

文章编号: 2095-4980(2020)05-0907-06

## MANET 中基于 AODV 的跨层多度量路由协议

陈书旺, 王真真, 尹晓伟, 宋树丽

(河北科技大学 信息科学与工程学院, 河北 石家庄 050000)

**摘要:** 针对无线自组网按需平面距离向量路由协议(AODV)路由度量的单一化而引起的节点能耗枯竭,形成的网络区域化以及路径拥塞问题,提出一种多度量路径选择机制的路由协议——M-AODV。以 AODV 路由协议为基础,在路由发现阶段,根据设定的能量阈值和接收信号强度阈值选择能量较高和信号强度较强的节点作为路由节点;在路径选择阶段,首先根据物理层的接收信号强度、拥塞度和跳数计算每段链路稳定值,其次将每段路径稳定值进行累加得到整条路径的稳定值,最后选择稳定值最大的路径作为最优路径。使用 NS2.35 仿真软件仿真,结果表明:改进后的协议与 AODV 相比在端到端延时缩短了近 30%,在数据包传输率、吞吐量和节点存活率方面优于 AODV 和 I-AODV-SE 路由算法。

**关键词:** 路径选择机制; M-AODV 协议; 接收信号强度; 拥塞度; 能量阈值

**中图分类号:** TN722

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2019185

## AODV-based cross-layer multi-metric routing protocol in MANET

CHEN Shuwang, WANG Zhenzhen, YIN Xiaowei, SONG Shuli

(School of Electronic and Information Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050000, China)

**Abstract:** Aiming for the depletion of node energy consumption caused by the simplification of Ad hoc On-Demand Distance Vector(AODV) routing metrics, and the resulting network regionalization and high latency problem of path congestion, this paper proposes a routing protocol with multi-metric path selection mechanism—M-AODV. Based on the AODV routing protocol, in the route discovery phase, a node with higher energy and stronger signal strength is selected as a routing node according to the set energy threshold and the received signal strength threshold. In the path selection phase, firstly, according to the received signal strength, congestion degree and hop count of the physical layer, the stability value of each link is calculated; secondly, the stable value of each path is accumulated to obtain the stable value of the entire path; finally, the path with the largest stable value is selected as the optimal path. Simulation experiments are performed by using NS2.35 simulation software. The results show that the end-to-end delay of improved routing strategy is reduced by nearly 30% compared with that of AODV. It is superior to traditional AODV and I-AODV-SE routing algorithms in terms of packet transmission rate, throughput and node survivability.

**Keywords:** path selection mechanism; M-AODV; received signal strength; congestion; energy threshold

无线自组网是一种无需基础设施的临时网络,常用于军事通信、灾难救援等临时场合<sup>[1]</sup>。网络拓扑的变化以及能量的限制,传统路由协议无法适用移动自组织网络(Mobile Ad hoc Network, MANET),所以设计 MANET 路由协议<sup>[2]</sup>。这些路由协议的路径选择基于最小跳数,在路由发现过程存在一些不足:a) 路径跳数越少可能节点之间的距离越长,节点的轻微移动可能引起路径的断裂而造成丢包;b) 路由协议对节点的能量没有进行管理,容易造成网络中热点现象<sup>[3]</sup>;c) 没有考虑拥塞情况而造成网络时延和丢包率增大,吞吐量降低,能量消耗增加。AODV<sup>[4]</sup>是一种借用了动态源路由协议(Dynamic Source Routing, DSR)路由发现、路由维护及

收稿日期: 2019-05-23; 修回日期: 2019-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41474121); 河北省科技厅 2018 年创新能力软科学研究项目资助(184576437)

作者简介: 陈书旺(1971-),男,教授,主要研究方向为现代传感技术、无线自组网路由及图像处理技术。email:27984960@qq.com

目的节点序列距离矢量(Destination-Sequenced Distance-Vector, DSDV)<sup>[5]</sup>路由协议的逐跳路由和目的节点序列号等更新机制,以 DSDV 路由协议为基础,结合 DSR 的按需路由思想加以改进的路由协议,相比其他路由协议具有一定的优越性。由于人们对网络需求的提高,对 AODV 性能的要求也在提高,所以学者们对 AODV 进行不同程度的改进。

