

一种基于节点状态的 MANET 路由发现和建立策略

赵新伟 刘 伟

(信息工程大学五院 郑州 450001)

摘 要 AODV 是 MANET 网络中典型的按需路由协议。针对 AODV 路由策略的缺陷,提出一种基于节点状态的路由发现和建立策略。通过对 MANET 网络建模,在路由发现时,利用马尔可夫链预测邻节点的状态,在原有 AODV 路由策略的基础上,上一跳节点利用 AODV 路由发现时建立的反向路由获取邻节点的状态信息;在路由建立时,结合邻节点的状态信息,优先选择处于空闲状态和休眠状态的节点作为下一跳路由。仿真结果表明,基于该策略优化的 AODV 路由协议提高了网络中数据包的投递率,降低了端到端延迟,改善了网络性能。

关键词 节点状态,马尔科夫链,延迟,移动自组织网络,投递率,AODV 协议

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.06.016

MANET Routing Discovery and Establishment Strategy Based on Node State

ZHAO Xin-wei LIU Wei

(Institute of Fifth, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract AODV is a typical on-demand routing protocol in MANET networks. For the defect of AODV routing strategy, a routing discovery and establishment strategy based on node state was proposed. By modeling the MANET network, Markov chain is used to predict the state of neighbor nodes during routing discovery. Based on the original AODV routing strategy, the last hop node uses the reverse routing established by the AODV routing discovery to obtain the status information of the neighbor node. When routing is set up, combining neighboring node status information, the idle and dormant nodes are preferentially selected as the next hop routing. The simulation results show that the AODV routing protocol optimized based on this strategy improves the packet delivery rate in the network, reduces the end-to-end delay, and improves the network performance.

Keywords Node state, Markov chain, Delay, Mobile ad-hoc networks, Delivery rate, AODV protocol

1 引言

移动自组织网络^[1-3] (Mobile Ad-hoc Networks, MANET)是由一组带有无线通信收发装置的移动终端节点组成的一个多跳、临时和无中心的网络,在资源有限的战场环境侦查、灾情探测、智慧交通等方面具有广泛应用。不同的场合对网络的具体要求不同,比如在一些特定场景下要求网络满足一定的 QoS 服务;在战场环境下要求网络具有一定的抗毁性;还有一些场景要求数据能够实时传输,尽可能地降低数据传输中端到端的延迟。根据不同的应用场景,很多学者研究并提出了不同的针对 MANET 网络的路由协议。由于路由协议决定了网络中数据的传输方式,因此路由协议对网络性能的影响非常大。针对现有路由协议进行优化,从而改善网络性能,是研究 MANET 网络的重要内容。

2 AODV 介绍及其研究

AODV 由 Nokia 研究中心的 Perkins 和加利福尼亚 Santa

Barbara 大学的 Belding-Roryer 以及 Cincinnati 大学的 Das 等共同开发,已经被 IETF MANET 工作组公布为自组网路由协议的 RFC 标准,是 MANET 网络中典型的按需路由协议。

针对在不同的应用场景下,如何使 AODV 协议能更好地适应具体的 MANET 网络,从而提高网络性能的问题,许多学者从不同的角度对 AODV 进行了分析和研究,并提出了改进方法。文献[4]为改善网络吞吐量、分组投递率和端到端延迟,提出在 AODV 协议中引入一种基于优先级的拥塞控制机制,该机制的主要目的是发送具有最小延迟的更高优先级的分组。文献[5]首先计算基于 AODV 协议的 MANET 网络中节点的信誉值,然后隔离具有负信誉值的节点,并且将该信息发送给相邻节点以完成链路的局部修复,提高了分组传递率和吞吐量。文献[6]针对 MANET 网络提出了一种跨层设计和优化的 AODV-CRS 协议,统筹考虑网络层和 MAC 层,路由建立时,首先在网络层利用 AODV 路由发现机制建立路由,然后在 MAC 层申请预留带宽资源,改善了网络性能,文

到稿日期:2018-06-13 返修日期:2018-10-04 本文受国家自然科学基金项目(61502527,61702549)资助。

赵新伟(1978—),男,硕士,实验师,主要研究方向为高性能网络,E-mail:zxwzxwzxw_2004@163.com(通信作者);刘 伟(1966—),男,硕士,高级实验师,主要研究方向为高性能网络。

