

移动自组网模糊逻辑 QoS 动态源路由算法

张 勳 冯美玉* 程 胜* 丁 炜*

(北京邮电大学网络教育学院 北京 100088)

*(北京邮电大学宽带通信网络实验室 北京 100876)

摘 要: 该文提出了一种新的移动 Ad hoc 网络 QoS 路由算法: 模糊逻辑 QoS 动态源路由算法。算法从模糊理论的思想出发, 将业务的多个 QoS 参数进行综合评判产生一类以语言变量描述的请求, 在修改动态源路由协议为多径路由算法的基础之上, 对比各条路径综合模糊路由状态, 选择出最适合业务请求的路径。仿真显示算法在支持 QoS 的同时对移动 Ad hoc 网络因拓扑动态变化而引起的信息不精确性有很好的适应度。

关键词: 移动 Ad hoc 网络, 模糊逻辑, QoS 路由, 动态源路由

中图分类号: TN915.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)11-1806-07

Fuzzy Logic QoS Dynamic Source Routing for Mobile Ad Hoc Networks

Zhang Xu Feng Mei-yu* Cheng Sheng* Ding Wei*

(Distance Learning School, Beijing Univ. of Posts & Telecommunications, Beijing 100088, China)

*(Broadband Communications Network Lab, Beijing Univ. of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract A new QoS routing algorithm for mobile Ad hoc networks, Fuzzy Logic QoS Dynamic Source Routing (FLQDSR), is proposed in this paper. The idea of FLQDSR starts from the fuzzy theory. It integrates the multiple QoS parameters of traffic into one request that is represented by Language variable through integrated fuzzy judgment. Based on the multiple paths routing algorithm which is modified the Dynamic Source Routing (DSR), FLQDSR compares the integrated QoS fuzzy value of each path and selects the most appropriate one according to the fuzzy rules. Simulation results show that FLQDSR can tolerate the imprecise information which is caused by the dynamic network topology well while supporting QoS function.

Key words Mobile Ad hoc networks, Fuzzy logic, QoS routing, Dynamic source routing

1 引言

根据 IETF 在 RFC2501 中对移动 Ad hoc 网络 MANET (Mobile Ad hoc NETWORKS) 特点的定义, 它具有动态拓扑、带宽受限、链路容量变化、功率受限及有限的物理层安全等性质^[1]。由于在 MANET 中, 每个节点都将作为路由器承担分组数据转发功能, 路由协议和算法的作用较之在固定网络中就显得更为重要, 而多径路由技术则被认为是解决不可靠的无线链路和连续变化拓扑的有效方案^[2]。目前已有的方案包括: 从动态源路由 DSR 扩展而来的按需多径路由 (on-demand multipath routing)^[3], 在主路由失效时从备选路由中选择替代路由; 由 Ad hoc 按需距离向量协议 AODV 扩展

得到的 AODV-BR (AODV Backup Routing)^[4], 它的基本思想也是主备用路由; 另一种由 DSR 扩展的方案是多源路由 (multiple source routing)^[5], 它提出了一种权重 RR (Round-Robin) 启发式调度策略, 用于在多条路径中分配负载, 但它没有给出性能的分析模型。SMR (Split Multipath Routing)^[6] 集中在建立和维护最大不相交路径。APR (Alternate Path Routing)^[7] 的优势是负载平衡和端到端时延, 但是该策略对网络拓扑和信道特性提供的增益有严格的限制。Tsirigos 和 Haas^[2] 提出的方案是基于分集编码 (diversity coding), 通过在分组头部增加由源分组比特线性函数决定的开销, 然后将生成的结果分段并分配至多条有效路径上, 实现在给定路径

失效概率条件下，分段的最佳方法和路径分配方法，算法具有低时间复杂度的特点，可以适应 MANET 网络拓扑动态变化性质。上述多径路由方案中，支持 QoS 的算法是 APR，其它重点解决的仍是由网络拓扑动态变化而导致的路由不可靠问题。