李刚提出一种能量感知的路由协议(AODV-E)<sup>[6]</sup>,在路由请求和路由应答报文中增加能量信息,使得源节点可以掌握链路中节点的能量,最终考虑跳数和能量选择出最优路径。郑硕提出一种新型的路由协议 MWR-AODV<sup>[7]</sup>,它在路径的选择中考虑最小跳数、剩余能量、能量流失率和网络节点密度这 4 个因素选择最优路径,延长网络寿命。T Senthilkumarana 提出一种基于平均队列长度估计网络中动态拥塞检测和控制路由<sup>[8]</sup>的方法。使用平均队列长度检测当前的拥塞级别并向其邻居发送警告消息,然后邻居尝试找出到目的节点的无拥塞替代路径。Rajib Chowdhuri 通过使用节点剩余能量和聚合接口队列长度等参数计算不同路由上的负载,修改的 AODV 通过计算每条路线的权重值存储在路由表中,然后选择最优路径转发数据<sup>[9]</sup>。周德荣提出一种基于蚁群算法改进的 AODV 路由协议 Ant-AODV,结合蚁群算法与 Ad Hoc 网络的特点,考虑节点负载、路径跳数、路径时延等因素,对 AODV 的路由发现和路由维护进行改进<sup>[10]</sup>。方明清提出的 AODV-W 路由考虑了路径传输时延、链路稳定性和节点能量,并利用这些信息计算路径权值,再选择权值最低的路径作为数据传输通道<sup>[11]</sup>。为此,本文以 AODV 路由为基础,提出一种跨层多度量路径选择机制的路由协议。

## 1 多度量指标的计算

### 1.1 接收信号强度度量值

接收信号强度可预测数据传输期间每个链路中断的可靠性。选择接收信号小的节点,链路发生小的移动,可能会引起链路断裂,所以应选择信号强度大的节点。

设定接收信号强度阈值( $T_i$ ),如果  $RSS_{ix} < T_i$ ,则该节点不作为转发节点,接收信号强度  $RSS_{ix}$  以及接收信号阈值  $T_i$  计算公式<sup>[12]</sup>:

$$RSS_{ix} = \frac{G_r G_t S_t}{(4\pi x / \lambda)^2} \quad (1)$$

$$T_i = \frac{G_r G_t S_t}{(4\pi \times 0.905 4R / \lambda)^2} \quad (2)$$

式中:  $RSS_{ix}$  表示距离  $x$  的邻居节点  $i$  接收信号强度;  $\lambda$  是无线网络中使用的波长;  $R$  是天线覆盖半径;  $G_r$  和  $G_t$  是天线接收增益和发射增益;  $S_t$  是发射天线的最大发射功率。根据  $RSS_{ix}$  与  $T_i$  的关系计算接收信号强度度量值:

$$RSSM_i = \begin{cases} 0 & RSS_{ix} < T_i \\ (1 - T_i / RSS_{ix}) & RSS_{ix} \geq T_i \end{cases} \quad (3)$$

当接收信号强度小于接收信号阈值时,  $RSSM_i$  为 0,即对应链接失效,从节点路由表中删除对应的链接;当接收信号强度大于等于接收信号阈值时,  $RSSM_i$  由公式  $1 - T_i / RSS_{ix}$  计算得出结果,并将该链路以及对应的  $RSSM_i$  存储在路由表中。

### 1.2 拥塞度量

拥塞问题会造成网络时延和丢包率增大,吞吐量降低,能量消耗增加。本文提出了一种拥塞检测的方法:基于某时间段内链路的队列缓存占用率作为拥塞度。缓存占用率:某时间段此链路的队列长度与链路最大可承载长度的比。队列长度是每个节点的缓冲区中数据包总长度。当数据包进入或离开网络时,队列长度不断变化,但路径的最大承载量不变。所以不同时间或不同链路的缓存占用率不同,即拥塞程度也不相同。计算表示缓存占用率即拥塞度量值  $CM$ :

$$CM = L_s / L_t \quad (4)$$

式中:  $L_s$  为某一时间段链路的队列长度;  $L_t$  为链路可承载最大长度值。

### 1.3 跳数指标

当源节点发送路由请求包时,跳数(HOP)字段设为 0。随后请求包通过网络传播,每经过一个节点将此字段增加 1。因此,当分组到达目的节点时,其跳数表示该路由所需的总跳数,即路由的长度。