献[7]在 AODV 的基础上提出了基于位置信息和链路稳定性评估的路由协议 LL-AODV,改善了端到端的延迟等性能。文献[8]把 AODV 和 DSDV 协议放在一起进行比较分析,得出在吞吐量、包投递率和路由开销等方面 AODV 优于 DSDV。文献[9]灵活使用 AODV 的 HELLO 消息报文来检测链路的断裂情况,并使用本地修复机制来修复和发现备用路由,取得了较好的效果。文献[10]针对 AODV 协议在路由发现过程中使用 RREQ 路由请求包进行全局泛洪而产生大量控制开销的问题,提出在节点中加入全球定位系统(GPS),在路由请求包 RREQ 和路由回复包 REEP 以及节点的路由表中分别添加节点的 GPS 信息,通过该方式减少了路由发现时涉及的节点数量,从而降低了路由控制开销。文献[11]重点研究了自组织网络的连接性问题,将网络中节点的连接性作为网络的重要特征,研究了连接性与网络中节点个数和节点传输范围之间的关系,通过确定网络参数,使得在基于 AODV 路由协议的网络中指定区域的数据包投递率超过 90%。文献[12]提出一种基于 AODV 协议的包含链路故障避免机制和路由可用性检查机制的新算法,链路故障避免机制使得与下一跳的连接将要断开时,路由可用性检查机制能够找到备用路由。文献[13]提出基于能量和负载的路由协议 ENL-AODV,在转发路由请求包 RREQ 时,引入能量和负载因子,选择具有足够能量的链路作为路由,提高了包投递率和吞吐量等性能,并且降低了平均端到端延迟。文献[14]针对车载 MANET 网络,提出了一种基于 AODV 的增强路由机制,通过与 RSU(Road Side Units)具有更长直接通信持续时间的车辆建立备用路由,减少了稀疏放置的 RSU 环境中的路由恢复时间和路由故障数量,提高了网络性能。文献[15]通过确定扩展环搜索的最佳值来优化 AODV 协议,从具有最大扩展环搜索值的 AODV 协议的优化测试结果来看,吞吐量增加了 5.67%,数据包传输率增加了 5.73%,归一化路由负载减少了 4.66%。

文献[4-15]从不同角度对 MANET 网络性能进行了改善,并取得了一定的效果;然而由于在 MANET 网络中,节点可以频繁地自由移动,易导致路由失效,一旦出现路由失效,就需要寻找备份路由或者重新启动路由发现过程,这对 MANET 网络性能的影响非常大。基于此,本文提出一种基于预测节点状态的路由发现和建立策略,根据统计学规律,利用马尔可夫链建立模型,并基于此策略对 AODV 协议进行改进和优化。

3 理论模型及问题描述

本节首先简要介绍图论和马尔可夫链模型,然后通过分析 MANET 网络数据包的发送过程提出问题,最后运用图论的相关知识和马尔可夫链模型来解决问题。

3.1 图论

图(Graph)由两个集合构成,一个是非空但有限的顶点集合 V ,另一个是描述顶点间关系的集合 E ,因此图可以表示为 $G=(V, E)$ 。每条边是一对顶点 (v, w) 且 $v, w \in V$,通常 $|V|$ 和 $|E|$ 表示顶点的个数和边的数量。

3.2 马尔可夫链模型

马尔可夫链,因安德烈·马尔可夫(A. A. Markov)得名,是数学中具有马尔可夫性质的离散时间随机过程。它描述了这样一个现象:对于一个系统,由一个状态转至另一个状态的过程中存在着转移概率,并且这种转移概率可以依据其紧接的前一种状态推算出来,与该系统的原始状态和此次转移前的马尔可夫过程无关。马尔可夫链是统计学中重要的发现,被广泛用于预测某一经济现象、语音识别、自然语言处理、计算机视觉等方面。

3.3 问题描述

在 MANET 网络中,当两个节点处于彼此的通信覆盖范围内时,它们可以直接通信;但是由于节点的通信覆盖范围有限,两个相距较远的节点要进行通信时需要通过它们之间的节点进行转发才能实现。典型的移动 MANET 网络的构成如图 1 所示。

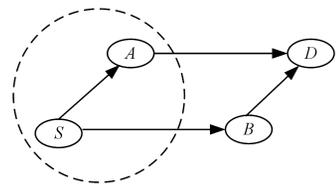


图 1 MANET 转发数据示意图

Fig. 1 MANET forwarding data diagram

节点 S 向节点 D 发送数据包时,由于目的节点 D 不是其邻节点,因此必须经过节点 A 的转发才能向目的节点 D 发送数据。节点 S 向节点 A 发送数据包时,节点 A 存在以下几种情况:

- (1)立即转发数据包给下一跳节点;
- (2)等待一段时间即延迟转发数据包给下一跳节点;
- (3)丢弃数据包,不再转发该数据包。

最理想的情况是第一种,数据包能够立即得到转发;最坏的情况是第三种,在转发超时后,需要节点 S 重新发送数据包。经过分析可知,节点 A 是否立即转发数据包或者丢弃数据包与节点 A 所处的状态有关。在 Mobicom 2002 国际会议上,Estrin 指出传感器节点有发送、接收、空闲和睡眠几个状态,文献[16-17]也指出 MANET 网络中节点存在着 4 种状态,即发送、接收、空闲和睡眠状态,当节点 A 处于发送和接收数据包状态时,要转发的数据包必须等待一段时间,如果等待时间过长,数据包可能会被丢弃,此时需要重新发送,这会导致丢包率和数据传输延迟增加,从而降低数据传输的效果。因此在路由建立过程中,如果能判定邻节点的状态并选择处于空闲或休眠状态的节点作为路由,然后进行数据传输,将能有效改善网络的性能。

3.4 建立模型

MANET 网络的特点是整个网络由若干个无中心、自组织的节点组成,每一个节点可以自由移动,邻节点之间存在着能够传输数据包的有向链路。依据图论的相关理论,MANET 网络构成了一个有 k 个节点和 n 条链路的有向图,记为 $G=(K, L)$,其中 $K=\{n_1, n_2, n_3, \dots, n_k\}$ 是网络中 k 个节点的集合, $L=\{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ 是网络中 n 个链路的集合。当有数据

要从源节点 s 向目的节点 d 传输时,启动路由发现机制,建立一条从源节点到目的节点的路由 R 。路由 R 由这条路由上的 m 个节点构成的集合 $K1$ 和相邻节点之间的链路构成的集合 $L1$ 两部分构成,其中 $K1 = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$, $L1 = \{n_1 \rightarrow n_2, n_2 \rightarrow n_3 \dots n_{m-1} \rightarrow n_m\}$ 。为了便于理论分析,对 MANET 网络进行分析后给出一些合理的假设。

(1)网络中所有的节点都具有相同的特点;

(2)网络中的任一节点在任一时间片 t 只具有接收数据包、发送数据包、休眠和空闲 4 种状态,且随着时间片的推移,节点在这 4 个状态间转换;

(3)节点在 $t+1$ 时刻所处的状态只与节点在 t 时刻所处的状态有关,而与节点在 t 时间之前的状态无关。

经过以上分析可知,网络中每一个节点的状态转换是一个符合马尔可夫链模型的离散随机过程。在此预测机制中,利用马尔可夫链对网络中的节点进行模拟,节点的不同状态对应马尔可夫链的不同状态:如果一个节点有 N 种工作状态,则可用马尔可夫链的 N 种状态进行模拟。在这种模型中,每个节点都具有一系列随机数 X_1, X_2, X_3, \dots ,它们分别代表节点在每个时间片 $time_step$ 所处的状态,每个时间片节点只能有一个状态,因此如果 $y_n = k$,则代表节点在第 n 个时间片处于状态 k 。另外,如果节点在某个时间片处于状态 k ,则节点会以某个固定的概率 P_{kj} 在下个时间片转换为状态 j 。这个概率定义为节点的一步状态转移概率,可通过 $P_{kj} = P\{y_{n+1} = j | y_n = k\}$ 来表示。根据概率论的有关知识: $P_{kj} = \frac{P\{y_{n+1} = j, y_n = k\}}{P\{y_n = k\}}$ 。

为了便于数学推导,将空闲状态记为 $Free_status$,发送数据包状态记为 $Send_status$,接收数据包状态记为 $Receive_status$,休眠状态记为 $Sleep_status$,节点有这 4 个状态。假设节点在某个时刻所处的状态为 C_i ,则 $C_i \in \{Free_status, Send_status, Receive_status, Sleep_status\}$ 。把 $y_n = C_i$ 定义为节点在第 n 个时间片处于状态 C_i ,把 $p_{C_i \rightarrow C_j}$ 定义为节点在 $n+1$ 时间片状态由 C_i 转换为 C_j 的概率,这个概率定义为节点的一步状态转移概率,根据马尔可夫链模型和概率论的有关知识有 $p_{C_i \rightarrow C_j} = P\{y_{n+1} = C_j | y_n = C_i\}$ 。可以看出,这是一个由不同的概率数值组成的矩阵:

$$\begin{matrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1C_j} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2C_j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{C_1} & P_{C_2} & \cdots & P_{C_i \rightarrow C_j} \end{matrix}$$

