ODRP-DR 具有较高的稳定性可以减小路由重建次数，同时减小数据包丢弃而重传的次数，一定程度上减小端到端时延。

在 ODRP-DR 与 AODV 机制中，分组投递率随暂停时间的变化情况如图 6 所示。暂停时间越长，网络拓扑结构越稳定，由图可知 ODRP-DR 机制相对于 AODV 机制在分组投递率方面具有一定优势，但是随着暂停时间变长优势逐渐降低，故 ODRP-DR 机制更适合网络拓扑结构变化频繁的网络。

路由重建次数随暂停时间的变化情况如图 7 所示。当采用 ODRP-DR 机制时，节点选择具有较长生存时间且拥塞概率小的路径进行通信，这种路径稳定性高且发生拥塞而丢包的概率小，从图中可以看出在仿真过程中 ODRP-DR 机制有效地降低了路由重建次数，进而降低重建路由的控制开销。

6 结束语

本文建模分析了动态变化网络中节点间路径存在的条件，以及数据包在路径上可靠传输的条件，基于以上分析提出保证端到端链路有效的关键因

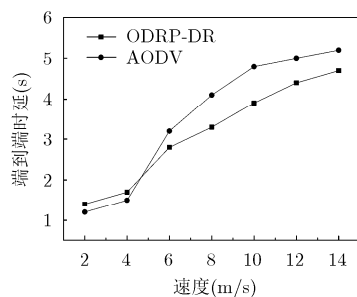


图 2 端到端时延(暂停时间 0 s)

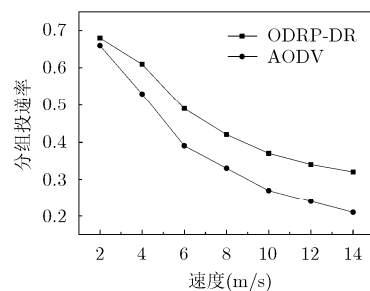


图 3 分组投递率(暂停时间 0 s)

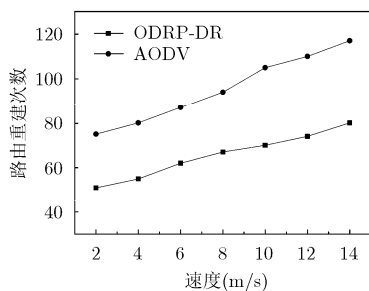


图 4 路由重建次数(暂停时间 0 s)

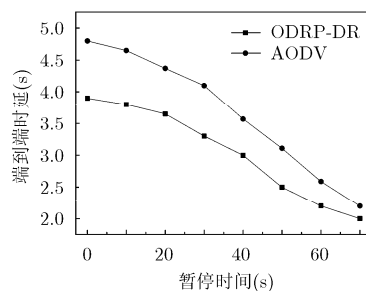


图 5 端到端时延(速率 10 m/s)

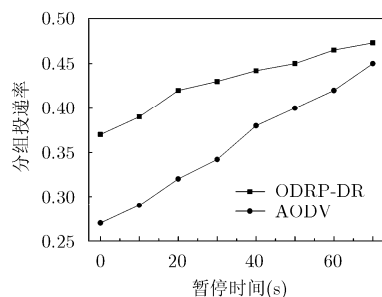


图 6 分组投递率(速率 10 m/s)

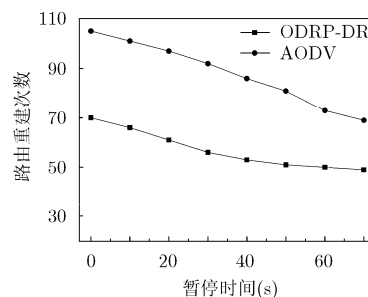


图 7 路由重建次数(速率 10 m/s)

素：链路持续时间以及节点拥塞可能性因子，并给出这两个指标的具体计算方法。结合链路持续时间与节点拥塞可能性等信息，本文进一步提出了一种面向链路可靠性及稳定性综合指标的按需路由机制 ODRP-DR，并在 NS2 仿真平台上对该机制的性能进行了仿真分析，仿真结果表明，在网络拓扑结构动态变化的情况下 ODRP-DR 路由机制能有效减小端到端时延以及丢包概率，减小路由重建次数。

