

文章编号:1001-9081(2010)03-0740-05

## AODV 和 AOMDV 路由协议性能分析与比较

王鲁光, 贾智平, 李 新

(山东大学 计算机科学与技术学院, 济南 250101)

(wangluguang87@mail.sdu.edu.cn)

**摘 要:**移动无线自组网(MANET)作为一种典型的自组织网络,其路由协议一直是研究的重点。介绍了无线自组网按需平面距离矢量路由(AODV)协议和无线自组网按需多路径距离矢量路由(AOMDV)协议的特点,在NS2模拟软件中使用多种测试场景和不同的介质访问控制(MAC)层协议对这两种路由协议的性能进行了测试和分析。实验结果表明,AOMDV协议在平均延时和路由发现频率上优于AODV协议,在分组投递率和归一化路由开销方面的性能低于AODV协议。

**关键词:**移动无线自组网;路由;无线自组网按需平面距离矢量路由协议;无线自组网按需多路径距离矢量路由协议;NS2

中图分类号:TP393 文献标志码:A

## Performance analysis and comparison of AODV and AOMDV routing protocols

WANG Lu-guang, JIA Zhi-ping, LI Xin

(School of Computer Science and Technology, Shandong University, Jinan Shandong 250101, China)

**Abstract:** Mobile Ad Hoc network is a self-organizing network in which routing protocols play an important role. The authors described the features of Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV) protocol and Ad Hoc On-Demand Multipath Distance Vector Routing (AOMDV) protocol and evaluated their performance through a variety of test scenes and different Media Access Control (MAC) protocols in NS2. The experimental results show that AOMDV protocol provides better performance than AODV protocol in terms of average delay and route discovery frequency, and worse performance in terms of packet delivery ratio and normalized routing load.

**Key words:** Mobile Ad Hoc Network (MANET); route; Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV); Ad Hoc On-Demand Multipath Distance Vector Routing (AOMDV); NS2

### 0 引言

移动无线自组网(Mobile Ad Hoc Network, MANET)是由一组带有无线收发装置的移动终端组成的多跳自组织、自管理网络。由于MANET不需要固定基站,生存能力极强,创建与移动方便,适合于军事通信、紧急服务和灾难恢复等特殊应用。在MANET中,所有节点既是通信节点,又充当路由节点;超出直接通信范围的两个节点需要依靠其他节点充当路由节点进行数据包转发。因此,路由协议是MANET中一个重要的研究问题。

MANET路由协议主要分为先验式(proactive)路由协议和反应式(reactive)路由协议。相关研究<sup>[1]</sup>表明,与先验式路由协议相比,反应式路由协议虽然数据报传送时延较大,但开销较小、分组投递率高,更适合移动自组网络。无线自组网按需平面距离矢量路由协议(Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing, AODV)<sup>[2]</sup>是一种比较有代表性的反应式路由协议。由于多径路由具有降低延时、增强网络可靠性的特点,对于反应式路由协议进行多径扩展已经成为MANET研究的热点和难点,其中无线自组网按需多路径距离矢量路由协议(Ad Hoc On-Demand Multipath Distance Vector Routing,

AOMDV)<sup>[3]</sup>就是一种比较成熟的多径路由协议。

如何评估并选择一个合适的路由协议是移动无线自组网应用的关键。现有评估方法主要通过仿真手段比较和评估路由协议的性能。例如,文献[4]对按需路由协议动态源路由协议(Dynamic Source Routing, DSR)和AODV协议以及先验式路由协议优化链路状态路由(Optimized State Routing, OLSR)进行了分析和评估;文献[5]对AODV和AOMDV协议进行了分析和比较,但它的仿真测试场景单一,而且仅在802.11b介质访问控制(Media Access Control, MAC)层协议下进行了仿真。

本文介绍了AODV和AOMDV路由协议,分析了各自的优缺点,在网络仿真器NS中使用多种测试场景和不同的MAC层协议对这两种协议的分组投递率、端到端平均延时、归一化路由开销以及路由发现频率进行了全面的比较。

