

# 基于局部邻居节点和链路权值的改进 AODV 路由协议\*

陈侃松, 李豪科, 阮玉龙, 王时绘



(湖北大学 计算机与信息工程学院 物联网工程研究所, 湖北 武汉 430062)

通讯作者: 陈侃松, E-mail: kschen1999@aliyun.com

**摘要:** 在节点高速移动的 Ad Hoc 网络环境中, 广播风暴对网络性能的影响尤为重要, 且网络拓扑结构的频繁变化极易导致路由中断. 传统的 AODV 路由协议在路由发现阶段直接使用广播转发 RREQ(路由请求分组)机制, 容易导致广播风暴降低网络性能; 同时, 协议选择跳数最少的路径作为路由, 没有考虑到节点的快速移动导致路由频繁失效, 因此无法适应节点高速移动的网络环境. 针对上面存在的问题, 提出一种对 AODV 进行改进的协议. 该协议在路由发起过程中, 基于局部邻居节点数量计算动态转发概率; 选择路由时, 利用跨层思想, 结合网络节点移动速度提出链路权值, 依据链路权值选择路由路径. NS2 仿真结果表明: 该改进协议提高了数据包的投递率, 缩短了端到端的传输时延, 能够更好地适应节点高速移动的网络环境.

**关键词:** AODV; 动态概率; 局部邻居; 链路权值; 跨层设计

**中图分类号:** TP393

中文引用格式: 陈侃松, 李豪科, 阮玉龙, 王时绘. 基于局部邻居节点和链路权值的改进 AODV 路由协议. 软件学报, 2021, 32(4): 1186-1200. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5970.htm>

英文引用格式: Chen KS, Li HK, Ruan YL, Wang SH. Improved AODV routing protocol based on local neighbor nodes and link weights. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2021, 32(4): 1186-1200 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5970.htm>

## Improved AODV Routing Protocol Based on Local Neighbor Nodes and Link Weights

CHEN Kan-Song, LI Hao-Ke, RUAN Yu-Long, WANG Shi-Hui

(Institute of Internet of Things, School of Computer Science and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China)

**Abstract:** The performance of ad hoc networks is particularly influenced by the broadcast storms when the nodes are moving at a high speed in the network. Frequent change in the topology of the network can easily lead to interruption of the route. During searching the route, the broadcast forwarding RREQ (route request packet) mechanism is applied to the traditional AODV routing protocol, leading to broadcast storms. In addition, the traditional routing protocol cannot adapt to the high-speed movement of the nodes due to that the least hop is just used as the route selecting. In this study, an improved AODV routing protocol is proposed. Firstly, the data forwarding probability based on the number of local neighbors is calculated during the route initiation. Secondly, according to the cross-layer design, the link weight based on the speed of the nodes movement is used to select route. The simulation results with NS2 show that the improved routing protocol can be applied to the high-speed mobile networks due to higher delivery ratio of data packets and less end-to-end transmission delay.

**Key words:** AODV; dynamic probability; local neighbor; link weight; cross-layer design

Ad Hoc 网络是一种无需基础设施的多跳无线自组织移动网络, 广泛应用于军事和紧急救灾等领域. 在 Ad Hoc 网络中, 当节点高速移动时, 网络拓扑结构变化很快, 导致网络链路状态不稳定<sup>[1]</sup>. 此时, 路由需要尽快重新找

\* 基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAK03B02); 湖北省教育信息化工程技术研究中心开放课题

Foundation item: National Key Technology Support Program of China (2015BAK03B02); Opening Foundation of Hubei Provincial Engineering Research Center for Educational Informatization

收稿时间: 2018-05-16; 修改时间: 2019-02-20, 2019-07-28; 采用时间: 2019-09-30

到能耗较低且状态稳定的链路.同时,在路由失效时避免网络中断.

本文主要研究的是 Ad Hoc 网络中一种按需距离矢量路由协议 AODV 及其改进协议,AODV 协议在路由查找阶段采用泛洪机制广播 RREQ 分组,可能会导致广播风暴<sup>[2]</sup>.在通信过程中,如果发生路由中断,则其需由源节点重新建立到目的节点的路由.同时,当节点移动速度较快时,由于网络拓扑频繁变化,链路极易中断,导致网络性能迅速下降.因此,本文将跨层设计<sup>[3-6]</sup>和动态概率相结合,针对上述问题,对 AODV 协议做出修改:首先,在 AODV 路由发现阶段采取动态概率转发机制,根据局部邻居节点数量,选择计算转发概率抑制路由风暴,提高了网络性能;并在路由路径选择阶段,利用跨层设计思想,提高了路由链路在网络拓扑变化频繁时的稳定性.

本文主要贡献如下:

- (1) 针对 AODV 路由查找阶段容易导致广播风暴的问题,提出一种动态转发概率公式.基于网络局部邻居节点数量,使节点获取当前所在区域、上级节点所在区域和整个网络的节点密度,并根据不同的节点密度计算转发概率,更好地抑制广播风暴;
- (2) 在快速变化的 Ad Hoc 网络中,针对 AODV 协议建立的路由链路不稳定、从而影响网络数据传输的问题,提出链路权值的概念.利用跨层设计思想,结合网络层节点运动速度计算链路权值,并在路由选择依据中,将链路权值作为标准,以提高路由链路的时效性;
- (3) 通过 NS2 仿真平台,对改进协议进行仿真以验证其性能.分别对节点在 40、60、80、100 节点数量不同移动速度的场景以及在 30m/s、40m/s、50m/s 移动速度的不同节点数量的场景下进行仿真实验,对改进协议的分组投递率、端到端时延、归一化路由开销这 3 项指标进行仿真性能评估,分析两种改进协议(参见文献[7,8]),同时验证分析了本文改进协议与原始协议和文献[7,8]的改进协议相比的优势.

## 1 相关工作

AODV 路由协议在路由查找阶段采用泛洪机制发送 RREQ 分组,如图 1 所示.图 1(a)中,当节点发起路由请求时,A 节点开始广播 RREQ,B、C、D 收到分组后继续广播该分组,E 和 F 收到后仍然继续广播直到找到目的节点.这种方式容易导致广播风暴,即网络内很多节点均在广播发送消息,从而导致网络拥堵甚至瘫痪,使得网络性能下降,出现网络可用带宽减小、丢包率增加、传输延时增加等问题.因此,为了改善网络性能,希望 RREQ 分组能够以图 1(b)所示的方式转发,节点根据通信范围内的节点密度智能地选择是否转发分组,从而提高网络的可用带宽<sup>[5]</sup>.