参考文献

- [1] SHELLY S and BABU A V. A probabilistic model for link duration in vehicular ad hoc networks under Rayleigh fading channel conditions[C]. 2015 Fifth International Conference on Advances in Computing and Communications (ICACC), Kochi, 2015: 177-182. doi: 10.1109/ICACC.2015.16.
- [2] ZHAO J, CHEN Y, and GONG Y. Study of connectivity probability of vehicle-to-vehicle and vehicle-to-infrastructure communication systems[C]. 2016 IEEE S3rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Nanjing, 2016: 1-4. doi: 10.1109/VTCspring.2016.7504493.
- [3] ATALLAH R, KHABBAZ M, and ASSI C. Multi-hop vehicle-to-infrastructure communications: A feasibility study, modelling and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, (99): 1-9. doi: 10.1109/TVT.2016.2586758.
- [4] RAK J. Providing differentiated levels of service availability in VANET communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 7(7): 1380-1383. doi: 10.1109/LCOMM.2013.052413.130631.
- [5] YAN G and OLARIU S. A probabilistic analysis of link duration in vehicular Ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4): 1227-1236. doi: 10.1109/TITS.2011.2156406.
- [6] CHEN X, LI L, and ZHANG Y. A markov model for headway /spacing distribution of road traffic[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, 11(4): 773-785. doi: 10.1109/TITS.2010.2050141.
- [7] HUA E Y and HAAS Z J. Mobile-projected trajectory algorithm with velocity-change detection for predicting residual link lifetime in MANET[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(3): 1065-1078. doi: 10.1109/TVT.2014.2327232.
- [8] SHAO C, LENG S, ZHANG Y, et al. Performance analysis of connectivity probability and connectivity-aware MAC protocol design for platoon-based VANETs[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(12): 5596-5609. doi: 10.1109/TVT.2015.247994.
- [9] LO C and KUO Y H. Enhanced hybrid traffic-aware routing protocol for vehicular Ad hoc networks[C]. 2015 IEEE S2nd Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Boston, MA, 2015: 1-6. doi: 10.1109/VTCfall.2015.7390924.
- [10] YAO Z and LOGUINOV D. Analysis of link lifetimes and neighbor selection in switching DHTs[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2011, 22(11): 1834-1841. doi: 10.1109/TPDS.2011.101.
- [11] RHIM A and DZIONG Z. Routing based on link expiration time for MANET performance improvement[C]. IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications,

- Kuala Lumpur Malaysia, 2009: 555–560. doi: 10.1109/MICC.2009.5431435.
- [12] MACKER J P, CLAYPOOL D, and HUGHES N. Improving routing path stability in mobile Ad hoc networks that use a CDS control plane[C]. 2014 IEEE Military Communications Conference, Baltimore, MD, 2014: 1099–1104. doi: 10.1109/MILCOM.2014.186.
- [13] 吴大鹏, 武穆清, 甄岩. 面向链路稳定性的 MANET 路径建立机制[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(9): 2226–2231.
WU Dapeng, WU Muqing, and ZHEN Yan. Reliable routing mechanism in MANET towards link stability[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(9): 2226–2231.
- [14] 郝晓辰, 贾楠, 刘彬. 基于拥塞预知的 WSN 多径寻优路由协议[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(5): 1261–1265. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00797.
HAO Xiaochen, JIA Nan, and LIU Bin. Multi-path optimizing routing protocol based on predicting congestion for wireless sensor network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(5): 1261–1265. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00797.
- [15] 梁露露, 高德云, 秦雅娟, 等. 无线传感器网络中面向紧急信息可靠传输协议[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(1): 95–101. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00592.
LIANG Lulu, GAO Deyun, QIN Yajuan, *et al.* A reliable transport protocol for urgent information in wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(1): 95–101. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00592.
- [16] BASARKOD P I and MANVI S S. Node movement stability and congestion aware anycast routing in mobile Ad hoc networks[C]. 2014 IEEE International Advance Computing Conference (IACC), Gurgaon, 2014: 124–131. doi: 10.1109/IAAdCC.2014.6779306.
- [17] SUNITHA D, NAGARAJU A, and NARSIMHA G. A cross-layer approach for congestion control in multi hop mobile Ad hoc networks[C]. 2014 International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), New Delhi, 2014: 54–60. doi: 10.1109/IndiaCom.2014.6828011.
- 李添泽: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为无线自组织网络网络协议及通信网理论.
- 武穆清: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带网络理论与信息处理.