自然界中的不确定性有两种：有明确定义但不一定出现的事件中包含的不确定性称为随机性；已经出现但难以给出精确定义的事件中包含的不确定性称为模糊性^[8]。可以看出，信息状态的不精确性正是属于后一种不确定性，即信息的模糊性。模糊信息的特征就是这种信息给人们提供了一种模糊依据，使得人们可以根据这些信息对其相应的必然型或统计型的规律进行模糊识别^[9]。模糊集可以看作是一个具有移动边界的普通清晰集合。模糊逻辑的最终目标是为不精确推理提供理论基础。用模糊系统来分析那些太复杂以致于不能得到其数学模型的动态系统是模糊理论的要点。随着人们对系统有更多的了解，数据变得相当充分，足以提出解析形式的模型时，就不再需要模糊模型了^[10]。

本文提出的MANET网络QoS路由算法是以动态源路由算法DSR^[11]为基础，通过对其消息格式及处理方式的改进，使其成为多径路由方案，同时考虑到MANET网络中信息的不精确性，我们引入了模糊逻辑来查找满足限制条件的路由，以此获得更快的效率和可实现性。模糊逻辑的另一显著优势是可以兼顾多个输入变量，在本算法就体现为可以同时考虑多个QoS参数来决定最匹配路由，这是目前已提出的MANET QoS路由算法很难达到的。具体而言，输入参数包括了路径时延Delay(P)，有效带宽Bandwidth(P)和路径代价Cost(P)，这三者之间是相互独立的，代价可以抽象地代表移动节点间的链路利用率，它与节点电源状况、CPU处理能力以及是否愿意作为路由器工作等因素有关。

2 模糊逻辑 QoS 动态源路由算法

路由算法通常包括路由发现及路由维护两大部分。我们将分别描述 FLQDSR 算法中的两部分处理过程。

2.1 路由发现

FLQDSR 的基础是动态源路由协议，因此，它也是按需驱动的路由算法。也就是当源节点有数据分组需要发送，但节点的路由缓存表中又无到目的节点的路由时，路由发现过程才启动的一种驱动方式。这是为降低无线网络中协议开销而产生的独特的方式，与固网路由协议有较大区别。FLQDSR 的路由发现过程可分为 3 个部分：链路状态信息收集；多径路由的建立；以及最匹配 QoS 路由的选择。

2.1.1 链路状态收集 链路的状态信息包括：延时、带宽及代价。通常的 QoS 路由算法只考虑搜索到满足约束条件的可

靠的路由，而将节点保持定期更新的链路状态作为前提条件^[12,13]。因此，FLQDSR的这部分也依赖于对MAC层协议如802.11 DCF^[14]的改进，或是采用具有该功能的MAC层协议。在我们的仿真中，我们采用了前一方案，以支持节点对本地状态信息的收集。具体而言，节点与其邻居节点间的延时通过周期性Hello消息获得；剩余的可用带宽则是由在传输层增加的资源预留功能计算得到，结果保存在各节点的链路状态表中，条目结构如图 1。

Neighbor Node ID	Link State	Next Entry Ptr
------------------	------------	----------------

图 1 本地链路状态表条目结构

对搜索到的路由的 QoS 状态，我们修改了动态源路由协议中的路由回复(RREP)消息格式，增加了有效带宽、路由延时和路由代价 3 个域，在 RREP 传播过程中将各段链路的状态信息一起反馈至源节点以供选择，同时对各节点的路由表条目也做了相应字段的增加。