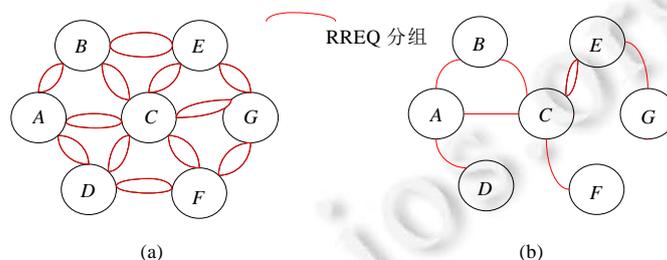


Fig.1 Broadcast storm diagram

图 1 广播风暴示意图

AODV 路由路径选择建立阶段如图 2(a)所示,其中,从节点 S 到节点 D 的最短跳数路径选择为  $S \rightarrow B \rightarrow D$ .在静态网络中,该路径选择策略可降低数据传输时延,节省网络能量;但在拓扑变化较快的网络中,采用该策略将会降低路由的时效性.如图 2(b)所示:当节点 B 运动较快且超出 S 的通信范围时,S 到 D 的链路就会断裂,此时, $S \rightarrow B \rightarrow D$  的路径已失效,需再次重新发起路由查找;而另一路径  $S \rightarrow A \rightarrow E \rightarrow D$  仍然可用.因此,在网络拓扑快速变化时,不应依据最短跳数来建立路由路径,而应选择更稳定的路径.

节点广播转发邻居节点的数据之后,可增加的平均有效广播区域为 41%<sup>[6]</sup>.同时,当节点拥有多邻居节点时,增加的有效广播区域则会减少.文献[9]中提出一种利用节点的平均邻居节点数量来衡量网络的稠密程度的策略,以动态概率转发路由查找分组,从而抑制路由查找阶段的广播泛洪.该方法以动态形式表示网络的疏密程度,并给出转发概率,但是,由于网络拓扑的变化和节点的快速移动,导致每个节点不能实时获取网络的疏密程度.同时,网络中存在网络节点分布不均匀的情况,导致转发概率的计算不准确<sup>[10]</sup>,因此,在一定程度上会影响到路由网络的时效性和稳定性.

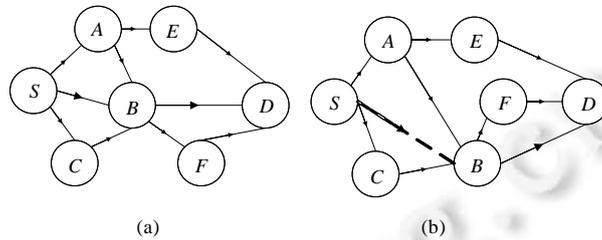


Fig.2 Comparison of routing path selection  
图 2 路由路径选择对比图

在文献[11]中提出了一种基于计数的转发方案来抑制路由风暴,它在每次要转发 RREQ 分组前开始等待时间来避免所有节点均广播转发,但是该方案明显提高了数据传输的时延.Kim 等人在文献[12]中提出一种基于链路质量 LQI(link quality indicator)的改进协议,通过设定链路质量的阈值来界定一条链路的好坏.因为链路的选择是基于优秀链路质量最优的一条,因此改进的协议能够提高数据传输的稳定性<sup>[13]</sup>.由于 L-AODV 没有考虑网络节点运动的情况,从而选择不稳定的路由路径导致数据传输时延增大.Mohammed 等人在文献[14]中提出一种基于能量的改进协议,结合路径的能量消耗以及节点的最低能耗来设定能量阈值,避免了节点成为热点而死亡,从而导致链路中断.但是因为路径选择中过度考虑能量导致链路的质量不高,数据传输稳定性较低.文献[15]提出基于跨层机制以及能量约束来选择路由路径,结合 MAC 层的信号链路强度和节点能量因素来平衡网络中的能量消耗,选择一条最优路径以避免网络节点出现热点现象,但是并未考虑到网络拓扑变化的情况会影响路由的时效性.

## 2 协议改进

### 2.1 基于局部邻居的动态概率转发

如图 3 所示,A、B 两节点间相距  $d$ ,节点通信半径为  $R(R > d)$ ,当 B 接收到 A 转发的数据后,如果继续转发该数据,则可增加的有效覆盖区域为图中阴影部分面积.

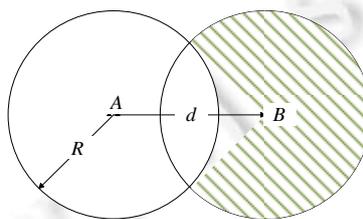


Fig.3 Forwarding model diagram  
图 3 转发模型图

每个节点所能覆盖的有效传播范围是  $INCR(d)$ ,当节点 B 也转发该数据时,增加的阴影部分区域为

$$\pi r^2 - INCR(d),$$

其中,  $A$ 、 $B$  两节点均能传输到的区域:

$$INCR(d) = 4 \int_0^{d/2} \sqrt{r^2 - x^2} dx \quad (1)$$

在实际传输过程中,当两节点间距离刚好为节点传输半径  $R$  时,两节点间重复的传播区域最小,转发增加的有效传播区域最大,此时,  $R=d$ ,  $INCR(d)$  最大为

$$\pi r^2 - INCR(d) = \frac{\pi r^2}{3} + \frac{\sqrt{3}r^2}{2} \sim 0.61\pi r^2 \quad (2)$$

由公式(2)可知,节点在转发数据之后能够增加的有效传播区域最大为原区域的 61%. 该区域随着节点间距离的减小而降低,而增加的平均区域计算公式如下:

$$\int_0^r 2\pi x[\pi r^2 - INCR(d)] / \pi r^2 dx \sim 0.41\pi r^2 \quad (3)$$

由上述分析可得,数据在转发之后能够增加的有效传播区域平均值为 41%. 这是在节点只有一个邻居的情况下所得,而在实际应用中,一个节点拥有多个邻居节点,因此,在转发过程中增加的有效传播区域将更少<sup>[16]</sup>. 本文在 AODV 路由查找阶段提出一种基于动态概率的路由转发模型,该概率公式通过本节点的邻居数量与上级节点的邻居数量、网络平均邻居数量之间的比较,计算选择不同的转发概率,使 RREQ 分组可依据网络的疏密程度以动态概率转发,极大地改善了广播风暴问题,也提高了网络可用带宽. 现将本文中参数定义说明如下.

1. 网络平均邻居数量  $avgCnt$ : 网络中所有节点的邻居节点数量之和与网络节点数量的比值:

$$avgCnt = \frac{\sum_{i=0}^N nbCnt_i}{N} \quad (4)$$

$N$  为网络节点数量,  $nbCnt_i$  为第  $i$  个节点的邻居节点数量;

2. 本地邻居数量  $nbCnt$ : 当前节点的邻居节点数量;
3. 上级节点: 本地邻居节点中,将 RREQ 转发给当前节点的节点;
4. 上级节点邻居数量  $pnbCnt$ : 上级节点的邻居节点数量;
5. 转发概率  $P$ : 节点收到 RREQ 分组后,转发该分组的概率:

$$P = \begin{cases} e^{-ifc \times nbCnt}, & nbCnt < pnbCnt \text{ 且 } nbCnt < avgCnt \\ e^{-ifc \times avgCnt}, & nbCnt < pnbCnt \text{ 且 } nbCnt \geq avgCnt \\ e^{-ifc \times pnbCnt}, & nbCnt \geq pnbCnt \text{ 且 } nbCnt < avgCnt \\ e^{-ifc \times nbCnt}, & nbCnt \geq pnbCnt \text{ 且 } nbCnt \geq avgCnt \end{cases} \quad (5)$$

当节点收到 RREQ 分组后,将自身邻居数量和上级节点邻居数量以及网络平均邻居数量进行比较,以选择不同的转发概率计算公式,其中,  $P_1 > P_3 > P_2 > P_4$ .

