

# MANETs 面向稳定性的自适应路由开销控制算法

胡曦<sup>1</sup> 王鑫<sup>2,3</sup> 张斌<sup>1</sup>

(东北大学秦皇岛分校计算中心 秦皇岛 066004)<sup>1</sup> (东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110618)<sup>2</sup>  
(沈阳建筑大学信息与控制工程学院 沈阳 110618)<sup>3</sup>

**摘要** 为了在节点频繁移动的 MANETs 网络环境中发现和建立具有较长维持时间的路由,以增强路由的可用性和数据传输的连续性,面向稳定性的路由算法需要中间节点转发更多的 RREQ 分组,但这会造成路由开销显著增加。为此,提出了一种面向稳定性的自适应路由开销控制算法。算法使用策略型博弈对 RREQ 转发过程进行建模,利用该博弈存在的混合策略纳什均衡计算 RREQ 的转发概率,实现 RREQ 的概率转发。仿真结果表明,提出的面向稳定性的自适应路由开销控制算法不仅保证了路由的稳定性和分组递交率,而且有效地减少了路由开销和传输延迟。

**关键词** MANETs,面向稳定性的路由算法,自适应路由开销控制,策略型博弈,混合策略纳什均衡

**中图分类号** TN915.04 **文献标识码** A

## Stability-oriented Adaptive Routing Overhead Control Algorithm in MANETs

HU Xi<sup>1</sup> WANG Xin<sup>2,3</sup> ZHANG Bin<sup>1</sup>

(Computing Centre, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)<sup>1</sup>  
(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110618, China)<sup>2</sup>  
(Information & Control Engineering Faculty, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110618, China)<sup>3</sup>

**Abstract** To discover and establish a route with a longer lifetime, which can enhance the availability of route and the consistency of data transmission, the in-between nodes executing some stability-oriented routing algorithm need to forward more route request (RREQ) packets, which in turn makes the routing overhead to increase obviously. Therefore, a stability-oriented adaptive routing overhead control algorithm was proposed. It introduces the strategy game to model the forward of RREQ, and then calculate the forwarding probability of RREQ with the mix strategy Nash equilibrium existing in the game, which realizes the probabilistic forward of RREQ. The simulation results show that the proposed stability-oriented route discovery algorithm not only maintains the stability and the packet delivery ratio of route, but also reduces routing overhead and transmission delay effectively.

**Keywords** MANETs, Stability-oriented routing algorithm, Adaptive routing overhead control, Strategy game, Mix strategy Nash equilibrium

## 1 引言

移动 Ad-hoc 网络(Mobile Ad-hoc Network, MANET)中的各个节点能够以任意可能的速度和移动模式移动,节点间通过无线信道形成的网络拓扑随时可能发生变化。因此,MANET 面向稳定性的路由算法<sup>[1-6]</sup>旨在选择一条维持时间较长的路径进行路由,避免频繁的重路由,降低拓扑变化对网络性能的影响。

面向稳定性的路由算法通常采用洪泛广播的方式转发路由请求(Route Request, RREQ)分组以实现路由发现。在文献[7]中,作者通过理论分析和仿真实验揭示了这种洪泛广播会造成不必要的重复广播,增加节点间的竞争和分组间的冲突。同时为了能够发现维持时间更长的路由,面向稳定性的路由算法会转发更多的冗余 RREQ,造成路由开销的显著增

加,因此需要更加有效的机制来减少这些不利影响。

为此,研究者们又提出了一些其他类型的广播机制。这些广播机制大体上可以分为两种:确定性广播和概率广播。

在确定性广播机制<sup>[8,9]</sup>中,节点需要维护全部或部分拓扑信息,然后通过拓扑信息决定转发分组的节点集,但是网络拓扑的动态变化使得拓扑信息的维护十分困难:较慢的信息更新会增加冗余广播,而频繁的信息更新将严重消耗节点资源。

在概率转发机制<sup>[10-12]</sup>中,分组以概率  $p$  被广播,这个概率  $p$  可以是确定的,也可以是动态的。文献[10]提出了一种广播机制,该机制融合了确定概率广播和基于计数的广播两种机制的特点,对于网络节点密度稀疏部分的节点赋予转发概率  $p_1$ ,而对于网络节点密度稠密部分的节点赋予转发概率  $p_2$ 。文献[11]提出了一种基于计数的动态概率广播算法