设路径 $P = i \rightarrow j \rightarrow \dots \rightarrow m \rightarrow n$ ，则

该路径延时: $Delay(P) = delay(i,j) + \dots + delay(m,n)$

有效带宽: $Bandwidth(P) = \min \{ bandwidth(i,j), \dots, bandwidth(m,n) \}$

路径代价: $Cost(P) = cost(i,j) + \dots + cost(m,n)$

2.1.2 建立多径路由 DSR 中的路由建立是通过源节点广播路由请求(RREQ)消息，具有到达目的节点路由的中间节点或者目的节点本身相应发出路由回复(RREP)消息。RREP 消息中包含了源节点到目的节点的路径，这样，当源节点收到 RREP 消息后，通过对 RREP 消息的处理获得路由信息并转发数据分组。由此可以看出，DSR 具有并行搜索多条路径的能力，但该协议在转发数据时仍然采用了单路由，即一旦获得某条路由就即刻转发数据分组，多条路径主要用于路由维护。因此，我们对 DSR 处理 RREP 的过程加以改进，使其多路径在路由发现阶段就发挥出优势作用。重点是修改了 RREP 消息的处理以及数据转发流程，RREP 消息处理流程参见图 2 中的伪代码，数据转发流程在后面说明。

```

procedure RoutingFLQDSrHandleReply(NodeInfo,RREPMessage.destAddr
begin
1  if(rrep->targetAddr==node->nodeAddr)and(destAddr==node->nodeAddr)then
2  if(!CheckRouteExist)and(!CheckDataSeen)and(rrep->srcAddr!=broadcast)then
3  insert RREP Message into RouteCache;
4  delete the RREQ in RequestTable;
5  remove packets expired waiting for route;
6  adding routes to intermediate nodes;
7  else
8  if(!CompareSameRoute)and(!CheckDataSeen)then
9  insert RREP Message into RouteCache;
10 adding routes to intermediate nodes;
11 endif
12 endif
13 send buffered data packets that waited for a route;
14 else //the node is the intended intermediate node
15 if (destAddr==node->nodeAddr) then
16 insert the routes into cache;
17 relay RREP(node,msg);
18 else
19 free RREP message;
20 endif
21 endif
end
    
```

图 2 FLQDSR 中 RREP 消息的处理伪代码

2.1.3 模糊QoS路由选择这是 FLQDSR的核心模块。作用是在多条路径中选择出最符合业务需求的QoS路由。网络拓扑的动态变化决定了网络状态和控制行为都由不精确的环境所决定，提出模糊理论^[5]就是为了解决不精确性问题。模糊控制器的结构如图3所示。它包括3个子控制器和最终的路由选择模块：(a)业务QoS需求模糊处理，(b)被选择的路由的QoS参数模糊处理，(c)对以上两个子模块输出的模糊匹配，(d)最后是路由选择模块。这里我们采用的模糊隶属函数是两类连续函数，如式(1)和式(2)所示。

$$\text{tri}(x; a, m, b) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & x \in (a, m], a \neq m \\ 0, & a = m \\ \frac{b-x}{b-m}, & x \in [m, b), b \neq m \\ 0, & b = m \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{trap}(x; a, m, n, b) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & x \in (a, m) \\ 1, & x \in [m, n] \\ \frac{b-x}{b-n}, & x \in (n, b), b \neq n \\ 1, & b = n \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (2)$$

其中 m, n 是隶属度为 1 时 x 的边界值， a, b 对应于上下边界。

(1) 业务 QoS 需求模糊处理控制器 业务请求带宽以及端到端延时作为输入变量，输出则是根据综合模糊评判确定的综合模糊请求。控制器设计的关键有两点：一是输入变量的模糊化和隶属函数的确定，二是模糊规则的确定。考虑到移动自组网不同于当前无线局域网的性质，我们以 2Mb 作为最大带宽，也就是带宽论域为 $[0, 2\text{Mb/s}]$ 。根据经验，对带宽的需求分为“低、较低、中等、较高、高”5类，对应于表