### 1 AODV 和 AOMDV 路由协议

#### 1.1 AODV

AODV是基于距离矢量算法的路由协议,它综合了目的节点序列距离矢量(Destination-Sequenced Distance Vector, DSDV)<sup>[6]</sup>中的目标序列号和DSR<sup>[7]</sup>中的按需路由发现技术,

收稿日期:2009-09-17;修回日期:2009-11-02。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90718032;60903031);中国博士后科学基金资助项目(20090451310)。

作者简介:王鲁光(1987-),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向:嵌入式系统;贾智平(1964-),男,山东即墨人,教授,博士生导师,主要研究方向:嵌入式系统、分布式控制网络、实时系统;李新(1978-),男,山东济南人,讲师,博士,主要研究方向:实时系统、数据流处理、嵌入式系统。

只在必要时请求路由发现,而且不要求节点维护过期的路由。

AODV 协议包括路由发现和路由维护两个部分。当源节点需要与其他节点通信但没有到目的节点的路由时,它就会发起路由发现过程来寻找路由。它向邻居节点广播一个路由请求(Route Request, RREQ)报文,当其他节点收到这个 RREQ 时,首先判断是否收到过具有相同目标及序列号的 RREQ,如果是,则丢弃;如果不是,就利用 RREQ 中的信息建立反向路由。如果某中间节点含有到目的节点的路由,就向源节点发送路由应答(Route Reply, RREP)报文,否则广播转发 RREQ。当目的节点收到 RREQ 时,也会建立反向路由,然后向源节点发送 RREP。路由维护部分通过向邻居节点周期性广播 hello 消息来通知自身的状态。如果 A 节点连续 3 次未收到邻居节点 B 的 hello 消息,则认为与 B 无法通信,删除以 B 为下一跳的所有路由表项,并发送路由错误(Route Error, RERR)报文,通知相关的上游节点删除到目的节点的路由信息。

## 1.2 AOMDV

AOMDV 多径路由协议是对 AODV 协议的扩展,它与 AODV 有许多相同之处,都是以距离矢量概念为基础,并采用逐跳的方法,主要区别在于路由发现过程中发现的路径数。在 AOMDV 协议中,路由请求从源节点到目的节点的传播建立多条链路不相交路径(link-disjoin path),从中间节点通向目的节点也是如此。多个路由应答在源节点和中间节点通向目的节点反传,从而形成通向目的节点的多条路径。

相对于 AODV 协议的路由表,AOMDV 协议的路由表中每个表项都有一个路径列表,如图 2 所示,该列表包含一条或多条通向目的节点的路径。另外,增加一个广播跳数字段,取路径列表中跳数的最大值。同时,用于检测路径独立性的最后一跳也存在路径列表中。

目的IP地址
目的序列号
跳数
下一跳
过期时间

图1 AODV 路由表结构

目的IP地址	目的序列号	广播跳数	路径列表			
			下一跳1	跳数1	最后一跳1	过期时间1
			下一跳2	跳数2	最后一跳2	过期时间2
...	...	...	...	...	...	...

图2 AOMDV 路由表结构

AOMDV 路由发现阶段与 AODV 类似,但在 RREQ 报文和 RREP 报文中都添加了一个“第一跳”,分别用来表示前向路径的第一跳节点和反向路径的第一跳节点。每次路由更新都要对新的目的序列号和当前的目的序列号进行比较,如果新的目的序列号较大,则重置路由表中广播跳数为无穷,并把相应的地址作为到达目的节点的下跳地址;如果两个目的序列号相等,且新的广播跳数较小,则把该地址作为下跳地址。为了发现多条链路独立的路径,AOMDV 的中间节点在收到重复的 RREQ 报文时只建立反向路由,而不会广播转发重复的 RREQ 报文。AOMDV 的路由维护过程跟 AODV 非常相似,不同之处在于,当路由表中同一目的节点的所有路径都失效时,才重新进行路由发现。