### 1.4 剩余能量

传统路由的选路策略大多基于跳数，没有考虑节点能量问题，当选路成功后会沿着最短路径一直进行数据传输，则会造成节点能量耗尽而引起网络区域化。路由选择策略中添加剩余能量感知因素就是避免剩余能量小的节点不断进行数据传输，延长网络的生存时间。定义能量阈值  $E_0$ 、剩余能量  $E_i^{res}(t)$ 。节点进行数据包的转发和接收时，会不断地进行能量的消耗，剩余能量及能量阈值计算公式：

$$E_i^{res}(t) = E_i^0 - C_i \tag{5}$$

$$E_0 = E_i^0 / 3 \tag{6}$$

式中： $E_i^{res}(t)$  是时间  $t$  的剩余能量； $E_i^0$  是节点  $i$  的最初能量； $C_i$  是节点  $i$  在时间  $t$  的能量消耗。 $p, p'$  和  $p''$  是发送、接收和监听的分组数。 $E_{tx}(p,i), E_{rx}(p',i), E_0(p'',i)$  是节点  $i$  发送、接收、监听分组所需能量。 $C_i$  可计算为：

$$C_i = E_{tx}(p,i) + E_{rx}(p',i) + E_0(p'',i) \tag{7}$$

$$E_{tx}(p,i) = IUt_b \tag{8}$$

式中： $I$  表示测量的电流； $U$  表示测量的电压； $t_b$  是以秒为单位传输数据包  $p$  所用的时间。

## 2 改进路由机制算法的实现

### 2.1 路由表的改进

在所提方案中增加了 4 个字段，即 RSSM, CM, REM 和  $\tau$ 。图 1 表示路由表的字段。传统的 AODV 路由表包含 HOP 计数、序列号等信息，修改后的 AODV 添加了节点剩余能量(REM)、拥塞度量值(CM)、接收信号强度(RSSM)以及路径稳定值  $\tau$ 。RSSM：存储来自下一跳节点的接收信号强度；CM：存储节点的拥塞度；REM：存储节点的剩余能量；路径稳定值  $\tau$ ：存储从源到当前节点的稳定性。MRREQ 路由请求包中添加路径稳定性值如图 2，通过把携带的路径稳定值传输给下段路径然后与所求下段路径稳定值相加，求出整段路径的稳定值。

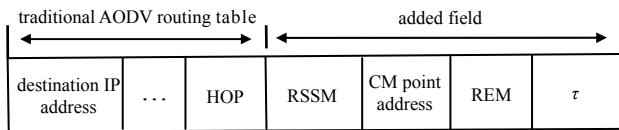


Fig.1 Routing table  
图 1 路由表

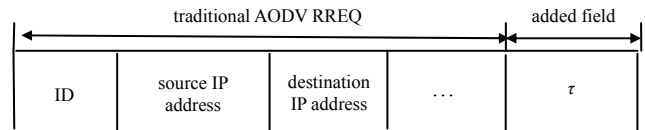


Fig.2 MRREQ routing request  
图 2 MRREQ 路由请求

### 2.2 路由算法的建立

路由协议的过程主要涉及 3 部分：路由发现，路由选择，路由维护，通过对前两部分进行改进，以便修改的 AODV 路由协议在路径选择中综合考虑 4 种因素选择最优路径。

#### 2.2.1 路由发现

修改后的 AODV 路由发现过程类似传统 AODV，并考虑了因为节点剩余能量太少造成能量的耗尽，影响到网络的整体性能；接收信号强度可以预测每个链路的可靠性，所以在选择路径过程中，分别对节点剩余能量和接收信号强度设定阈值以提高节点存活率。

当源节点需要向目的节点发送数据时，首先查找路由表是否有到目的节点的路由，如果没有则开启路由发现功能，不同的是修改后的协议在发送之前首先查看源节点相邻节点的接收信号强度，如果接收信号强度大于等于接收信号阈值则发送 MRREQ 路由请求包并根据式(3)计算 RSSM，存储在 RSSM 字段对应位置。MRREQ 含有：源节点地址，目的节点地址，跳数，以及修改后添加的路径稳定性  $\tau_0$  (由于源节点跳数为 0，所以求出的  $\tau_0$  为 0，即源节点发送的 MRREQ 携带的  $\tau_0=0$ )，当相邻节点接收到数据包时，有两种情况：

情况 1：该节点是目的节点，根据接收到的 MRREQ 更新该节点的路由表，首先根据路由表携带的跳数、拥塞、接收信号强度，根据式(9)计算路径的稳定性  $\tau_i$ ，然后与路由请求包中携带的链路稳定值相加计算该路径的稳定性  $\tau$ 。最后选择稳定值最大的进行 MRREP 的转发。