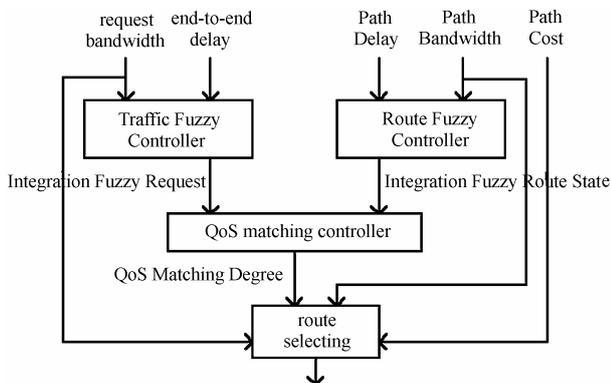


图3 模糊控制器结构

1中的模糊集 $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_3, \tilde{R}_4, \tilde{R}_5$ ，且隶属函数的曲线如图4。延时的分类依据是实时业务对该度量的要求，通常语音要求平均延时在 5ms 之内，图像为 25ms，数据业务为延时不敏感业务，平均延时是 1000ms。这样，我们将端到端延时分为“小、一般、大”3类，对应的模糊集 \tilde{S}, \tilde{M} 和 \tilde{L} ，隶属函数见表2，曲线如图5。表3中列举了输入对应输出的模糊规则，这是基于综合模糊判决而得，在实现中以“IF-THEN”形式表示。本文没有以专家经验作为模糊规则的确定依据，是因为在MANET领域模糊控制的应用研究不多，不能保证经验规则的合理性，因此我们采用了综合模糊判决方法。

定义 1 在综合模糊QoS请求评价问题中，设因素集 $F = \{\text{请求带宽}(\text{RB}), \text{端到端延时}(D)\}$ ，评价集 $C = \{\text{higher}(c_1), \text{high}(c_2), \text{medium}(c_3), \text{low}(c_4), \text{lower}(c_5)\}$ ，对 F 中的每一因素进行评判。设 $f_i (i=1,2)$ 的评判为 \tilde{C}_i ，由此可构成模糊评判矩阵 $\tilde{R} = (\tilde{C}_1, \tilde{C}_2)^T$ ，考虑各因素在评价中的权重不同，用模糊集 $\tilde{A} = (\tilde{A}_1, \tilde{A}_2)$ 表示。采用加权平均型三角模算子^[10]，评价结果为 $\tilde{B} = \tilde{A} \times \tilde{R}$ ，即 $b_j = \sum_{i=1}^n (a_i \cdot r_{ij}), (j=1, \dots, m)$ 。

请求带宽和端到端延时按最大隶属原则将精确值转换为相应的模糊集，假设模糊化后请求带宽为 \tilde{R}_1 ，延时为 \tilde{S} ，即 $F = \{\tilde{R}_1, \tilde{S}\}$ 时，经评判得到 $\tilde{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0.9 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ ，取 $\tilde{A} = (0.4, 0.6)$ ，则 $\tilde{B} = (0.54, 0.06, 0, 0.08, 0.32)$ ，即 $\{\tilde{R}_1, \tilde{S}\}$ 的综合模糊请求被评判为 higher。同理，可得表4结果。

经过评判后的输出呈现出当延时属于 \tilde{S} 时结果都为 higher 而属于 \tilde{M} 时结果为 medium 的性质，原因在于延时相对于带宽具有更高的权重。当延时因素要求不高时，结果就随请求带宽的增加而越来越高。

表1 “请求带宽”模糊集

模糊集	函数类型	函数参数 $[a, m, b]$ 或 $[a, m, n, b]$
\tilde{R}_1	Tri	$[0, 0, 300]$
\tilde{R}_2	Trap	$[200, 400, 600, 800]$
\tilde{R}_3	Trap	$[600, 800, 1000, 1200]$
\tilde{R}_4	Trap	$[1000, 1200, 1400, 1600]$
\tilde{R}_5	Trap	$[1400, 1600, 1800, 2000]$

表2 “端到端延时”模糊集

模糊集	函数类型	函数参数 $[a, m, b]$ 或 $[a, m, n, b]$
\tilde{S}	Tri	$[0, 0, 10]$
\tilde{M}	Trap	$[0, 12, 25, 50]$
\tilde{L}	Trap	$[25, 50, 100, 100]$

表 3 “综合模糊 QoS 需求”模糊规则(RB: 请求带宽 Delay: 端到端延时)

RB \ Delay	\tilde{R}_1	\tilde{R}_2	\tilde{R}_3	\tilde{R}_4	\tilde{R}_5
\tilde{S}	Higher	Higher	Higher	Higher	Higher
\tilde{M}	Medium	Medium	Medium	Medium	Medium
\tilde{L}	Lower	Low	Medium	High	Higher