## 2 NS2 中两种典型 802.11 MAC 协议

### 2.1 802.11b

802.11b 是由 IEEE 制定的一种无线局域网协议,最高带

宽可达 11 Mbps。802.11b 使用载波监听多路访问/冲突避免技术(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA)和请求发送/清除发送技术(Request To Send/Clear To Send, RTS/CTS),避免网络中冲突的发生,以提高网络的效率。节点在发送报文后等待确认帧(ACK),如果在一定时间内没有收到确认帧,则假定发生了冲突并重发数据。如果节点注意到信道上有活动,就不发数据。在 RTS/CTS 技术中,节点在发送数据前,先将一个请求发送帧发送到目的节点,如果信道上没有活动,那么目的节点将一个清除发送帧发回源节点。这个过程可以“预热”其他节点,从而防止不必要的冲突。在 NS 中,802.11b MAC 协议的实现被命名为 802\_11,通常情况下它要与网络接口类型 WirelessPhy 结合使用。

### 2.2 802.11Ext

从 NS2.33 开始,NS2 添加了几个新的 802.11 模块,其中一个就是由 Mercedes-Benz 研发部门和 Karlsruhe 大学联合开发的 802.11Ext 模块<sup>[8]</sup>。其主要特点包括:模块化的设计、累计 SINR 计算、MAC 帧捕获能力、支持多种调制机制、物理层跟踪和 Nakagami 衰减模型等。在 NS 中,802.11Ext MAC 协议的实现被命名为 802\_11Ext,它要与网络接口类型 WirelessPhyExt 结合使用。

在这个模型中,帧捕获能力是很重要的一个特性。它允许接收端区分 MAC 帧的帧头和数据部分,使用不同的标准来处理它们。MAC 帧头可以使用已定义的双向相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制方案传输,MAC 数据部分可以使用更高的调整方案进行编码。这种技术在提高通信的数据接收率方面作用明显。WirelessPhyExt 和 802.11Ext 可以支持多种调制机制,目前主要有 BPSK、四向相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)、16 样点正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation with 16 samples, QAM16)和 64 样点正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation with 64 samples, QAM64)四种方式,并可为每个帧设置不同的编码方式。一个使用了先进的调制方式的 MAC 帧在传输时会有更短的传输延时,但需要一个高的 SINR 对其进行接收和解码。

## 3 性能仿真与分析

### 3.1 性能评价指标

1) 端到端平均延时(Average Delay)。

数据报文从源节点的 IP 层到目的节点的 IP 层所需要的平均时间。它主要包括路由发现延时、数据包在接口队列中的等待延时、传输延时和 MAC 层的重传延时,反映了路由的实时性。

$$\text{Average Delay} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (Rt_i - St_i) \quad (1)$$

其中: $N$  为成功传输的数据报文的总数; $Rt_i$  为第  $i$  个报文接收的时间; $St_i$  为第  $i$  个报文发送的时间。

2) 分组投递率(Packet Delivery Ratio)。

数据报文在路由层成功传送的比率,即一定时间内正确接收的报文数量与发送报文总量的比值。它反映了路由的报文丢包率,也反映了网络传输的可靠性。

$$\text{Packet Delivery Ratio} = \frac{\sum_{i=0}^N Rn_i}{\sum_{i=0}^N Sn_i} \quad (2)$$