该矩阵被称为状态转移矩阵。通过马尔可夫链预测节点在某一时间片的状态取决于计算状态转移矩阵的准确性。在接下来的仿真实验中,根据节点的初始状态,计算出转移矩阵后,就可以在路由建立时预测出邻节点的状态信息,为路由选择提供依据。

3.5 转移矩阵计算方法

MANET 网络中任一节点在某一时刻所处的状态有 4 种可能性,即空闲状态、发送数据包状态、接收数据包状态和休眠状态,且这 4 种状态是互斥的,即任一时刻只能处于 4 种状态中的一种。分别用数字 0,1,2,3 表示节点的 4 种状态,即

$Free_status, Send_status, Receive_status, Sleep_status$ 的值分别是 0,1,2,3,如果某一个节点在某一个时刻正在发送数据包,那么就把该节点的状态信息设置为 1。为了计算转移矩阵,针对一个节点,记录其在连续 30 个时间片中每一个时间片的状态,获得一组数据。假如所获数据为:1,1,2,3,0,2,3,0,3,1,0,2,1,2,3,3,0,1,3,3,0,0,2,3,1,3,0,2,3,3。可以看到 0,1,2,3 分别出现了 7 次、6 次、6 次和 11 次,当前状态为 0 和下一个时间片可能的组合有:0-2,0-3,0-2,0-1,0-0,0-2,0-2。其中,0-0 出现的次数为 1,占所有可能出现次数(7)的 0.1429;0-1 出现的次数也是 1,占所有可能出现次数的 0.1429;0-2 出现的概率为 0.5714;0-3 出现的概率为 0.1429。因此可以计算出转移矩阵第一行的数值分别为 0.1429,0.1429,0.5714,0.1429。同理,当前状态为 1 时,下一步所有可能的组合为 1-1,1-2,1-0,1-2,1-3,1-3,因此转移矩阵的第二行数值为 0.1667,0.1667,0.3333,0.3333。最后,求出状态转移矩阵为:

$$\begin{matrix} & 0 & 1 & 2 & 3 \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0.1429 & 0.1429 & 0.5714 & 0.1429 \\ 0.1667 & 0.1667 & 0.3333 & 0.3333 \\ 0 & 0.1667 & 0 & 0.8333 \\ 0.5 & 0.2 & 0 & 0.3 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

基于状态转移矩阵,如果测得了该节点在某个时间片的状态,就可以计算出在下一个时间片各种状态出现的可能性。比如测得某个节点在某个时间片的状态为 2,即该时刻节点处于接收数据包状态,根据转移矩阵,下一个时间片出现各种状态的概率分别是 0,0.1667,0,0.8333,因此近似认为下一个时间片该节点的状态为 3,即休眠状态。可以看出,状态转移矩阵的准确性影响着判定结果,因此计算节点状态转移矩阵时,选取测得的连续时间片状态数据越多,结果就越准确。

4 路由发现和建立策略

AODV 选择最小跳数的路由作为转发数据包的链路,但是通过实际分析发现,提高数据包的投递率和降低端到端的延迟除了与选择的路由跳数有关外,还与路由上的每一个转发节点的忙闲状态有关,当转发节点处于发送数据包和接收数据包等忙状态时,要发送的数据包需要等待一定的时间,如果等待的时间过长,数据包还可能会被丢弃,需要重新发送。因此在某些应用场景下,以最小跳数作为路由选择的依据并不是一个最优的选择。

4.1 路由发现过程

结合 AODV 路由选择机制,在传统的选择最小跳数作为路由的基础上,统筹考虑跳数和节点状态信息;在选择空闲状态和休眠状态邻节点作为路由的基础上,再选择跳数较小的路由作为最终路由。自此,路由建立完成并开始转发数据包,当有数据包要转发时,上一跳节点通过 RREQ 向邻节点发送路由请求后,邻节点和上一跳节点会建立反向路由机制,同时邻节点向上一跳节点发送节点状态信息包,状态信息包包含当前状态 C_i 和节点的状态转移矩阵,上一跳节点收到邻节点发来的状态信息包后,本地记录相关信息并将其作为路由建立时选择路由的依据。路由发现过程的流程图如图 2 所示。