- (1) 当本地邻居数量 < 上级节点邻居数量,并且本地邻居数量 < 网络平均邻居数量时,表明当前节点通信范围相对于上级节点以及整个网络来说处于一个较稀疏的路由网络中,因此需要以较大概率  $P_1$  来转发 RREQ,避免该分组在当前的小网络被吸收(此时,分组数据传递不出去);
- (2) 当本地邻居数量 < 上级节点邻居数量,并且本地邻居数量  $\geq$  网络平均邻居数量时,表明当前节点通信范围只是相对于上级节点而言所处的网络较稀疏,此时只需以一般随机概率  $P_2$  转发 RREQ,上级节点也是相对于整个网络而言处在稠密网络中,其周围将会有很多节点已接收到 RREQ 分组并已经转发;
- (3) 当本地邻居数量  $\geq$  上级节点邻居数量,并且本地邻居数量 < 网络平均邻居数量时,表明当前节点通信范围相对于整个网络而言处于稀疏状态,相对于上级节点而言处于稠密状态,因此需要以概率  $P_3$  转发 RREQ. 此时,上级节点相对于全网处于稀疏状态,所以,当前节点的分组会被吸收,可以适当降低转发概率;
- (4) 当本地邻居数量  $\geq$  上级节点邻居数量,并且本地邻居数量  $\geq$  网络平均邻居数量时,表明当前节点通信范围相对于上级节点以及整个网络处于一个较稠密的小网络中,因此以小概率  $P_4$  来转发 RREQ. 因为当前节点所处的网络较为稠密,其邻居节点已有很大几率接收到 RREQ 分组并已经转发,当前节点的

分组被吸收.

概率转发公式中的  $ifc$  为影响因子,经过多次实验,最终选定该值为 0.5.该值用来平衡部分节点周围分布不均匀的情况,当节点邻居节点较少时,影响因子可使得函数  $y=e^{-x}$  的指数部分变小从而增大转发概率.在概率转发公式中,结合网络平均邻居节点和上级节点邻居节点数量,能够充分反映整个网络以及单个节点通信范围内的节点密度<sup>[17]</sup>,使每个节点能够更加智能地依据自身和周围的节点密度调节转发概率.

## 2.2 基于链路权值的路由选择

在 Ad Hoc 网络中,节点的移动会导致网络拓扑的变化.为了适应移动自组织网络的网络性能,在保证数据分组投递率的同时,尽量降低数据传输的时延.本文利用跨层设计思想,将物理层和 MAC 层的 LQI 信息传递给网络层,并结合节点移动速度提出链路权值,利用链路权值来衡量路由路径的动态稳定性,依据最小权值选择最佳路由,以提高路由的时效性,避免了频繁的路由断裂和查找,降低了数据传输时延和丢包率.现将相关定义说明如下.

1. 邻居平均速度  $avgSpd$ :当前节点所有邻居节点的平均速度:

$$avgSpd = \frac{\sum_{n=1}^k v_n}{k} \quad (6)$$

其中, $k$  表示节点的邻居节点数量, $v_n$  表示第  $n$  个邻居节点的速度.

2. 链路信号系数  $lk$ :通信范围内两节点间 LQI 的比例系数:

$$lk = 1 - LQI_{(i,j)} / 1000 \quad (7)$$

其中, $LQI_{(i,j)}$  为  $i,j$  两节点间的 LQI 值.两节点间链路信号强度越高, $lk$  值越小.

3. 速度权值  $spdWgt$ :当前节点速度与邻居平均速度比值(取小于等于 1 的比):

$$spdWgt = \begin{cases} \frac{i_{speed}}{avg\_nb\_speed_i}, & i_{speed} < avg\_nb\_speed_i \\ \frac{i_{speed} - avg\_nb\_speed_i}{avg\_nb\_speed_i}, & i_{speed} \geq avg\_nb\_speed_i \end{cases} \quad (8)$$

其中, $i_{speed}$  表示当前节点  $i$  的速度, $avg\_nb\_speed_i$  表示  $i$  节点的邻居平均速度.

本文中,速度权值取值为小于等于 1.当权值大于 1 时,将权值置为 2,表明当前节点相对于周围邻居节点运动过快,权值越小,表明当前节点相对于周围邻居节点运动缓慢,以此节点作为路由,可以增加路由链路的时效性;权值越大,表明当前节点相对于周围邻居节点运动过快,此时,可能由于节点运动过快而导致路由链路过早失效.

4. 链路权值  $LP$ :路由路径选择的依据,权值最小的链路为当前最优路由:

$$LP = spdWgt_i + lk_i \quad (9)$$

其中, $spdWgt_i$  表示节点  $i$  的速度权值, $lk_i$  表示节点  $i$  与上级节点的链路信号系数.

链路  $LP$  值决定最终路由路径的选取, $LP$  值最小,表明当前路径速度权值和链接强度之和最小,且速度权值为所有路径中的较小值,说明所选路径中的节点在该节点的邻居网络链路中信号强度较高,稳定性较好.

## 2.3 改进算法流程

节点在上电工作后,开始周期性地发送 HELLO 消息,通过 HELLO 消息获取邻居节点数量的相关信息;当节点开始路由发现或者接收到 RREQ 分组时,首先判断是否丢弃该分组,若不丢弃,则判断是否建立到源节点的反向路由;在节点再次转发此 RREQ 之前,通过计算转发概率来决定是否转发该 RREQ,若需要转发,则再次计算本节点与上级节点间的  $LP$  值,根据每个不同路径的 RREQ 分组中的  $LP$  值选择最优路径, $LP$  最小的路径则为当前路由发现的最优路径并返回 RREP 消息分组.

由于改进方法中需由节点获取邻居节点数量、速度等信息,为方便数据结构的设计,直接利用协议的 HELLO 消息机制,由每个节点获取邻居节点的相关信息,因此,需重新设计 HELLO 消息格式,具体设计见表 1.

在路由查找阶段,每个节点接收到 RREQ 分组后,均要计算源到当前节点的总 LP,以及上级节点和当前节点的 LP 值并加以存储,以便 RREP 消息传输时获得此值.因此,需要在 RREQ 消息格式中添加相应字段,修改后的 RREQ 消息格式见表 2.

Table 1 Modified HELLO message format

表 1 修改后 HELLO 消息格式

目的节点地址	目的节点序列号	源节点地址	生存时间	时间戳	本地邻居数量	上级邻居数量	邻居平均速度	邻居节点速度	链路 LP 值
					添加				

Table 2 Modified RREQ message format

表 2 修改后 RREQ 消息格式

广播 ID	目的节点地址	目的节点序列号	源节点地址	源节点序列号	时间戳	邻居平均速度	本地邻居数量	上级邻居数量	链路 LP 值
					添加				

因为路由路径的选择依据是 LP 值,因此在路由表条目中需要增加字段路由链路,当有新的路径需要更新时,比较路由表条目中的 LP 值与新路径的 LP 值来更新路径.当源节点接收到 RREP 分组后,通过比较每条路径中的 LP 值,选择 LP 值最小的路径作为源节点到目的节点的最优路径,存入路由表条目中.