其中:  $Rn_i$  为节点  $i$  成功接收的报文数;  $Sn_i$  为节点  $i$  成功发送的报文数。

3) 归一化路由开销(Normalized Routing Load)。

每发送一个数据报文所需要的路由控制报文数。它反映了网络传输过程中的拥塞情况以及节点电源的效率,路由开销大的协议其网络拥塞的概率就大。

$$Normalized\ Routing\ Load = (SCn + FCn) / RDn \quad (3)$$

其中:  $SCn$  为发送的路由报文数;  $FCn$  为转发的路由报文数;  $RDn$  为接收到的数据报文的数目。

4) 路由发现频率(Route Discovery Frequency)。

每秒钟发起的路由发现的次数。它反映出了路由的有效性,同时也影响着路由开销的多少。

$$Route\ Discovery\ Frequency = \frac{\sum_{i=0}^N Dn_i}{Time} \quad (4)$$

其中:  $Dn_i$  为节点  $i$  的路由发现次数;  $Time$  为协议的仿真时间。

3.2 仿真工具和环境参数的选择

本文采用 NS2.34 网络仿真工具<sup>[9]</sup>对 AODV 和 AOMDV 协议在多种测试场景下的性能进行比较和分析。为了更全面地进行比较和分析,本文将在 802.11b 和 802.11Ext 两种不同的 MAC 协议下分别进行仿真实验。采用的仿真场景是在 1000 m × 1000 m 的空间中随机配置 50 个移动节点,仿真时间为 300 s,仿真选择固定码率(Constants Bit Rate, CBR)源产生 UDP 数据,每个节点的运动都符合 random waypoint 模型,即节点在仿真区域内随机选择某个目的地运动,在到达该目的地后做一段时间的停留(可以不停留),然后随机选择一个速度后向另一个目的地运动。其他的仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数列表

参数类型	参数值
无线信号传输模型	Propagation/TwoRayGround
网络接口类型	Phy/WirelessPhy, Phy/WirelessPhyExt
MAC 层协议类型	Mac/802_11, Mac/802_11Ext
接口队列类型(ifq)	Queue/DropTail/PriQueue
链路层类型(ll)	LL
天线模式(ant)	Antenna/OmniAntenna
接口队列最大分组数	50

在实验中,使用 setdest 工具设定节点运动场景和 cbngen 工具生成传输负载,使用 gawk 工具来分析生成的 trace 文件<sup>[10]</sup>。为了减小随机误差,本文所有的结果均是 30 次实验结果的平均值。

3.3 不同测试场景下各仿真结果的分析

为了对 AODV 协议和 AOMDV 协议的性能作一个全面的比较,本文将通过设置不同的节点移动速度、节点停留时间、节点间 CBR 连接数和节点发包速度来创建 4 组不同的测试场景,在 802.11b 和 802.11Ext 两种 MAC 层协议下分别对两种路由协议进行仿真和分析。4 组测试场景的具体参数见表 2。

表 2 各组测试参数列表

测试组号	CBR 连接数	发包速度 (packets/s)	移动速 度/(m · s <sup>-1</sup> )	停留 时间/s
1	10	4	0 ~ 30	10
2	10	4	20	0 ~ 300
3	5 ~ 30	4	20	10
4	10	1 ~ 6	20	10

1) 不同的节点移动速度。

由图 3(a)可以看出,随着节点运动速度增大,两种协议的平均延时在 802.11b 和 802.11Ext 两种 MAC 层协议下都随之增大。由于节点运动速度增大,源一目的节点间的路由失效次数增加,报文的延时就会相应增大。与 AODV 相比, AOMDV 多径协议由于具有备份路由,减少了路由发现次数,有效地降低了端到端的平均延时。相对于 802.11b 协议,在 802.11Ext MAC 层协议下,两种路由协议的平均延时更短,并且变化的趋势更加平稳,这是由于 802.11Ext 支持更高的调制方案,提高了仿真的精确程度。

如图 3(b)所示,在节点移动速度趋于零时, AOMDV 和 AODV 协议的分组投递率相近,但随着节点运动速度不断加快, AOMDV 协议的分组投递率下降明显, AODV 协议的分组投递率下降缓慢。这是由于 AOMDV 协议每次只使用一条路径作为主路径传输数据,同时所有路径都失效后才发起新的路由请求,且在使用主路径传输数据时没有对备份路径进行维护,一旦备份路径在启用前失效,将导致主路径在失效的路径间频繁切换,丢失更多的数据分组。