表 4 不同网络规模下同时生成的会话数量

节点个数	10	20	30	40	50	60	70
会话数量	4	10	15	15	15	15	15

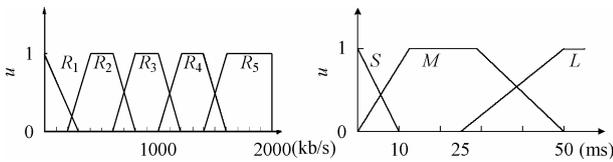


图 4 “请求带宽”隶属函数曲线

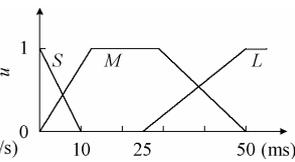


图 5 “端到端延时”隶属函数曲线

(2)路由状态模糊控制器该控制器 负责完成路由状态的综合模糊处理。设计过程与(a)相同。不同之处是两输入变量分别为“路径带宽”和“路径延时”，输出为“综合模糊路由状态”。路径带宽的模糊集用{ $\tilde{B}_1, \tilde{B}_2, \tilde{B}_3, \tilde{B}_4, \tilde{B}_5$ }表示。

(3) QoS 匹配控制器 这部分的控制规则根据每条路径“综合模糊路由状态”与请求间的匹配度 MD 确定：

$$MD = \begin{cases} 1, & \text{综合模糊路由状态} = \text{综合模糊QoS请求} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

MD 为 1 时，控制规则为该路由是备选路由，否则，路由无效。

(4) 路由选择模块最终的路由选择算法是：

(a) 在所有备选路由中，如果“路由带宽” \geq “请求带宽”，则进入(b)；否则，转入(d)，即无有效路由拒绝此次路由请求。

(b) 如果有两条或两条以上路径满足(a)中不等式，则根据收集到的各自路径代价，选择具有最小代价的一条，进入(c)；如果路径代价相同，则选择一条满足要求的有效路由，并进入(c)。

(c) 启动资源预留程序，在该路径的各个链路上预留业务所需的精确带宽，然后再开始发送数据分组。当业务发送完成后，预留资源将被释放。

(d) 无满足条件路由，拒绝此次路由请求。

2.2 路由维护

当节点移动或退出导致某段路径断开，通过路由错误 RERR 消息，源节点可以获得故障处信息，并对路由表做相

应修改，该过程仍沿用 DSR 路由维护机制。路由发现过程产生的多条路径在源节点有其它发送至相同目的节点的业务分组时，不再需要启动发现处理过程，但与 DSR 不同的是，FLQDSR 对有 QoS 要求的业务，需要获得相应路由的 QoS 度量值。因此，在路由维护过程中，当存在<源节点，目的节点>路由时，源节点将根据路由数目发送相应个数的携带不同路由信息的状态请求消息，结构和 RREQ 相同，目的节点收到后回复 RREP 消息，当 RREP 到达源节点后，操作则与 2.1 节中的模糊 QoS 路由选择过程相同。

3 性能分析

对路由协议的性能通常从有效性、复杂性及可实现性几个方面来衡量。

3.1 有效性

性质 1 设网络 $G=(V, E)$ ， V 是网络节点集， E 是网络边集。源节点 $s \in V$ ，目的节点 $d \in V, d \neq s$ ，业务请求为“bandwidth”和“delay”。如果存在满足 $\sum_{(x,y) \in p(s,d)} D(x,y) \leq \text{delay}$ 和 $\min\{B(x,y) | (x,y) \in p(s,d)\} \geq \text{bandwidth}$ 的路径，则 FLQDSR 一定能找到。

证明 因为 FLQDSR 的路径查找是通过广播路由请求消息，并对收到的所有路由回复消息进行处理，这就意味着从源节点到目的节点可能连通的路径都将被发现，也就是路径的最大集合。因此，如果存在满足约束的路径，它一定包含在该集合中。 证毕