情况 2：该节点是中间节点，首先查看该节点剩余能量与能量阈值的关系，如果节点  $E_i^{res}(t) < E_0$ ，则丢弃该节点；如果  $E_i^{res}(t) \geq E_0$  则选择该节点对 MRREQ 进行转发。然后继续情况 1。最后当目的节点接收到 MRREQ 时，首先计算该节点路段的稳定性值  $\tau_i$ ，然后再与接收的 MRREQ 中携带的此路径上段路的稳定值相加，求出整条路径的稳定值，最后选择稳定值最大的进行 MRREP 的转发。

2.2.2 路由选择

在路由发现过程中目的节点会接收不同节点传送过来的路由请求包。然后目的节点会分别计算与相邻节点路径的稳定性值，并与接收到的不同 MRREQ 中携带的前段路径稳定值分别相加，求出不同路径的稳定性如式(10)所示，最后选择稳定值最大的路径进行数据的转发。每段路径稳定性根据路径链路可靠性(RSSM)、拥塞度量值(CM)以及跳数计算得到：

$$\tau_i = \frac{RSSM}{CM \times HOP} \tag{9}$$

从每段路径稳定性的计算式(9)可知，良好的路线应满足较低的跳数、较低的拥塞度和较高的接收信号强度。如果一段路径只考虑拥塞，没有考虑跳数和接收信号强度，那么求出的稳定值将无满足路径选择的要求；同理如果只考虑了接收信号强度，而跳数和拥塞值足够大，也不能作为最优路径。因此路径的好坏与拥塞度、接收信号强度和跳数紧密相连。每条路径是通过每一段路径的累加计算得到，所以在路径选择过程中会考虑每一段路径的好坏。计算公式如下：

$$\tau = \tau_0 + \tau_1 + \dots + \tau_i \tag{10}$$

$\tau_0$  初始化为 0，因为跳数刚开始为 0，所以由源节点发起的 MRREQ 携带的路径稳定值为 0，当邻居节点接收到源节点发送的 MRREQ 时，更新路由表计算该节点到源节点此段路径稳定性值  $\tau_1$ ，然后与 MRREQ 中的  $\tau_0$  相加作为即将转发的 MRREQ 中路径稳定值，依次类推，当下节点接收到刚才转发的 MRREQ 时，更新路由表计算该节点到上节点此段路径稳定性值  $\tau_2$ ，和接收到的 MRREQ 中路径稳定值相加得到经过的所有路径的稳定值，直到目的节点接收到 MRREQ 为止，求出整条路径稳定值。选择路径稳定值最大的作为最优路径。在路由选择过程中，能量问题对于路由协议的优化也起着至关重要的作用，本文在数据转发之前对每个节点的能量进行考虑：

步骤 1：规定节点剩余阈值和信号强度阈值(信号强度越大，距离越近，则链路越稳定；反之则链路越不稳定)。

步骤 2：在进行第一次路由发现过程中，接收到 MRREQ 数据包的节点，检查该节点的剩余能量是否大于相应的阈值，如果大于阈值，则转发 MRREQ 报文，否则丢弃该报文。路由建立过程如图 3 所示。

2.2.3 改进路由由算法的实现

在本文方法中，节点在路径建立时综合考虑邻居节点接收到的信号强度、拥塞、剩余能量、跳数。

如图 4 所示：源节点 S 要建立到目的端 F 的最优路径。L1:S→A→B→F,L2:S→C→D→F,L3:S→E→F，AODV 会选择跳数少的 L3 作为最优路径传输数据，改进的协议考虑路径拥塞、剩余能量、接收信号强度及跳数选择最优路径。设定节点初始能量为 100 J，由式(6)可得能量阈值为 33.34 J。