由图 3(c)可以看出,随着节点移动速度加快,两个路由协议的归一化路由开销都在增加。 AOMDV 协议相对于 AODV 协议,归一化路由开销增大。 AOMDV 虽然可以在一次路由发现过程中找到多条路径,减少了用于路由发现的路由报文数目,但是随着节点移动性增强, AOMDV 的备份路径启用前失效的概率大大增加,那么用于路由维护的路由分组(如 HELLO 消息)数目将大大增加,同时 AOMDV 在节点运动较快时分组投递率不高,综合以上原因致使 AOMDV 的归一化路由开销高于 AODV 的归一化路由开销。在不同的 MAC 层协议下,两个路由协议没有呈现出明显不同,但在 802.11Ext 下协议的仿真结果跳变较少。

图 3(d)表明,当节点运动速度加快时,由于路径失效的概率加大, AODV 和 AOMDV 协议的路由发现频率都在增加。 AOMDV 协议的路由发现频率相对较低,这是由于 AOMDV 在一次路由发现中可以找到多条路由,大大降低了路由发现的次数。在 802.11b 和 802.11Ext 下,两个路由协议的仿真结果的差别变化不大,但在 802.11Ext 下协议本身的变化趋势更加平稳,不合理数据点的出现更少。

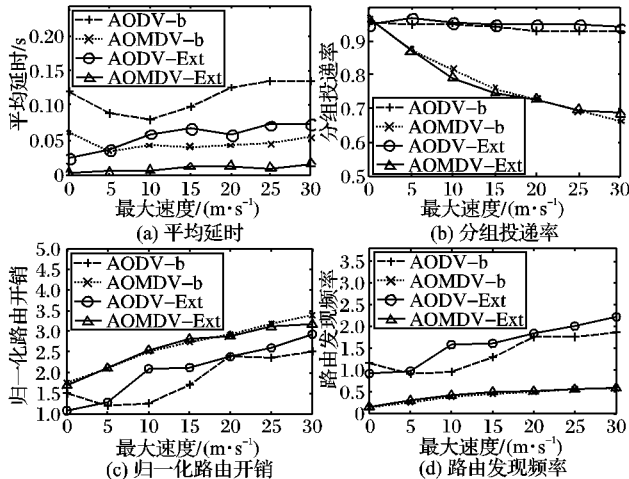


图 3 不同节点移动速度下的仿真结果

2) 不同的节点停留时间。

如图 4(a)所示,随着节点停留时间增加, AODV 和 AOMDV 协议的平均延时都在降低,但由于网络负载较轻,变

化幅度较小。AOMDV 多径协议由于可以在一次路由发现中获得多条路径,减少了路由发现次数,使其数据报文的平均延时低于 AODV 的平均延时。在 802.11Ext MAC 层协议下,两种路由协议的延时都比在 802.11b Mac 层协议下的平均延时低。

图 4(b)表明,节点停留时间越长,两种路由协议的分组投递率越高。由于 AOMDV 协议中的各备份路径得不到及时的维护和更新,导致当节点停留时间较短时,AOMDV 协议的分组投递率低于 AODV 协议的分组投递率。

由图 4(c)可以看出,AODV 和 AOMDV 协议的归一化路由开销都随着节点停留时间的增加而降低。这是由于随着节点停留时间加长,路由过时、失效的概率变小,用于路由发现和维持的路由报文数减少,成功传送的数据报文数增加。AOMDV 协议由于数据报文投递率低且用于路由维护的路由报文多,使得归一化路由开销要高于 AODV 的归一化路由开销。在 802.11Ext MAC 层协议下的仿真结果与 802.11b 下的结果相比,协议间的差别比较相似,但 802.11Ext 下的仿真曲线比较平滑,极值点出现较少。