3.2 复杂性

性质 2 FLQDSR 算法的时间复杂度是 $O(k + |V|)$ ， $|V|$ 表示网络中节点个数， k 是满足约束路径的最大节点个数。

证明 正常情况下，每个决策节点从 K 条路径中选择出最适合的一条，因此，其时间复杂度为 $O(k)$ 。但是转发节点只进行消息处理，那么转发节点的时间复杂度为 $O(1)$ 。如果用 L 表示被选择路径的长度，则只有源节点是决策节点，那么 FLQDSR 的时间复杂度为 $O(k + L - 1)$ ，由于任意路径的最大长度只能是 $(|V| - 1)$ ，因此，算法在正常情况下的复杂度最大为 $O(k + |V|)$ 。 证毕

性质3 FLQDSR 算法消息复杂度为 $O(|V|^2)$ 。

证明 由于 FLQDSR 的消息机制与 DSR 是一致的, 路由发现过程仍然采用了广播方式, 因此算法的消息复杂度只与网络中节点个数相关, 为 $O(|V|^2)$ 。 证毕

3.3 可实现性

如前所述在MANET网络中已经提出了众多的路由协议方案, 但被IETF采纳或正在讨论通过的协议^[18]只有AODV^[19]、OLSR^[20]、DSR等。DSR在小规模网络中有很好的性能表现, 考虑到MANET网络的应用场景, 节点个数在100以下的小型网络比较普遍, 同时, 由于地形、干扰等因素导致节点间无线链路的单向性, 使得DSR的应用可能性更加普遍。FLQDSR以DSR为基础, 可以为上述环境中的MANET网络同时提供QoS。另一方面, 模糊控制有几个明显优势, 它不需要对象的数学模型, 对参数变化有极强的适应性, 可采用硬件实现以适应高速处理的需求, 这些优点使得FLQDSR有很好的可实现性。

4 仿真结果

FLQDSR 的仿真平台采用了UCLA大学开发的GLOMOSIM^[21]。这是一个以PARSEC^[22]为核心的无线网络集成仿真环境。网络拓扑随机生成, 节点在 $1000 \times 1000 \text{m}^2$ 平方米范围内随机分布。节点的传输半径为 190m。信道容量为 2Mb/s。MAC层协议采用改进的IEEE802.11 DCF。节点利用业务生成器模拟具有带宽请求和端到端延时限制的CBR业务, 来仿真实时业务。业务的延时边界分别取[5, 25, 100]ms, 带宽请求[0, 2Mb/s]内均匀分布。我们以GLOMOSIM提供的DSR为基础, 实现了FLQDSR。为了检测算法性能, 我们设计了静态和动态两种场景, 利用成功率和平均消息开销作为性能度量参数。这两个度量定义如下:

成功率=被接受的连接数目/总的连接请求数量

平均消息开销=控制消息的总数/总连接请求数量

每个场景的仿真时间都是 15min, 由于 GLOMOSIM 以 PARSEC 为核心, 其仿真速度与 NS2 相比快速很多, 在设定的 15min 内都能结束仿真, 生成结果文件, 因此该仿真时间的设置是合理的。为了更直观地比较 FLQDSR 性能, 我们选取的<源节点, 目的节点>对都为彼此间可通信且不重复的, 仿真曲线中每个点值的统计与网络中节点间同时生成的会话数目相关, 具体参见表 4, 仿真次数是 100。在动态测试中, 节点的移动模型采用 random waypoint 运动模型, 其参数包括停顿时间、节点移动的最小速度和最大速度, 仿真过