L1：A 的 RSS 为 100 dBm，阈值  $T$  为 70 dBm，剩余能量为 70 J；B 的 RSS 为 90 dBm， $T$  为 75 dBm，剩余能量为 30 J，由于 B 的剩余能量小于能量阈值，所以排除路径 L1。L2：C 的 RSS 为 80 dBm， $T$  为 50 dBm，剩余能量为 55 J，拥塞为 1/3，D 的 RSS 为 85 dBm， $T$  为 60 dBm，剩余能量为 50 J，拥塞为 3/7；F 的 RSS 为 100 dBm， $T$  为 70 dBm，剩余能量为 70 J，拥塞为 1/3。L3：设 E 的 RSS 为 90 dBm， $T$  为 40 dBm，剩余能量为 60 J，拥塞为 1/2，F 的 RSS 为 100 dBm， $T$  为 70 dBm，剩余能量为 70 J，拥塞为 1/3。根据式(9)和式(10)计算路径 L2 和 L3 的路径稳定性，发现路径 L2 的稳定性大于 L3，所以最终选择 L2 作为最优路径。相比 AODV 在选择路径时有很大的优越性。

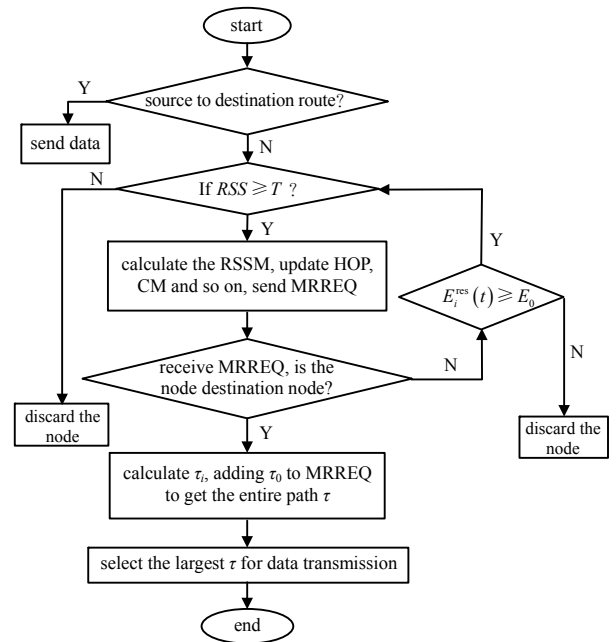


Fig.3 Route establishment  
图3 路由的建立

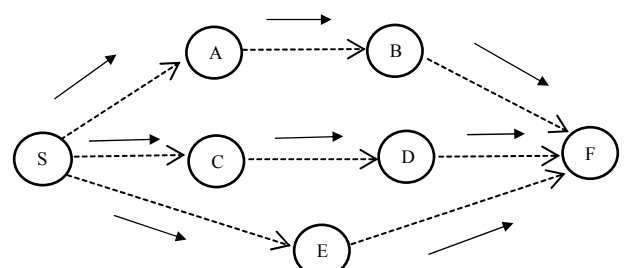


Fig.4 Routing process  
图4 路由过程

### 3 仿真与分析

#### 3.1 仿真环境

对改进的 M-AODV 协议与 AODV、I-AODV-SE 协议进行仿真，以 Ubuntu Linux+NS2.35 为实验仿真环境，在配置环境、网络环境和状态特征相同的情况下进行对比分析。仿真环境中，无线模型 Mac 采用 802.11，各节点随机分布在 1 800 m×840 m 区域内，数据流类型为 CBR，模拟时间为 200 s，初始能量为 100 J，通过改变网络中节点数对吞吐量、数据包传输率、端到端延迟和幸存节点的百分比进行测试并对性能结果进行分析。

吞吐量：指网络中每单位时间目标节点接收的平均数据量；数据包传输率：指目标节点接收的数据包总数与网络中源节点生成或发送的数据包总数之比；端到端的延迟：指所有数据包从源节点发送数据包到目的节点所需的平均时间；幸存的节点百分比：幸存节点的百分比测量为模拟结束时节点总数中存活的节点百分比。

#### 3.2 节点数的影响

节点数对吞吐量、分组传送率、端到端延迟和节点存活百分比的影响，如图 5 所示。节点数从 10 到 100 变化，例如 20,40,60,80,100，节点速度取 10 m/s，数据速率取为 16 kbps。CBR 流量连接的最大值取 10。