因为路由路径的选择依据是 LP 值,在路由表条目中需要增加字段和路由链路,当有新的路径需要更新时,比较路由表条目中的 LP 值与新路径的 LP 值来更新路径.若接收到的数据类型是 RREQ、RREP、RRER、HELLO 分组类型,则表明接收的是 AODV 协议类型分组.此时将分组中的 TTL 字段减 1,然后对分组进行响应.根据不同的数据包类型调用不同的处理函数,主要分为以下几种情况.

- (1) 如果数据类型为 RREQ 分组,则主要解析处理 RREQ 分组并判断是否继续转发;
- (2) 通过调用路由请求函数来处理接收 RREP 分组,函数输出有效值是对路由请求的响应.表明已经找到数据传输的目的节点,并且已经创建了反向的路由链路;
- (3) 处理接收到的 RRER 分组,通过相关函数对当前使用路由做出错误响应,并对路由路径进行检测维护.改进协议路由请求工作流程如图 4 所示.

在通信时选择路由由开销小、节点间链路失效时间长的路由,可以提高链路的稳定性,延长网络的寿命.邻居节点数量在一定程度上反映了网络的状况.路由协议能够选择较为稳定的链路进行数据传输,提高了分组投递率,降低了端到端平均时延与归一化路由开销,进而提高了路由协议的性能,将最优路由选择问题转化为路由开销  $C$ 、节点平均邻居节点数  $N$  和链路失效时间  $T$  最优的问题,上述 3 个条件转化为权值计算,表示为

$$Z=C/NT \quad (10)$$

网络中,链路上节点能量的大小及能量消耗的快慢对链路质量起着决定性作用.链路越短,新增协议字段的长度和缓冲数据越少,节点能量消耗越小,数据传输时延越小.所以,路由开销可用公式表示为

$$C=hq/e \quad (11)$$

其中, $h$  表示跳数, $q$  表示链路中节点缓存数据包的最大数目, $e$  表示链路中节点剩余的最小能量值.由公式(11)可知:路由开销越小,链路的生存时间越长<sup>[18]</sup>.

本文对协议的改进主要表现在如下两个方面:第 1,在路由请求阶段,当节点收到其他节点转发的 RREQ 分组时,依据上级节点邻居数量和本地邻居数量的大小,选择不同的转发概率公式,以避免路由广播风暴影响网络

性能,同时能够降低传输时延;第2,在路由路径选择时,利用链路权值来决定当前网络拓扑下的最优路径,使得在网络拓扑变化的情况下路径相对稳定,减少路由断裂情况以避免多次路由查找,降低了传输时延,提高了分组投递率.

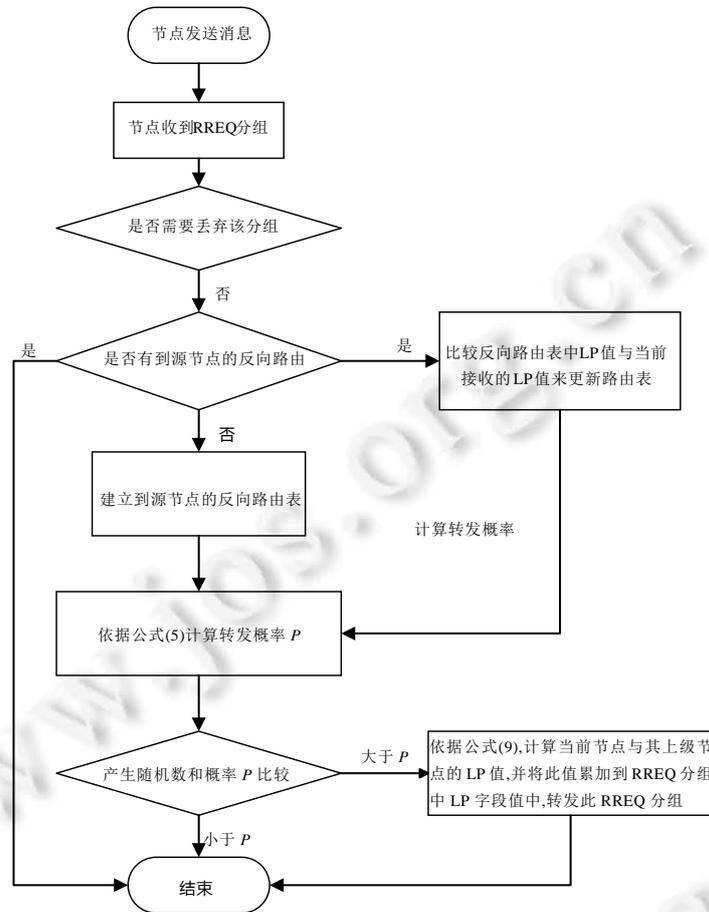


Fig.4 Routing request workflow diagram

图4 路由请求工作流程图

### 3 仿真结果及分析

#### 3.1 仿真环境

本文利用网络仿真软件 NS2 分别对 AODV 路由协议、本文改进路由协议(MOD-AODV)以及文献[7,8]中提出的改进协议 I-AODV-SE 和 ND-AODV 进行了仿真模拟,实验仿真场景主要分为两种.

场景 1. 节点数量不变,节点平均移动速度在改变.最大连接数为 10,模拟时间为 100s,停留时间为 0s,数据类型为 cbr,发包速度为 4 包/秒,仿真场景为 1000m×1000m,节点最小移动速度为 1m/s,最大移动速度分别为 10、20、30、40、50(m/s).节点最大移动速度在改变(即网络平均速度发生改变),根据节点数量分别为 40、60、80、100,比较不同平均移动速度下的时延、分组投递率、归一化路由开销;

场景 2. 节点平均移动速度不变,节点数量在改变.最大连接数为 10,模拟时间为 100s,停留时间为 0s,数据类型为 cbr,发包速度为 4 包/秒,仿真场景大小为 1000m×1000m.节点个数为 20、40、60、80、100,最大移动速度分别为 30m/s、40m/s、50m/s,比较不同节点数目下时延、分组投递率、归一化路由开销;

本文对每个场景进行 30 次模拟仿真实验,将收集到的数据进行统计平均,然后绘图.为了绘图方便,在节点

平均速度变化的图示中,横坐标为节点的最大移动速度,节点最大移动速度的改变即是网络平均移动速度的改变.其中,I-AODV-SE 和 ND-AODV 分别是文献[7,8]中的算法,MOD-AODV 是本文改进的算法,AODV 为原始协议.协议仿真参数设置见表 3.

**Table 3** Protocol parameter type settings  
**表 3** 协议仿真参数类型设置

参数	参数值
信道类型	Channel/WirelessChannel
MAC 协议	Mac/802_11
网络接口	Phy/WirelessPhy
天线类型	Antenna/OmiAntenna
队列类型	Queue/DropTail/PrioQueue
场景长	1 000m
场景宽	1 000m

### 3.2 性能评价指标

为了能够全面分析改进前后 AODV 协议的性能,本文从以下 3 个性能指标的角度进行了分析.