图 4(d)表明,两种路由协议的路由发现频率都在下降,AOMDV 协议的路由发现频率明显低于 AODV 协议的路由发现频率。

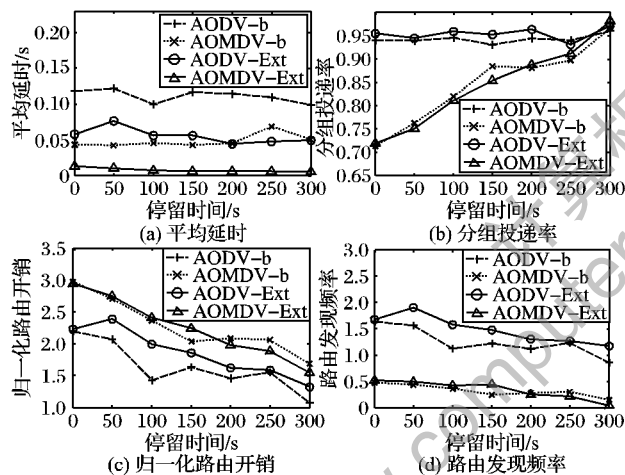


图4 不同节点停留时间下的仿真结果

### 3) 不同的节点间最大 CBR 连接数。

如图 5(a)所示,随着 CBR 连接数增加,两种路由协议的平均延时都在增大,这是由于更多的 CBR 连接数造成了更多的碰撞和拥塞。在 CBR 连接数较少时,AODV 和 AOMDV 协议的平均延时比较接近,随着网络负载越来越重,AOMDV 协议的平均延时明显低于 AODV 协议的平均延时。与 802.11b 下的仿真结果相比,在 802.11Ext MAC 层协议下的仿真结果使 AODV 和 AOMDV 协议之间的差别表现得更加明显。

由图 5(b)可以看出,当 CBR 连接数增加时,两种路由协议的分组投递率都在降低。当连接数较少时,由于节点运动速度较大(20m/s),AOMDV 协议的分组投递率仍然要低于 AODV 协议,随着连接数不断增大,更多的网络碰撞和拥塞致使两种协议的分组投递率下降明显,并逐渐趋近最终都达到一个很低的水平。在 802.11Ext MAC 层协议下,两个路由协议的分组投递率的下降趋势比较缓和。

图 5(c)表明,随着 CBR 连接数的增加,AODV 和 AOMDV 协议的归一化路由开销都在增加。这是由于 CBR 连接数增加,两种路由协议的分组投递率都在降低,而它们的路由发现

次数都在上升。在 CBR 连接数少时,AOMDV 协议的分组投递率比 AODV 的分组投递率低,这时 AOMDV 的归一化路由开销比 AODV 的大。随着 CBR 连接数的增大,AOMDV 的路由发现次数开始明显少于 AODV 协议,且它们的分组投递率开始趋近,这时 AOMDV 的归一化路由开销开始低于 AODV 的归一化路由开销。

由图 5(d)可以看出,在 CBR 连接数不断增加时,两种路由协议的路由发现频率都呈现出增加的趋势。由于 MANET 中存在隐藏节点问题,随着 CBR 连接数的增加,路由链路出错的概率增大,路由发现次数随之增加。在 802.11Ext MAC 层协议下,两种路由协议本身的变化趋势和之间的差别表现得更加明显。

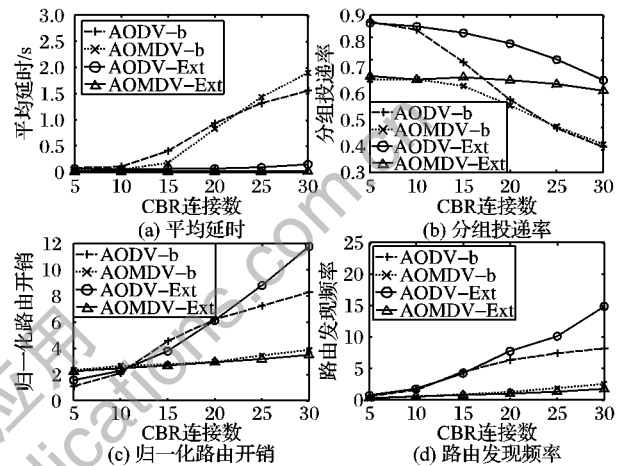


图5 不同 CBR 连接数下的仿真结果

### 4) 不同的节点发包速度。

由图 6(a)可以看出,在节点发包率较低时,两种路由协议的平均延时比较平稳,随着发包率的增加,平均延时都开始增加。这是因为在发包率低时网络负载较轻,发包率的增加对网络的影响不明显。随着网络负载的加重,发包率的增加造成了网络中数据报文碰撞和拥塞的概率增大,平均延时也随之增加。相比 802.11b MAC 层协议,在 802.11Ext MAC 层协议下两种路由协议的平均延时的变化趋势不明显。