假设源节点 S_0 要发送数据包到目的节点 S_d , 其路由发现算法如下:

```

if(源节点  $S_0$  要发送数据到目的节点  $S_d$ )
  for(当前节点  $S_i$  的邻节点不是目标节点)
  {
     $S_i$  向邻节点  $S_{i+1}, S_{i+2}, S_{i+3} \dots$  广播 RREQ 报文
     $S_{i+1}, S_{i+2}, S_{i+3} \dots$  建立到  $S_i$  的反向路由
    通过反向路由,  $S_{i+1}, S_{i+2}, S_{i+3} \dots$  发送本节点的状态信息包给  $S_i$ 
     $S_i$  本地记录每个邻节点的状态信息
  }
if(邻节点是目标节点)
  break //退出循环
end if
  
```

不同算法的执行时间和占用的存储资源是不一样的, 因此有必要对算法进行复杂性分析。算法复杂性包含时间复杂性和空间复杂性: 时间复杂性指的是运行该算法即执行所有语句需要的时间; 空间复杂性指的是运行该算法需要占用的计算机存储资源。当前随着计算机硬件技术的发展, 存储容量的局限性对算法的影响大大降低, 因此只需要考虑算法的时间复杂性。

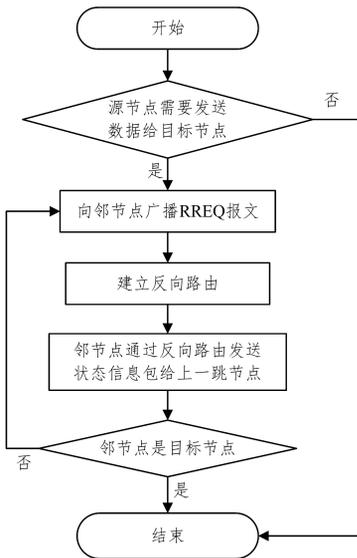


图 2 路由发现流程图

Fig. 2 Flow chart of route discovery

对于路由发现算法, 在最坏情况下, 若网络中有 n 个节点, 距离目的节点最近的源节点需要发送数据时, 源节点需要遍历网络中所有的节点来获取邻节点的状态信息, 即算法循环体中的语句需要执行 n 次, 因此算法的时间复杂度是一个与 n 有关的线性函数, 假设为 $T(n)$, 则 $T(n) = O(n)$ 。

4.2 路由建立过程

路由发现结束后, 上一跳节点已经获取了邻节点的状态信息。基于状态信息和跳数, 开始路由由建立过程。路由建立过程的流程图如图 3 所示, 算法如下:

```

if(源节点有到目的节点的路由)
  从已有的链路上转发数据包到目的节点  $S_d$ 
else
  
```

```

for(下一跳节点不是目的节点)
{
  当前节点  $S_i$  选择处于空闲状态的邻节点作为下一跳路由
  if( $S_i$  没有处于空闲状态的邻节点)
     $S_i$  选择处于休眠状态的邻节点作为下一跳路由
  else if( $S_i$  没有处于休眠状态的邻节点)
    根据反向路由信息选择最小跳数路由
    if(下一跳节点是目的节点)
      break
  }
end if
  
```

对于该算法, 在最坏情况下, 当距离目的节点最远的源节点需要发送数据时, 如果源节点路由表中没有到目的节点的路由, 则需要发起路由建立过程。从源节点开始, 需要依次判定邻节点的状态来建立下一跳路由, 直到目的节点, 因此网络中有 n 个节点时, 算法循环体中的语句需要执行 n 次, 算法的时间复杂度是一个与 n 有关的线性函数, 假设用 $T(n)$ 表示, 那么 $T(n) = O(n)$ 。