- (1) 端到端传输时延:所有数据分组从源节点发出到目的节点正确接收所用时间的平均值,亦即数据包从源节点发出到目的节点接收之间的平均时间差,反映了路由的有效性;
- (2) 数据分组投递率:节点接收到的总分组个数与发送出去的总分组个数的比值,反映了网络传输的可靠性.分组投递率越大,可靠性越高.数据分组投递率是衡量网络丢包率的重要指标,反映了网络性能的好坏;
- (3) 归一化路由开销:每发送一个数据分组所需要的路由分组数,其中,路由分组每一跳的传输均认为是一个新的路由分组,反映了网络的拥塞程度和路由效率<sup>[19]</sup>.对于 Ad hoc 网络中的路由协议,路由开销越低越好.

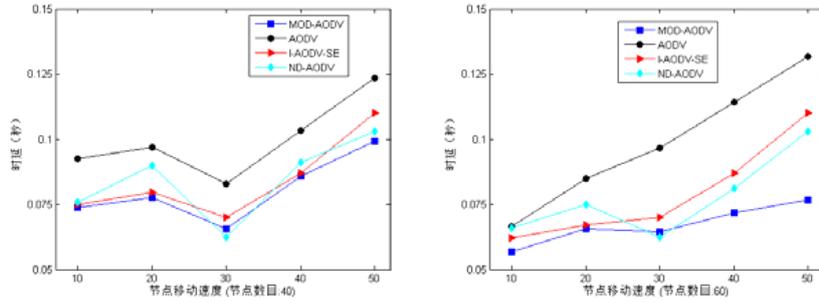
### 3.3 仿真结果分析

图 5(a)~图 5(d)所示为节点数量分别为 40、60、80、100 时,不同节点速度下的端到端时延.

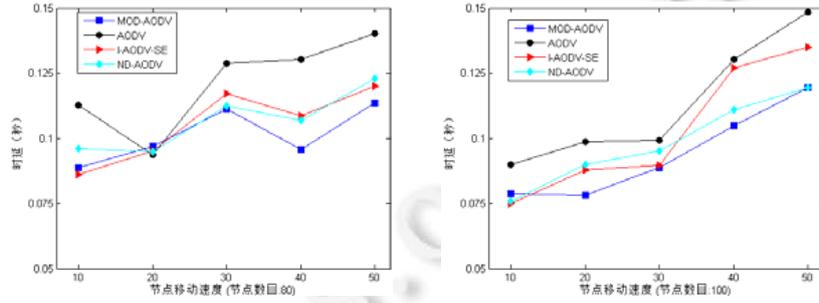
图 5 中,为了绘图美观,将图中横坐标改为节点最大移动速度.由图 5 可以看出:随着网络平均速度的增加,3 种协议的传输时延总体上呈上升趋势.AODV 协议传输时延较高.两种对比协议 I-AODV-SE 和 ND-AODV 在节点密集与稀疏、移动速度不同时各有优劣:在节点运动速度低且数目较少时,I-AODV-SE 算法表现出较好的时延特性;而在节点运动速度高且数目较多时,ND-AODV 算法有较好的时延特性.MOD-AODV 变化趋势比另外两种协议平缓.这是因为,随着节点移动速度的增加,网络拓扑变化逐渐加快,MOD-AODV 可通过节点的运动快速获取网络疏密情况以及上级节点通信范围内网络的疏密度以动态计算转发概率,极大地减少了 RREQ 的转发,提高了网络可利用带宽,减少了传输时延.同时,在路由建立的初始通过链路权值来选择路由,使得路由路径在快速变化的拓扑环境下相对稳定,减少了路由查找的次数,降低了数据传输时延.

I-AODV-SE 协议在节点运动中获取邻居节点情况,在转发 RREQ 分组时,根据节点计算得出的概率进行转发.该协议在延时时上相对经典 AODV 有所降低,但是随着节点速度的不断增加,它所获取的网络情况是不连续的,致使网络可用带宽没有较大的提升.对于 ND-AODV 路由协议,建立路由关系依据定位信息确定链路权值,因此在低速节点情况下建立的链路选择范围较大,增加了网络风暴的可能性.本文算法 MOD-AODV 由路径选择时利用链路权值来决定当前网络拓扑下的最优路径,使得在网络拓扑变化的情况下路径相对稳定,在节点密集和节点相对运动速度较大时,MOD-AODV 改进协议呈现于端到端时延的优势更加明显.由图 5(a)~图 5(d)可以看出:即使网络节点的数量有所增加,改进协议在传输时延上仍然能够表现出一定的优势,表明改进协议不仅能够适应网络拓扑的快速变化,在网络节点数量发生变化的情况下也有良好的表现.

图 6(a)~图 6(d)所示为节点数量分别为 40、60、80、100 时,不同节点平均速度下的数据分组投递率.为了绘图美观,将图中横坐标改为节点最大移动速度.



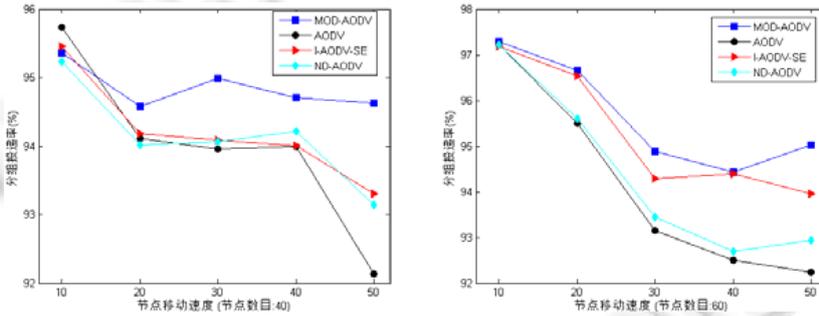
(a),(b) 不同节点平均速度下,端到端时延(节点数目:40,60)



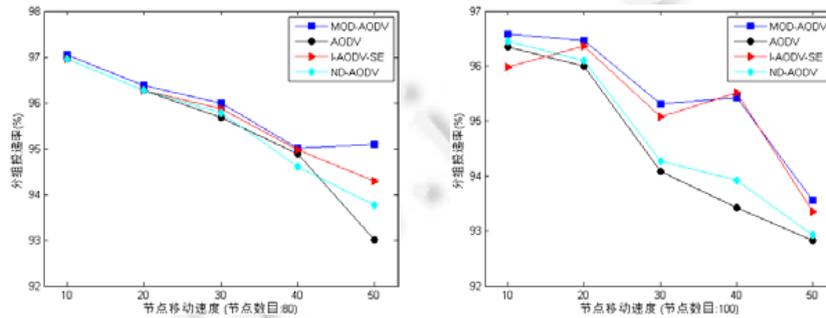
(c),(d) 不同节点平均速度下,端到端时延(节点数目:80,100)

Fig.5 End-to-end delays at different average speeds

图5 不同平均速度下的端到端时延



(a),(b) 平均速度对数据分组投递率的影响(节点数目:40,60)



(c),(d) 平均速度对数据分组投递率的影响(节点数目:80,100)

Fig.6 Packet delivery rate at different average speeds

图6 不同平均速度下的分组投递率

由图 6 可以看出:随着节点速度的增加,3 种协议的分组投递率总体呈下降趋势.分组投递率中,MOD-AODV 最高,AODV 最低,I-AODV-SE 和 ND-AODV 两种改进协议在不同场景下的投递率各有不同.