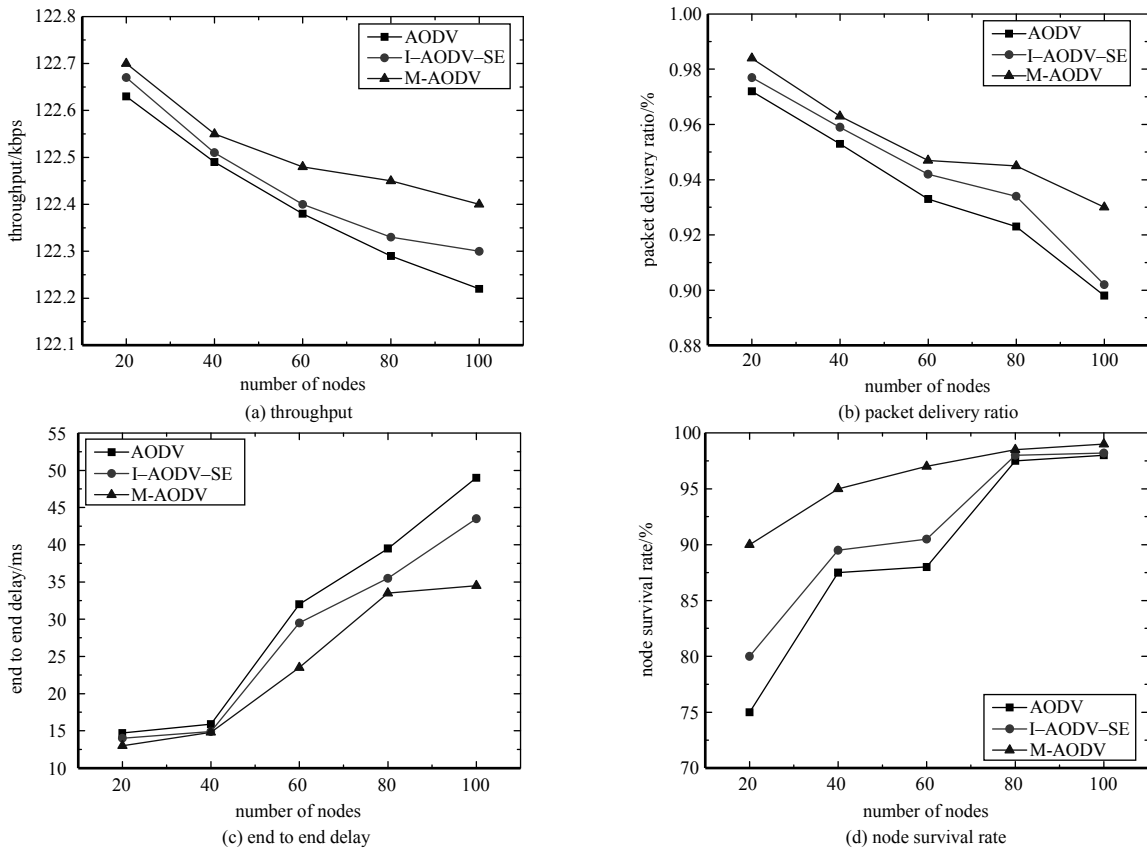


Fig.5 Effect of changes in the number of nodes on transmission performance

图 5 节点数的改变对传输性能的影响

图 5(a)显示，改进后的协议相比于 AODV 和 I-AODV-SE 具有更高吞吐量。在 M-AODV 中，把具有较少拥塞、较高剩余能量、较高接收信号强度的节点作为传输的下一跳。路径损坏的数量将减少，每秒将传递更多数据包。因此相比其他协议来说吞吐量较高。

图 5(b)显示，这 3 种协议包投递率都随节点速度的增加而降低。是由于节点的频繁移动，出现更多的路由中断，导致更多数据包丢失。本方案由于将接收信号强度作为路由选择的因素之一，随着节点速度的增加，路由不会频繁中断，因此 M-AODV 相比 AODV 和 I-AODV-SE 具有更高的包投递率。

图 5(c)显示，M-AODV 与其他两个协议相比有更小的端到端的延迟。总体来看端到端的延迟随着节点数量的增加而增加。M-AODV 的延迟在某一点之后会基本趋于平缓，是因为在选择从源到目的地的路径时，考虑了剩余能量、接收信号强度和跳数等因素，使得大型网络中的路径破坏较小。当路由中断较少时，数据不需要在缓冲区中长时间排队，从而最终减少了平均端到端延迟，因此比 AODV 和 I-AODV-SE 延迟小。

图 5(d)显示,所有协议节点存活率随着节点数量的增加而增加,是因为节点数增加,但选定参加通信的节点数没有发生变化。由图也可以看出 M-AODV 相比于其他两个协议具有更高的节点存活率,是因为在路径选择的过程中添加了剩余能量这个准则,所以可以让更多的节点避免死亡,因此相比 AODV 和 I-AODV-SE 来说节点的死亡数较少。