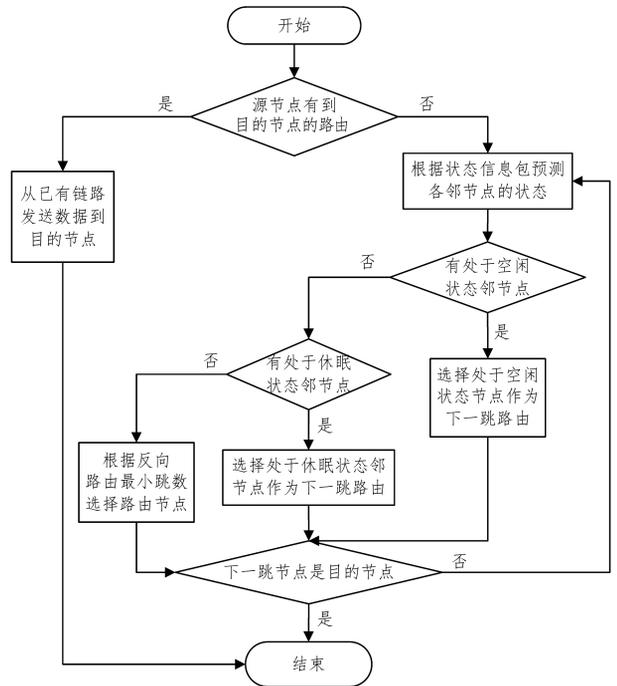


图 3 路由建立流程图

Fig. 3 Flow chart of route establishment

4.3 研究的优势和意义

MANET 被广泛应用, 但是由于在数据传输过程中节点可以自由移动, 很容易造成链路断裂, 从而导致数据传输失败, 此时需要重新进行路由发现和建立过程, 这给如何设计适应于 MANET 网络的路由协议带来了挑战。文献[4-15]从不同角度进行了有益的探索, 相比于其他研究的优势和意义在于:

(1) 路由发现和建立过程中考虑了节点自身的状态, 利用马尔可夫链对节点的状态进行预测, 研究建立在数学模型之上, 具有一定的科学性。

(2) 利用原有 AODV 协议中建立的反向路由由传输邻节点的状态信息给上一跳节点, 没有增加过多的额外开销, 而其他研究在提高分组投递率和延迟等性能的同时, 过多的开销降低了路由和抖动等性能。

(3)考虑了节点自身状态,有效避免了在数据传输过程中路由上某些节点处于忙状态,导致要发送的数据包等待时间过长被丢包而需要重新发送的情况,最大程度地实现了一旦出现数据传输需求,就立即启动路由发现和建立过程并完成数据的传输。

5 仿真实验

5.1 网络性能参数的选取

首先对实验过程中用到的一些性能参数进行定义。

分组投递率:应用层源端发送的分组数目与目的端接收的分组数目之比,描述的是通过应用层观察到的丢失率,也反映了网络所支持的最大吞吐量。它是路由协议完整性和正确性的衡量指标。

端到端延迟:使用公式 $\sum_{i=0}^N (rt_i - st_i)$ 进行计算,其中 N 表示成功传输的分组数, rt 表示分组到达目的节点的时间, st 表示分组被发送的时间。

吞吐量:在没有帧丢失的情况下,设备能够接收的最大速率,通常用比特/s表示。

路由开销:控制分组的总数与所有分组数据之比。对于经过多跳路由传输的分组而言,每一跳相当于一次分组传输。

抖动:延迟时间变化量,每个分组从源端到目的端的时间不一定相同,这个差异就是抖动。

5.2 仿真分析

将结合上述第4节路由发现和建立策略改进的 AODV 路由协议简记为 AODV-BC。为了评估其性能,选取原 AODV 协议与其进行仿真分析比较;同时为了对比其他学者对 AODV 的研究,选取了文献[3]中的 AODV-CRS 协议进行比较。AODV-CRS 是 2017 年由 Peng 等在 AODV 的基础上提出的路由协议。下面分别对 3 种协议在分组投递率、端到端的延迟、网络吞吐量、路由开销以及抖动方面的性能进行仿真实验。

仿真采用的是 NS2 软件,网络环境和相关参数设置如下:网络中有 100 个节点,它们随机分布在 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的矩形区域内,实验所需的网络拓扑由 NS2 自带的 setdest 工具生成,整个仿真时间为 500 s,定义节点的最大移动速率为 20 m/s,将邻节点处于忙状态时数据包等待的最长时间设为 0.5 ms,超时便丢弃。仿真采用 CBR 流量源,由 cbrgen 工具生成,每个数据包的大小为 512 Bytes。仿真实验中,每个节点通过统计自己过去的工作情况,本地计算并建立自己的状态转移概率矩阵和初始状态信息,节点的初始位置是随机的;为了减小仿真过程中产生的实验误差,对每一项仿真进行了 10 次,仿真结果取 10 次实验的平均值。仿真环境如表 1 所列。