随着节点运动速度的增加,分组投递率呈下降趋势.因为节点速度增大,网络拓扑变化频繁,链路断裂的几率变大,网络中 RREQ 报文增多,带宽占用率加大,导致 ND-AODV 分组投递率下降.I-AODV-SE 协议在网络内传输的数据包数也在增多,它们均在占用网络资源,导致资源出现竞争.由于 MOD-AODV 利用上级邻居和本级邻居来计算转发概率,因此在节点相对速度较快的情况下对网络稠密的判断影响不大,更有效地抑制了广播风暴,提高了网络带宽以增大分组投递率.AODV 依据最短跳数选择路由,致使在节点运动速度增加的过程中链路中断的概率增大,而使路由失效,因此数据传输不够稳定,分组投递率降低.同样地,由图 6(a)~图 6(d)的对比可以看出,改进协议在分组投递率上也能适应网络节点数量的变化.

图 7(a)~图 7(d)所示为节点数量分别为 40、60、80、100 时,不同节点平均速度下的归一化路由开销.为了绘图美观,将图中横坐标改为节点最大移动速度.由图 7 可以看出:随着节点移动速度的增加,3 种协议的路由开销呈上升趋势,其中,MOD-AODV 在路由开销上只是略低于 AODV;总体来看,两种协议的路由开销基本相近.这是因为,MOD-AODV 在节点运动过程中能够建立相对稳定的路由,避免了频繁的路由查找,降低了路由查找数据传递所需的开销.协议在路由发起部分根据节点稳定度判决结果决定是否转发,限制了 RREQ 消息在网络中的洪泛,因此,MOD-AODV 路由协议的归一化路由开销低于 AODV.

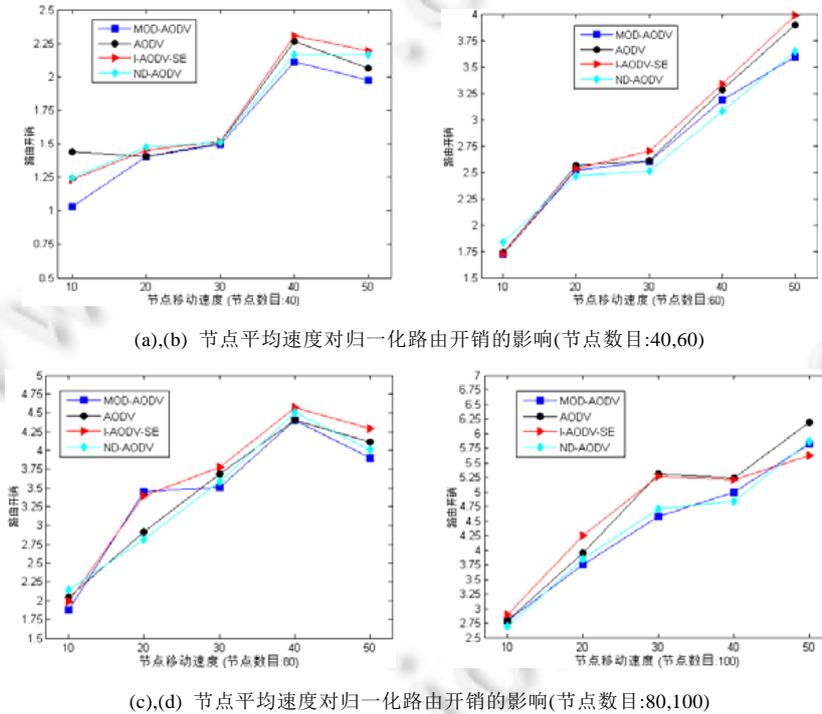


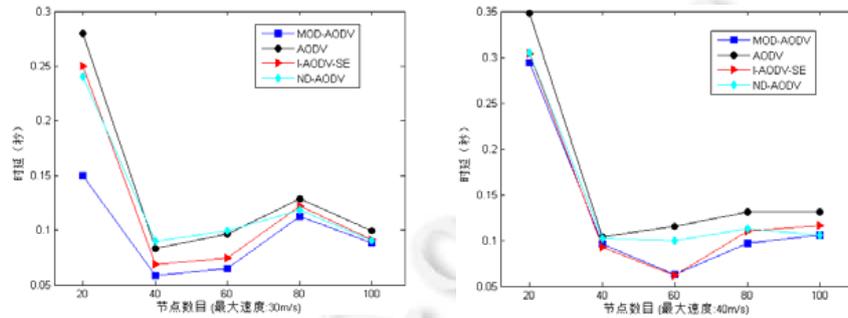
Fig.7 Normalized route overhead at different average speeds

图 7 不同平均速度下的归一化路由开销

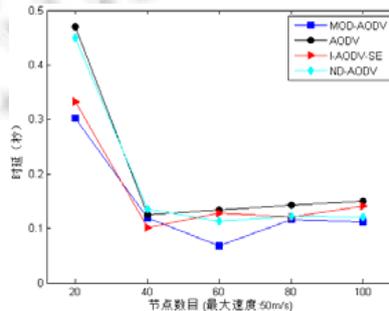
但是,在路由建立的过程中,因为涉及到节点相关信息的传递,所以相对于 AODV 来说,额外增加了在路由查找阶段所需的分组数量,节省的路由查找次数的分组用在路由查找阶段额外增加的分组上,因此整体路由开销并没有降低很多.而 I-AODV-S 在路由查找阶段也涉及到要获取信息,只需要额外增加路由分组数量而没有在其他地方来平衡这种额外的增加.同时,I-AODV-SE 协议通过优化路径,在估计路径权重时也加大了能量消耗,即增加了路由成本,因此路由开销较另外 3 种协议要高,尤其是在节点相对速度较大时,开销对比更明显.结

合图 6 所示 MOD-AODV 在不增加额外路由开销的前提下,有效地提高了数据的分组投递率,降低了端到端时延,间接表明 MOD-AODV 协议在性能上的优势。

图 8(a)~图 8(c)给出了节点最大移动速度分别为 30m/s、40m/s、50m/s 时,不同节点数目下的端到端时延。由图 8 可以看出:当节点数量为 20 时,4 种协议的延时都相对较高;之后,随着节点数量的增加,端到端延时整体呈上升趋势,其中,AODV 延时最高,MOD-AODV 延时相对较低。这是因为,当节点数量较少(数量为20)时,网络处于较稀疏(相对于 1000m×1000m 的场景)状态,4 种协议均会因为网络中节点彼此距离太远导致数据传输不稳定,此时,传输时延较大。在网络节点数量增加的过程中,AODV 因为采用了广播机制,致使路由请求时间过长而增大了数据传输时延。



(a),(b) 节点数目对端到端时延的影响(节点最大移动速度:30m/s,40m/s)



(c) 节点数目对端到端时延的影响(节点最大移动速度:50m/s)