图 6(b)表明,随着节点发包率的增加,两种路由协议的分组投递率都会随之下降。由于节点以 20 m/s 的最大速度运动,AOMDV 协议的备份路由维护更新不及时,AOMDV 协议的分组投递率还是低于 AODV 协议的分组投递率。

由图 6(c)可以看出,在节点发包率较低时,两种路由协议的归一化路由开销都比较高。这是因为节点以较大的速度运动,多数路径在再次被用到时已经失效,链路失败率高于发包率。随着发包率的增加,两种路由协议的归一化路由开销开始下降。当发包率继续加大时,由于网络负载过重,协议的归一化路由开销又开始增加。当发包率较低时,由于 AOMDV 协议的分组投递率低等原因,AOMDV 协议的归一化路由开销高于 AODV 协议。当发包率较高时,AODV 协议的路由发现次数开始大大多于 AOMDV 协议,且两者的分组投递率开始接近,AODV 协议的归一化路由开销开始高于 AOMDV 协议的。

如图 6(d)所示,当节点的发包率增加时,AODV 协议的路由发现频率增加明显,而 AOMDV 协议的路由发现变化不明显。在 802.11b 和 802.11Ext 两个不同的 MAC 层协议下,两个路由协议的仿真结果比较相似。

## 4 结语

本文使用网络仿真器 NS2.34, 在多种测试场景以及 802.11b 和 802.11Ext 两种不同的 MAC 层协议下, 对 AODV 协议和 AOMDV 协议进行了性能评估。实验结果表明, AOMDV 协议作为一种多径路由协议, 在平均延时和路由发现频率上要明显优于 AODV 协议; 当网络中节点的运动速度较大时, 由于 AOMDV 协议的备份路由更新不及时, AOMDV 协议的分组投递率要低于 AODV 协议的分组投递率, 并且进一步造成 AOMDV 协议的归一化路由开销也要高于 AODV 协议的归一化路由开销。

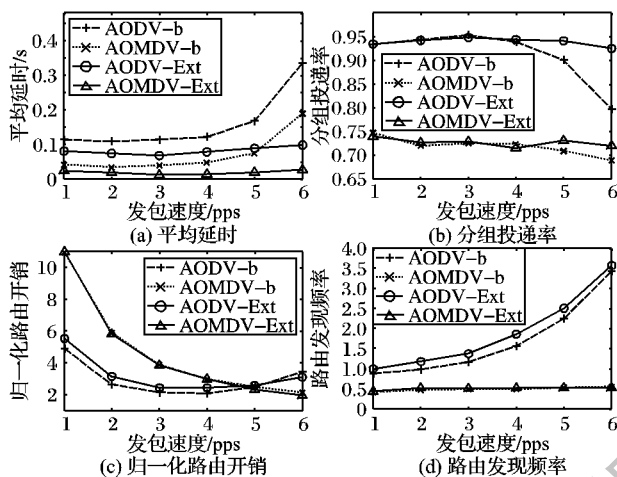


图6 不同节点发包速度下的仿真结果

基于以上的分析结果, AOMDV 协议要提高其多条路径的利用率, 可以使用以下两种改进的方式: 一是在利用主路径发送数据的同时对其他的备份路径进行维护, 保证在节点移动性比较强的情况下备份路径的可用性; 二是不只单纯地使用一条主路径来传输数据, 而是使用多条路径同时传输数据, 在有冗余的情况下保证传输的安全和可靠。

(上接第735页)