表 1 仿真环境参数

Table 1 Simulation environment parameters

参数	取值
网络范围/m ²	100×100
节点个数	100
网络业务	CBR 业务流
报文大小/Bytes	512
Radio 模型	Two-Ray
节点停留时间/s	0,100,200,300,400,500
移动速率/(m/s)	1,20

对实验数据利用 gnuplot 软件生成数据图,如图 4—图 8 所示。

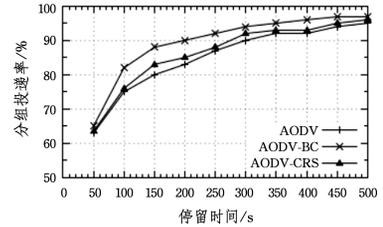


图 4 分组投递率的对比

Fig. 4 Comparison of group delivery rate

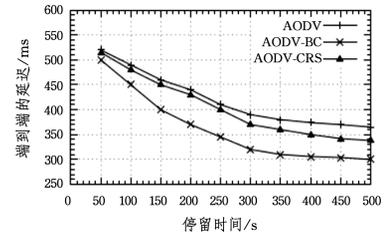


图 5 端到端延迟的对比

Fig. 5 Comparison of end-to-end delay

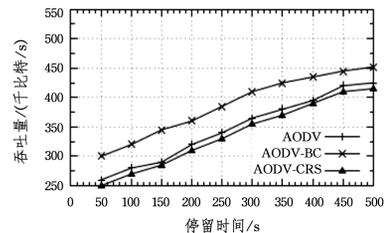


图 6 网络吞吐量的对比

Fig. 6 Comparison of network throughput

从图 4 可以看出,3 种情况下分组投递率随着节点停留时间的延长均提高。AODV-BC 在选择路由时避免了转发数据包等待时间过长而被丢弃的现象,在一定程度上改善了网络的分组投递率;AODV-CRS 对 AODV 进行了优化,已经预留业务需要的带宽,因此投递率高于 AODV。从图 5 可以看出,随着节点停留时间的延长,3 种情况下端到端的延迟均会降低。AODV-BC 路由在选择下一跳节点时优先选择处于空闲状态和休眠状态的节点,避免了数据包的等待时间,因此总体上端到端的延迟要低于 AODV 的延迟。从图 6 可以看出,基于节点状态的策略减少了转发数据包的等待和丢弃现象,因此采用 AODV-BC 协议的网络吞吐量要优于 AODV 的网络吞吐量。而 AODV-CRS 由于采取了相应措施使得网络负载均衡,因此在延迟和吞吐量性能对比上与 AODV 相比差别不明显(见图 5 和图 6)。

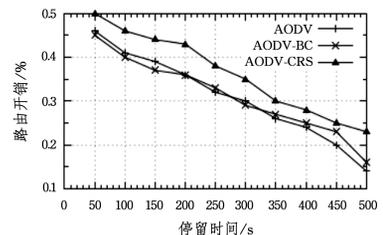


图 7 路由开销的对比

Fig. 7 Comparison of routing overhead

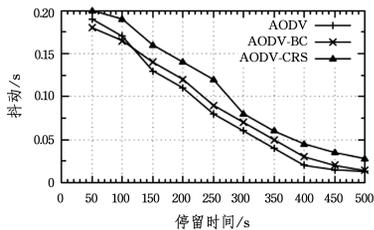


图 8 抖动的对比

Fig. 8 Comparison of jitter

此外,从图 7 和图 8 可以看出,3 种情况下的路由开销和抖动差别并不明显。AODV-BC 协议利用反向路由收集邻节点的状态信息,相比于原 AODV 协议,并不产生额外的开销,因此两者的路由开销和抖动情况区别不大。而 AODV-CRS 由于统筹考虑了网络层和 MAC 层,路由建立过程中除了原有 AODV 协议产生的开销以外,还有在 MAC 层预留带宽资源产生的额外开销,因此从图 7 可以看出其路由开销要比另外两种协议的路由开销大。此外,AODV-CRS 选择路由时还要求满足带宽要求,数据传输过程中出现断链的概率增大,因此从图 8 可以看出,其协议运行中的抖动要比另外两种大。