Fig.8 End-to-end delay with different number of nodes

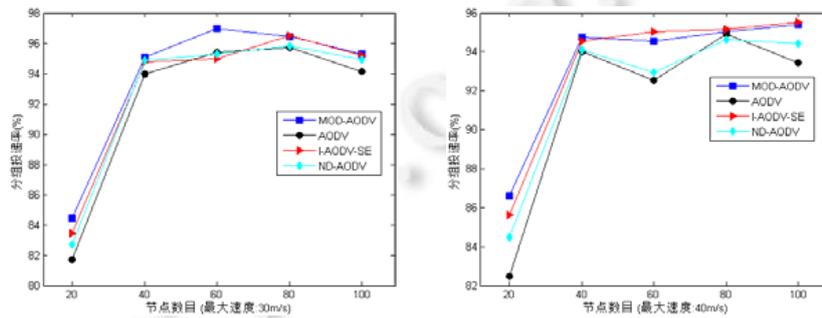
图 8 不同节点数量下的端到端延时

ND-AODV 通过计算邻居节点的数量来选择概率转发,能够缩短路由请求的时间,降低了数据传输的时延;但没有考虑到当前节点与上级节点的密度关系,使得计算的转发概率过大,在转发过程中仍存在很多不必要的重传数据.两种协议依据跳数选择路由,降低了该路由的时效性,需要再次查找路由而增大传输时延.I-AODV-SE 协议考虑了网络拓扑的稳定性以及节点能量信息,并计算了基于路径稳定和路径能量的路径权重值,选择权重小的路径传输数据包,因此,节点数目对端到端时延影响相对较小.MOD-AODV 在计算转发概率中,能够结合当前节点和目前所在区域的节点密度以及上级节点所在区域的节点密度,能够更全面地表示局部网络的稠密,相比 ND-AODV,可更大程度地降低不必要的重传,缩短了路由查找的时间,且建立的路由链路较为稳定,因此,端到端延时比另外两种改进协议要低.图 8(a)~图 8(c)的对比也表明,MOD-AODV 在不同移动速度场景下的传输时延也优于其他 3 种协议。

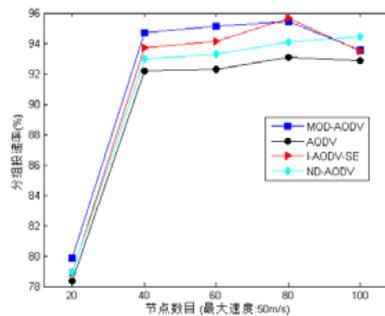
图 9(a)~图 9(c)给出了节点最大移动速度分别为 30m/s、40m/s、50m/s 时,不同节点数目下的分组投递率。由图 9 可以看出,3 种协议的分组投递率随着节点数量的增加呈上升趋势.AODV 协议分组投递率最低,这是因

为,随着节点的数量的增加,路由网络变得稠密,节点间链路之间的信号质量增加,传输路径更加稳定,使得网络分组投递率有所增长.而 ND-AODV 虽然利用网络邻居计算了转发概率,一定程度上减少了 RREQ 分组的转发,释放了部分可利用带宽,但是随着网络节点数量的增加,网络稠密度更高且节点处于运动状态,导致节点获取的网络邻居频繁地发生变化,使得转发概率的计算不够准确以及在节点运动相对速度大时导致计算失败,从而降低了数据分组投递率.

I-AODV-SE 择优选择权重小的路径传输数据包,提高了网络生存时间,能够有效地提高数据包传输率,避免了因节点能量问题而降低了数据包的丢包率,相对于 AODV 协议,投递率提高了不少.而 MOD-AODV 利用上级的邻居节点和本级节点动态地计算转发概率,能够连续、动态地获取网络的实际情况以调整转发概率,尽管节点的运动导致网络邻居频繁发生变化,但是考虑到 MOD-AODV 利用局部连续的思想,获得的邻居信息不是孤立的,因此不会出现突变的情况,路由的时效性也较高,使得网络的稠密度变化对节点的数据传输和路由查找不会带来明显的影响,因此分组投递率较另外两种协议要高.同样地,图 9(a)~图 9(c)也表明,MOD-AODV 在不同运动场景下对数据分组投递率有一定的改善.



(a),(b) 节点数目对分组投递率的影响(节点最大移动速度:30m/s,40m/s)



(c) 节点数目对分组投递率的影响(节点最大移动速度:50m/s)

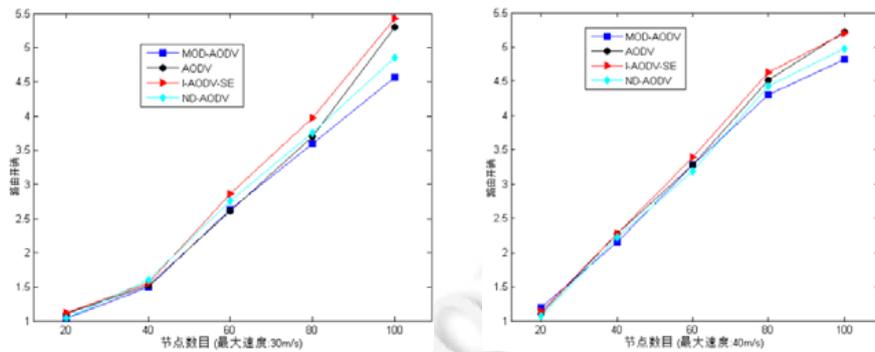
Fig.9 Packet delivery rate at different number of nodes

图 9 不同节点数量下的分组投递率

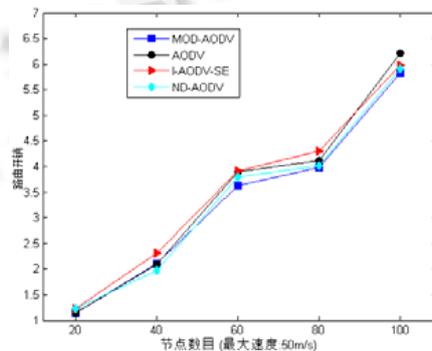
图 10(a)~图 10(c)给出了节点最大移动速度分别为 30m/s、40m/s、50m/s 时,不同节点数目下的归一化路由开销.由图 10 可以看出:4 种协议的路由开销随着节点数量的增加而增加.这是因为,随着节点数量的增加,网络建立的从源节点到目的节点的路由会增多,传输的路由分组也就更多,因此增大了网络的路由开销.由图 10 还可以看出:ND-AODV 和 AODV 在整体上路由开销很相近,MOD-AODV 则低于这两种协议.这是因为,随着节点数量的增加,ND-AODV 利用概率转发减少的 RREQ 分组相对就会增加,虽然额外增加了每次查找中的分组数量,但两者随着网络节点数量的不断增大而趋于平衡,因此两者路由开销接近.从文献[8]可以看出,I-AODV-SE 协议生存时间提高得并不多:一方面,I-AODV-SE 协议通过优化路径,避免了能量空洞问题,降低了能量消耗率;另一方面,I-AODV-SE 在估计路径权重时也加大了能量消耗,即增加了路由成本,并且在节点稠密和节点运动速

度大时更加明显.