程中停顿时间设为 1s, 最小速度和最大速度相同, 分别取 [1,5,10,15,20]km/s。

4.1 静态测试

图 6 反映的结果是DSR与 3 种不同延时请求业务的 FLQDSR在网络节点个数分别为[10, 20, 30, 40, 50, 60, 70]时的成功率。FLQDSR-5 表示的是延时请求限制在 5ms 内的应用。为了更加直观地比较FLQDSR性能, 我们选取的<源节点, 目的节点>对都为彼此间可通信, 因此, 在业务不要求QoS的情况下, DSR选路的成功率为 100%。在相同场景中, 我们对FLQDSR-5, FLQDSR-25 和FLQDSR-100 进行了分别测试, 带宽需求随机生成。从图 6 中可以看出, 随着延时限制的放宽, 成功率逐渐增加, 这与实际情况是相符合的。在节点个数不断增加, 即网络规模的不断扩大, FLQDSR-5 的成功率比较低, 这是由于业务QoS要求比较高, 当延时边界限定在很小范围内时, 如果带宽请求也较大, 则满足约束的路由就无法找到。比较特殊的情况是在节点个数等于 10, 20 时, 为了保证节点间至少存在一条路由, 我们将网络范围分别缩减到 $500 \times 500 \text{m}^2$ 和 $1000 \times 1000 \text{m}^2$, 另外节点个数少, 相应选取的节点对也小于在其它规模中的测试, 因此, 这两点的FLQDSR-5 成功率高于了该曲线上其它几个点。但当限制条件放宽后, 可以看出FLQDSR在不同网络规模都有较高的成功率, 说明其适应性较强。

图 7 显示的是 FLQDSR 与 DSR 在节点个数不同的条件下, 每连接的平均消息开销个数。在这里我们主要比较的是成功建立<源节点, 目的节点>满足条件的路径所需的控制分组数量, 因此, 图中仅用 FLQDSR 表示, 在测试中, 我们对各种限制请求都做了仿真, 结果显示 FLQDSR 与 DSR 的平均开销非常接近, 这是因为, 我们并没有增加新的消息类型, 由于 QoS 路由都需要本地状态的收集, 因此, 我们并没有把改进的 MAC 层协议中的 HELLO 消息计算在路由协议当中。当然, 随着网络规模的增加, 开销是在增加的, 原因是路由请求消息采用了广播方式, 但可以看出, 其绝对值并不是很大。

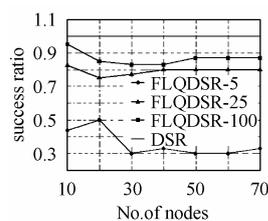


图6 静态成功率

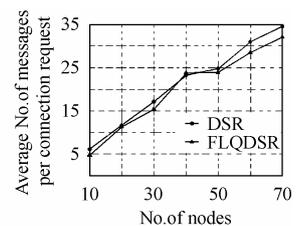


图7 消息开销

4.2 动态测试

动态环境中, 我们检测的度量是成功率。FLQDSR 的设计目的之一就是在提供 QoS 的同时能适应 MANET 网络的拓扑动态变化。图 8 显示的是网络节点个数为 50 时, FLQDSR 成功率随移动速度变化的结果。对比静态场景, 成功率变化不大, 说明 FLQDSR 在动态环境中有很好的适应性。当节点移动速度增加时, 图中反映出的成功率并没有规律性, 原因在于仿真中节点移动模型采用的是 random-waypoint, 各个节点的移动方向是随机的, 方向和速度共同决定了 QoS 路由的稳定性。如果节点移动速度加快, 而移动方向使得组成 QoS 路由的各段路径并不会断开, 那么速度将不会影响到成功率, 并且由于在设计模糊规则时就考虑了移动导致的状态信息的不精确性, 在匹配路由阶段选择到的最佳路由通常具有较之需求更高的质量, 因此, 当拓扑变化时, FLQDSR 仍有较高的成功率。

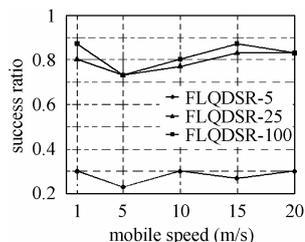


图 8 动态成功率

5 结束语

本文提出了一种在 MANET 网络中支持 QoS 的源路由算法: 模糊逻辑 QoS 动态源路由 FLQDSR 算法。该方案的优点是在 DSR 的基础上, 引入模糊逻辑来解决因网络拓扑随机变化而引起的信息不精确性问题, 为业务选择最匹配 QoS 路由。仿真显示算法在动态环境中与静态环境有相近的性能。但是, 由于算法是 DSR 协议改进而来, 它只能应用于中小规模网络, 即源节点到目的节点的跳数应小于 10 跳。

参 考 文 献

[1] Corson S, Macker J. Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations. Internet RFC 2501, Jan. 1999.