#### 4 结论

通过对 AODV 路由协议度量问题的研究,提出一种多度量的 M-AODV 路由协议。该协议首先调用物理层的接收信号估计数据传输期间链路的可靠性,用路径的队列缓存占用率来估计网络拥塞状况并添加到路由表中,然后综合考虑路由表中接收信号强度、路径的拥塞和跳数计算路径稳定性,最后选择稳定性最大的路径作为数据传输路径,并将中间节点剩余能量与能量阈值进行对比,丢弃能量小的节点,避免节点能量耗尽造成热点现象。并通过仿真将所提出的方案与传统的 AODV 和 I-AODV-SE 方案进行了比较,结果表明,改进方案在数据包传输率、吞吐量、平均端到端延迟和节点存活部分有了进一步的改善。

#### 参考文献:

- [1] 刘蓉,李红艳. 一种面向无线传感网络的 AODV 改进路由协议[J]. 传感技术学报, 2018,31(11):1764-1769. (LIU Rong,LI Hongyan. An improved AODV routing protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Transduction Technology, 2018,31(11):1764-1769.)
- [2] 屈正庚. 一种无线多媒体传感器网络路径最优路由算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(6):943-947. (QU Zhengeng. An optimal routing algorithm for wireless multimedia sensor networks[J]. Journal of Terahertz Science and Electronics Information Technology, 2016,14(6):943-947.)
- [3] 孙彦景,林昌林,江海峰. 一种能量高效的分布式非均匀分簇路由算法[J]. 传感技术学报, 2015,28(8):1194-1200. (SUN Yanjing,LIN Changlin,JIANG Haifeng. An energy-efficient distributed non-uniform clustering routing algorithm[J]. Journal of Transduction Technology, 2015,28(8):1194-1200.)
- [4] 郭鹏程. Ad Hoc 网络 AODV 按需路由协议的研究[J]. 科学技术与工程, 2013,13(18):5207-5213. (GUO Pengcheng. Research on AODV on-demand routing protocol in Ad Hoc network[J]. Science Technology and Engineering, 2013,13(18):5207-5213.)
- [5] PERKINS C E,BHAGWAT P. Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing(DSDV) for mobile computers[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1994,24(4):234-244.
- [6] 李刚. MANET 中基于能量的改进型 AODV 协议[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016,37(4):503-506. (LI Gang. Energy-based improved AODV protocol in MANET[J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science Edition), 2016,37(4):503-506.)
- [7] 郑硕,胡寿伟,陈佳品,等. 基于 AODV 的多度量无线路由算法研究[J]. 半导体光电, 2016,37(6):846-852. (ZHENG Shuo,HU Shouwei,CHEN Jiapin,et al. Research on multi-metric wireless routing algorithm based on AODV[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016,37(6):846-852.)
- [8] SENTHILKUMARANA T,SANKARANARAYANAN V. Dynamic congestion detection and control routing in Ad Hoc networks[J]. Journal of King Saud University—Computer and Information Sciences, 2013,25(1):25-34.
- [9] BARMA M K D,CHOWDHURI R,DEBBARMA N,et al. Enhancing the performance of AODV using node remaining energy and aggregate interface queue length[C]// Proceedings of the 2013 International Symposium on Computational and Business Intelligence. New Delhi,India:IEEE, 2013:77-80.
- [10] 周德荣. 基于蚁群算法改进的 AODV 路由协议研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2014,39(11):75-80. (ZHOU Derong. Research on improved AODV routing protocol based on ant colony algorithm[J]. Journal of Southwest China Normal University(Natural Science), 2014,39(11):75-80.)
- [11] 方明清,丁刚毅,赵艳玲. 面向 AODV 的有效路由选择的研究[J]. 现代电子技术, 2019,42(16):47-50. (FANG Mingqing,DING Gangyi,ZHAO Yanling. Research on effective routing for AODV[J]. Modern Electronic Technology, 2019,42(16):47-50.)
- [12] 张冰涛. MANET 中基于蚁群算法的改进 DSR 协议[J]. 计算机应用研究, 2018,35(8):2461-2468. (ZHANG Bingtao. Improved DSR protocol based on ant colony algorithm in MANET[J]. Computer Application Research, 2018,35(8):2461-2468.)