MOD-AODV 在转发 RREQ 分组过程中因为利用局部邻居节点,使得计算的转发概率连续且相对 ND-AODV 更准确,更大程度地降低了 RREQ 的重复转发,降低了路由开销.同时,相比于 AODV 协议,建立的路由更稳定,也减少了路由查找的次数,降低了路由开销.对比图 8、图 9 可以看出:MOD-AODV 在网络节点平均移动速度基本不变的情况下,可在提高分组投递率、降低传输时延的同时,有效地降低路由的开销,也间接表明了 MOD-AODV 在性能上优于 AODV 和另外两种改进算法.



(a),(b) 节点数目对归一化路由开销的影响(节点最大移动速度:30m/s,40m/s)



(c) 节点数目对归一化路由开销的影响(节点最大移动速度:50m/s)

Fig.10 Normalized routing overhead for different number of nodes

图 10 不同节点数量下的归一化路由开销

## 4 总结

在网络节点密度较大的情况下,AODV 协议在路由发现阶段易导致广播风暴,影响网络性能,增大数据传输时延.另一方面,在网络拓扑处于动态变化、节点运动速度不一致的网络中,AODV 协议的路由选择方法导致链路的时效性较低,使得节点需要频繁地进行路由的重新查找与建立,极大地增加了数据传输时延和丢包率.针对上述问题,本文提出了上级邻居节点和本节点邻居节点的概念,基于局部邻居节点数量来计算转发概率;并且,在路由建立阶段利用跨层设计思想,结合物理层和 MAC 层的 LQI 值与网络层节点速度提出了链路权值概念,依据链路权值选择最佳路由,从而提高路由链路的时效性.仿真实验结果表明:改进协议能够更好地适应动态网络,并且提高了网络性能,增大了路由链路的时效性,降低了数据传输时延和丢包率.虽然仿真结果表明:改进后的协议在平均端到端时延和丢包率的指标上均优于 AODV 路由协议,但在路由开销上还未见明显改善.后续工作将在保证网络路由链路稳定性的同时,针对降低路由开销等问题继续展开深入的研究.

**References:**

- [1] Hu X, Cheng J, Zhou M, *et al.* Emotion-aware cognitive system in multi-channel cognitive radio ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine*, 2018,56(4):180–187.
- [2] Ejmaa AME, Subramaniam S, Zukarnain ZA, *et al.* Neighbor-based dynamic connectivity factor routing protocol for mobile ad hoc network. *IEEE Access*, 2016,4(99):8053–8064.
- [3] Li SB, Xiao XS, Liu JH. Road segmentation-based vehicle self-organizing network routing protocol. *Computer Engineering*, 2019, 45(02):38–43 (in Chinese with English abstract).
- [4] Abu Zant M, Yasin A. Avoiding and isolating flooding attack by enhancing AODV MANET protocol (AIF\_AODV). *Security and Communication Networks*, 2019,2019:1–12.
- [5] Liu C, Zhang G, Guo W, *et al.* Kalman prediction-based neighbor discovery and its effect on routing protocol in vehicular ad hoc networks. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 1–11.
- [6] He ZY. Optimization of ZigBee network routing algorithm based on global energy balance. *Computer Application Research*, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [7] Sun YW, Wang N, Sun XT. AODV routing protocol based on node density and link stability. *Computer Engineering and Design*, 2016,37(12):3201–3204+323 (in Chinese with English abstract).
- [8] Liu R, Li HY. A AODV improved routing protocol for wireless sensor networks. *Journal of Sensing Technology*, 2018,31(11): 1764–1769 (in Chinese with English abstract).
- [9] Li Q, Ke Z, Xia D, *et al.* A routing protocol for wireless sensor networks with congestion control. *Communications and Network*, 2013,5(3):156.
- [10] Huang BH, Mo JW, Lü Q. Improvement scheme of stable AODV protocol based on fuzzy neural network. *Computer Engineering and Science*, 2018,40(11):72–80 (in Chinese with English abstract).
- [11] Zhang Q, Agrawal DP. Dynamic probabilistic broadcasting in mobile ad hoc networks. In: *Proc. of the Vehicular Technology Conf. (VTC 2003-Fall)*, Vol.5. IEEE, 2003. 2860–2864.
- [12] Butt MR, Javed MM, Akbar AH, *et al.* LABILE: Link quality-based lexical routing metric for reactive routing protocols in IEEE 802.15.4 networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Future Information Technology*. IEEE, 2012. 1–6.
- [13] Lou L, Fan JH. An anti-jamming routing selection criteria based on the cross-layer constraints of channel state information for MANETs. In: *Proc. of the 2015 IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conf. (IAEAC)*. IEEE, 2015. 1000–1004.
- [14] Samundiswary P, Bhardwaj H. Performance analysis of energy aware AODV routing protocol for IEEE 802. 15. 4 enabled WSN. *Int'l Journal of Computer Applications*, 2013,63(19):43–46.
- [15] Du HT, Li Q, Ding GT, Wang YG, Zhu LJ. The research of AODV routing protocol based on link quality and node energy in WSN. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2016,29(7):1042–1048 (in Chinese with English abstract).
- [16] Wang ZC, Song BY, Bai LS. AODV routing strategy based on joint coding and load balancing. *Computer Science*, 2018,45(10): 106–110 (in Chinese with English abstract).
- [17] Mu J. An improved AODV routing for the zigbee heterogeneous networks in 5G environment. *Ad Hoc Networks*, 2017,58:13–24.
- [18] Huang B, Zhang XH. Mobile ad hoc network routing algorithms based on stable link. *Modern Electronic Technology*, 2018,41(17): 90–94+101 (in Chinese with English abstract).
- [19] Chen G, Tang J, Coon JP. Optimal routing for multi-hop social-based D2D communications in the Internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 1.

**附中文参考文献:**

- [3] 李世宝,肖雪松,刘建航.基于道路分段的车载自组织网络路由协议. *计算机工程*,2019,45(2):38–43.
- [6] 何智勇.基于全局能量均衡的 ZigBee 网络路由算法优化. *计算机应用研究*,2018.
- [7] 孙友伟,王楠,孙小田.基于节点密度和链路稳定性的 AODV 路由协议. *计算机工程与设计*,2016,37(12):3201–3204+323.
- [8] 刘蓉,李红艳.一种面向无线传感网络的 AODV 改进路由协议. *传感技术学报*,2018,31(11):1764–1769.
- [10] 黄保华,莫家威,吕琦.基于模糊神经网络的稳定 AODV 协议改进方案. *计算机工程与科学*,2018,40(11):1974–1982.
- [15] 杜海韬,李强,丁广太,等.WSN 中基于链路质量和节点能量的 AODV 路由算法研究. *传感技术学报*,2016,29(7):1042–1048.

- [16] 王振朝,宋伯尧,白莉莎.基于联合编码且负载均衡的 AODV 路由策略.计算机科学,2018,45(10):99-103.
- [18] 黄波,张小华.基于稳定链路的移动 Ad Hoc 网络路由算法.现代电子技术,2018,41(17):90-94+101.



陈侃松(1972—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为物联网,计算机视觉,人工智能.



阮玉龙(1993—),男,博士生,主要研究领域为物联网,无线传感网络.



李豪科(1995—),男,博士生,主要研究领域为物联网,无线传感网络.



王时绘(1965—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为软件工程,计算机网络,数据库.

www.jos.org.cn

www.jos.org.cn