结束语 MANET 网络被广泛应用,针对需要满足实时传输,进一步降低端到端延迟和提高分组投递率的应用场景,提出一种改进的路由策略。基于马尔可夫链模型,对节点的状态信息进行预测,结合节点的状态信息,为路由选择提供依据,提出的路由发现和建立策略有着严格的数学模型,同时相比于其他方法,实现更简单,没有增加额外的开销。

由于转移矩阵对判定节点状态非常重要,因此今后将考虑如何进一步准确地计算转移矩阵,比如抽取一组尽可能长的连续时间片的数据或者抽取两组数据分别计算转移矩阵并进行对比。

参考文献

- [1] RAJESHWAR J, NARSIMHA G. Secure way routing protocol for mobile ad hoc network[J]. *Wireless Networks*, 2017, 23(2): 345-354.
- [2] KUMARI N, KUMAR R, BAJAJ R. Energy Efficient Communication Using Reconfigurable Directional Antenna in MANET [C] // 6th International Conference on Smart Computing and Computing and Communications, ICSCC 2017. Kurukshetra, India; Elsevier B V, 2018; 194-200.
- [3] HAO S, ZHANG H Y, SONG M K. A Stable and Energy-Efficient Routing Algorithm Based on Learning Automata Theory for MANET [J]. *Journal of Communications and Information Networks*, 2018, 3(2): 52-66.
- [4] SHELKE M P, MALHOTRA A, MAHALLE P. A packet priority intimation-based data transmission for congestion free traffic management in wireless sensor networks[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.03.007>.
- [5] AZZA M, HACENE S B. An Enhanced Reputation-based for Detecting Misbehaving Nodes in MANET [J]. *International Journal of Wireless and Microwave Technologies (IJWMT)*, 2017, 7(4): 28-37.
- [6] PENG J L, NIU H T, HUANG W J, et al. Cross Layer Design and Optimization for Multi-hop Ad Hoc Networks [C] // Proceedings of 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC 2017). Chongqing, China; IEEE Press, 2017; 1734-1738.
- [7] DING G S, LEI W M, HU Z X, et al. QoS routing mechanism for MANET to support real-time service [C] // 2016 2nd International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics (AMEII 2016). Hangzhou, China; Atlantis Press, 2016; 1122-1132.
- [8] CHAVAN A A, KURULE D S, DERE P U. Performance Analysis of AODV and DSDV Routing Protocol in MANET and Modifications in AODV against Black Hole Attack [J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 79: 835-844.
- [9] AZZUHRI S R, NOOR M B M, JAMALUDIN J, et al. Towards a Better Approach for Link Breaks Detection and Route Repairs Strategy in AODV Protocol [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, <https://doi.org/10.1155/2018/9029785>.
- [10] PARMAR B M, MARADIA K G. GPS-Aided AODV Routing Protocol for MANET [M] // *Optical and Wireless Technologies*. Singapore; Springer, 2018.
- [11] LEONOV A V, LITVINOV G A. Simulation-Based Packet Delivery Performance Evaluation with Different Parameters in Flying Ad-Hoc Network (FANET) using AODV and OLSR [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032178>.
- [12] SINGH M, KUMAR S. Link Failure Avoidance Mechanism (LFAM) and Route Availability Check Mechanism (RACM): For Secure and Efficient AODV Routing Protocol [J]. *International Journal of Wireless Networks and Broadband Technologies (IJWNBT)*, 2018, 7(1): 1-14.
- [13] DAMODAR N C, ELAPPILA M, PATRO A, et al. ENL-AODV: Energy and Load-Based Routing Protocol in Ad Hoc Networks [M] // *Optical and Wireless Technologies*. Singapore; Springer, 2018; 341-350.
- [14] CHO C, AHN S, PAEK J. Efficient Maintenance of AODV Routes in the Vehicular Communication Environment with Sparsely Placed Road Side Units [J]. *Mobile Information Systems*, <https://doi.org/10.1155/2018/6252907>.
- [15] HARTONO R, WIDYAWAN, WIBOW S B, et al. Wireless Sensor Network Quality of Service Improvement on Flooding Attack Condition [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 333(1): 1-6.
- [16] HA R W, HO P H, SHEN X. Optimal sleep scheduling with transmission range assignment in application-specific wireless sensor networks [J]. *International Journal of Sensor Network*, 2006, 1(1-2): 72-88.
- [17] BHANUMATHI V, DHANASEKARAN R. Path discovery and selection for energy efficient routing with transmit power control in MANET [J]. *Malaysian Journal of Computer Science*, 2013, 26(2): 124-139.