本文经过分析数据融合机制下节点的报文的传输关系, 提出了丢包条件概率最小定理。该定理揭示了节点对之间的关系对丢包条件概率大小的影响, 以某节点的父节点数据成功传输为条件时, 该节点丢包的条件概率最小。基于这个结论, 提出一种新的拓扑识别算法, 通过推断反向多播树中每个节点的父节点, 估计出整个网络拓扑。在不同的网络规模和链路状态下, 使用 NS-2 进行了大量仿真, 仿真结果表明该算法能够利用较少的观测数据精确地识别 WSN 拓扑。

### 参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAN Y, *et al.* Wireless sensor networks: A survey [J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393–422.
- [2] HARTL G, LI B. Loss inference in wireless sensor networks based on data aggregation [C]// *Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*. New York: ACM Press, 2004: 396–404.
- [3] MAO Y, KSCHISCHANG F R, LI B, *et al.* A factor graph approach to link loss monitoring in wireless sensor networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(4): 820–829.
- [4] LI Y, CAI W, TIAN G, *et al.* Loss tomography in wireless sensor network using gibbs sampling [C]// *Proceedings of the 4th European Conference on Wireless Sensor Networks*. Berlin: Springer,

### 参考文献:

- [1] 陈荣, 江虹, 杨欢. Ad Hoc 网络路由协议性能对比仿真研究[J]. *计算机工程与设计*, 2008, 29(18): 4672–4675.
- [2] PERKINS C E, ROYER E M. Ad Hoc on-demand distance vector routing [C]// *Proceedings of the 1999 IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1999: 90–100.
- [3] MARINA M K, DAS S R. On-demand multipath distance vector routing in Ad Hoc networks [C]// *Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Network Protocols*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2001: 14–23.
- [4] MBARUSHIMANA C, SHAHRABI A. Comparative study of reactive and proactive routing protocols performance in mobile Ad Hoc networks [C]// *Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. Niagara Falls, Canada: IEEE Computer Society, 2007: 679–684.
- [5] 屈文杰, 吴长奇. AODV 和 AOMDV 路由协议性能仿真与分析[J]. *计算机工程*, 2007, 33(17): 143–145.
- [6] 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.
- [7] JOHNSON D B, MALTZ D A. Dynamic source routing in Ad-Hoc wireless networks [C]// *Proceedings of the ACM SIGCOMM'96 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996: 153–181.
- [8] CHEN Q, SCHMIDT-EISENLOHR F, JIANG D, *et al.* Overhaul of IEEE 802.11 modeling and simulation in NS-2 [C]// *Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. New York: ACM Press, 2007: 159–168.
- [9] University of Southern California. The network simulator – Ns-2 [EB/OL]. [2009–08–15]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [10] 柯志亨, 程荣祥, 邓德隽. NS2 仿真实验——多媒体和无线网络通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [11] 于斌, 孙斌, 温暖, 等. NS2 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007: 46–133.
- [5] RAJAGOPALAN R, VARSHNEY P K. Data-aggregation techniques in sensor networks: A survey [J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2006, 8(4): 48–64.
- [6] DEB B, BHATNAGAR S, NATH B. STREAM: Sensor topology retrieval at multiple resolutions [J]. *Journal of Telecommunications Systems*, 2004, 26(2/4): 285–320.
- [7] KHEDR A M, OSAMY W. A topology discovery algorithm for sensor network using smart antennas [J]. *Computer Communications Journal*, 2006, 29(12): 2261–2268.
- [8] CASTRO R, COATES M, LIANG G, *et al.* Network tomography: Recent developments [J]. *Statistical Science*, 2004, 19(3): 499–517.
- [9] ZHAO T, CAI W D, LI Y J. MPIDA: A sensor network topology inference algorithm [C]// *2007 International Conference on Computational Intelligence and Security*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 451–455.
- [10] ZHAO T, CAI W D, LI Y J. Using end-to-end data to infer sensor network topology [C]// *2007 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 504–508.
- [11] 于斌, 孙斌, 温暖, 等. NS2 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007: 46–133.