[2] Tsirigos A, Haas Z J. Multipath routing in mobile Ad hoc networks or how to route in the presence of frequent topology changes. <http://people.ece.cornell.edu/haas/wnl/Publications/milcom01.ps>.

[3] Nasipuri A, Das S R. On-demand multipath routing for mobile Ad hoc networks. In Proc. IEEE ICCCN, Boston: Oct.1999: 64 – 70.

[4] Lee S J, Gerla M. AODV-BR: Backup routing in ad hoc networks. In Proc. IEEE WCNC, Chicago, 2000: 1311 – 1316.

[5] Wang L, Zhang L, Shu Y, Dong M. Multipath source routing in wireless ad hoc networks. In Proc. Canadian Conf. Electrical and Computer Engineering, Halifax, Nova Scotia, Canada: 2000, vol.1: 479 – 483.

[6] Lee S J, Gerla M. Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks. In Proc. ICC 2001, Helsinki, June 2001, vol.10: 3201 – 3205.

[7] Pearlman M R, Haas Z J, Sholander P, Tabrizi S S. On the impact of alternate path routing for load balancing in mobile Ad hoc networks. In Proc. MobiHOC, Boston, 2000: 150 – 310.

[8] 扎德 LA 著, 陈国权译. 模糊集合、语言变量及模糊逻辑. 北京: 科学出版社, 1982, 译者序.

[9] 黄崇福, 王家鼎编著. 模糊信息分析与应用. 北京: 北京师范大学出版社, 1992: 41.

[10] Timothy J Ross 著, 钱同惠, 沈其聪, 葛晓滨等译. 模糊逻辑及其工程应用. 北京: 电子工业出版社, 2001: 163 – 242.

[11] Johnson D, Maltz D. Dynamic source routing in Ad hoc wireless networks[A], Mobile Computing, E, Imielinski and H. Korth, Eds. Norwell, MA: Kluwer, 1996: 153 – 181.

[12] Chen Shigang, Nahrstedt K. Distributed quality-of-service routing in ad hoc networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(8): 1488 – 1505.

[13] Guérin R A, Orda A. QoS routing in networks with inaccurate information: theory and algorithms. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1999, 7(3): 350 – 364.

[14] IEEE 802.11 WG, part 11: Wireless LAN Medium Access Protocol (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, IEEE Std 802.11-1997 [S]. 1997.

[15] Zadeh L A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, 8(3): 338 – 353.

[16] Pedrycz W, Gomide F. An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design. MA: MIT Press, 1998: 8 – 10.

[17] 刘普寅, 吴孟达编著, 模糊理论及其应用, 长沙. 国防科技大学出版社, 1998: 199.

- [18] Internet Engineering Task Force (IETF) Mobile Ad Hoc Networks (MANET) Working Group Charter. <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>.
- [19] Perkins C E, Royer E M. Ad-hoc on demand distance vector routing. In Proceedings of IEEE WMCSA'99, New Orleans, LA: Feb. 1999: 90 – 100.
- [20] Clausen T, Jacquet P. Optimized link state routing protocol. Internet Draft, draft-ietf-manet-olsr-11, Jul. 2003.
- [21] UCLA Parallel Computing Laboratory and Wireless Adaptive Mobility Laboratory, GloMoSim: Scalable Mobile Network Simulator, <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim>.
- [22] Bagrodia R, Meyer R, Takai M, Chen Y, Zent X, Martin J, Song H Y. PARSEC: A Parallel Simulation Environment for Complex Systems [J]. *IEEE Computer*, 1998, 31(10): 77 – 85.
- 张 勳: 女, 1973 年生, 博士, 讲师, 研究方向为宽带通信技术、NGN 关键技术、QoS 路由.
- 冯美玉: 男, 1974 年生, 博士生, 研究方向为移动 Ad hoc 网络关键技术.
- 程 胜: 男, 1976 年生, 博士, 讲师, 研究方向为宽带无线接入.
- 丁 炜: 男, 1935 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带通信网络.