到稿日期:2013-05-21 返修日期:2013-08-31 本文受中央高校基本科研业务费专项资金(N110323007)资助。

胡曦(1980—),男,博士,讲师,主要研究方向为网络优化算法、路由算等,E-mail: neuqhx@126.com;王鑫(1979—),男,博士生,讲师,主要研究方向为无线认知网络;张斌(1980—),男,硕士,讲师,主要研究方向为分布式算法。

DPCBS。在 DPCBS 算法中,当节点第一次收到某个广播分组后,启动一个计数器以记录在此之后收到相同广播分组的次数,当计数定时器超时后,判断计数值是否超过预设的门槛,是则以低概率  $p_{\min}$  继续广播;否则以高概率  $p_{\max}$  继续广播, $p_{\min}$  和  $p_{\max}$  都是通过一个指数函数计算得到的。文献[12]提出一种动态概率广播算法 DP,节点如果  $N$  次重复收到同一分组,则以概率  $p$  广播此分组。该机制通过本地分组计数器动态调整转发概率  $p$ ,如果节点处于密集区域,由于收到大量来自其邻居的广播分组,故分组计数器值较高,此时需要通过某一减量  $d$  来减小其转发概率;否则,需要通过某一增量  $r$  来增加其转发概率。

与确定性广播机制相比,概率广播只需要维护较少的拓扑信息,并且能够根据网络变化调整广播概率,更加适合于动态变化的 MANET 网络环境。但是这些概率广播机制都需要通过预先设定静态的阈值或条件来调整广播概率,对网络变化的自适应能力较差。

近些年来,不断有研究者用博弈的思想来解决网络中的关键问题。文献[13-19]利用博弈理论对 MANET 节点自私行为进行研究,提出了不同的合作激励算法;文献[20]提出了一种 MANET 容量非合作规划博弈模型,并对该模型的稳定性进行了研究;由于无线自组织网络中节点和信道资源受限,因此文献[21-23]通过博弈思想来解决路由分配的公平性问题。

基于以上研究成果的分析,可以发现对于 MANET 路由开销控制博弈模型和算法的研究十分不足,而对于具有较大路由开销的 QoS 路由算法,如面向稳定性的路由算法来说更是空白。因此本文针对面向稳定性的路由寻路过程中产生的大量冗余 RREQ 分组,提出了一种基于策略型博弈的自适应路由开销控制算法(Strategy Game-based Adaptive Routing Overhead Control Algorithm, GA-ROC)。在 GA-ROC 算法中,RREQ 的转发行为被建模为一个由邻居节点参与的策略型博弈,邻居节点利用混合策略纳什均衡计算出 RREQ 的转发概率。整个博弈过程完全由节点根据网络情况自主进行,对网络变化具有较强的自适应性。最后通过仿真实验对提出的 GA-ROC 算法进行了验证,实验结果显示 GA-ROC 算法能够有效地减少路由开销和传输延迟,提高路由的整体性能。

## 2 RREQ 转发的策略型博弈

### 2.1 博弈模型建立

博弈是关于包含相互依存情况的理性行为的研究,相互依存是指博弈中的任意一个局中人都要受到其他局中人行为的影响,反过来,他的行为也会影响其他局中人<sup>[24]</sup>。一个博弈包含 3 个要素:(1)博弈的参与者集合;(2)可供每个参与者选择的策略集合;(3)每个参与者的收益函数,收益函数描述了参与者对于不同策略的偏好。

由以上定义出发,可以将 RREQ 转发过程描述为一个由所有邻居节点参与的策略型博弈<sup>[25]</sup>:若某个节点  $a$  的  $r$  个邻居节点收到其广播的 RREQ,那么每个邻居节点都希望这个 RREQ 能够被再次转发,但是却宁愿由其他邻居节点进行转发。

设节点  $a$  的邻居节点集为  $N = \{n_i; i = 1, 2, 3, \dots, r\}$ ;每个邻居节点可以选择转发或者丢弃收到的 RREQ;节点的代

价函数和报酬函数分别表示为  $C(s)$  和  $V(s)$ ,  $c$  和  $v$  分别是  $C(s)$  和  $V(s)$  的函数值,  $s$  表示 RREQ 中记录的路径稳定性评估值。因此,建立 GA-ROC 博弈模型如下:

(1)共有  $r$  ( $r \geq 2$  且  $r \in N$ ) 个参与者(邻居节点);

(2)对于收到的 RREQ,每个邻居节点的可选策略  $H = \{\text{转发 } F, \text{丢弃 } D\}$ ;

(3)若所有邻居节点都选择丢弃,则它们获得的收益均为 0;若所有邻居节点都选择转发,则它们获得的收益均为  $v - c$  ( $v > c > 0$ );若部分邻居节点选择转发,而其余邻居节点选择丢弃,则选择转发的邻居节点可以获得收益  $v - c$ ,选择丢弃的邻居节点可以获得收益  $v$ 。因此某一邻居节点  $j$  的收益可以由式(1)计算得到:

$$G_j(h) = \begin{cases} v, & \text{if } h_j = D \text{ and } \exists h_i = F \text{ for all } i \neq j \\ v - c, & \text{if } h_j = F \\ 0, & \text{if } h_j = D \text{ for all } j \end{cases} \quad (1)$$

式中, $G(h)$  表示节点选择转发策略  $h$  时获得的收益;节点  $i$  表示不同于节点  $j$  的任一邻居节点。

根据可选策略  $H$ ,将邻居节点  $N$  集划分为两个子集  $M$  和  $K$ ,若满足(1) $M \subset N$  且  $K \subset N$ , (2) $M \cup K = N$  且  $M \cap K = \emptyset$ ,则  $(M, K)$  在可选策略  $H$  下一共可以得到 4 种组合:  $(F, D)$ 、 $(F, F)$ 、 $(D, F)$  和  $(D, D)$ ,从而得到 GA-ROC 博弈模型的收益矩阵,如图 1 所示。

		K	
		F	D
M	F	$\{v - c\}, \{v - c\}$	$\{v - c\}, \{v\}$
	D	$\{v\}, \{v - c\}$	$\{0\}, \{0\}$
		(M, K)	

图 1 GA-ROC 博弈模型的收益矩阵

### 2.2 混合策略纳什均衡

在 2.1 节建立的策略型博弈中,存在一个对称的混合策略纳什均衡,即存在一个稳定状态,使得对于任一参与者,不管其他参与者选择何种策略,自己只要以某一概率转发 RREQ 就会获得最大收益。

设  $p_i$  是任一参与者(邻居节点)  $i$  选择策略  $F$  的概率,则其选择策略  $D$  的概率是  $1 - p_i$ 。由此可以得到该参与者获得的期望收益为:

$$E_i = p_i(v - c) + (1 - p_i) \left\{ 0 \cdot \prod_{j \neq i} (1 - p_j) + v \left[ 1 - \prod_{j \neq i} (1 - p_j) \right] \right\} \quad (2)$$

化简式(2),得到

$$E_i = p_i(v - c) + (1 - p_i)v \left[ 1 - \prod_{j \neq i} (1 - p_j) \right] \quad (3)$$

对  $p_i$  求偏导,得到

$$\frac{\partial E_i}{\partial p_i} = (v - c) - v \left[ 1 - \prod_{j \neq i} (1 - p_j) \right] \quad (4)$$

令  $\frac{\partial E_i}{\partial p_i} = 0$ , 得到

$$v - c = v \left[ 1 - \prod_{j \neq i} (1 - p_j) \right] \quad (5)$$

由式(5)计算得到

$$p_i = 1 - \left( \frac{c}{v} \right)^{\frac{1}{r-1}} \quad (6)$$

由式(5)可以得到该博弈模型的一个重要性质:当博弈处于这个混合策略纳什均衡所描述的稳定状态时,参加博弈的

任一邻居节点  $i$  以概率  $p_i$  转发 RREQ, 其转发 RREQ 的期望收益等于其丢弃 RREQ 的期望收益, 并且转发概率  $p_i$  可以由式(6)唯一确定。

### 2.3 RREQ 转发概率的计算

用  $C(s)$  和  $V(s)$  分别替换式(6)中的  $c$  和  $v$ , 可以得到转发概率关于邻居节点数  $r$  和链路稳定性  $s$  的函数:

$$P(r, s) = 1 - \left(\frac{C(s)}{V(s)}\right)^{\frac{1}{r-1}} \quad (7)$$

式中,  $C(s)$  是关于  $s$  的单调递减函数, 即链路的稳定性越小, 转发付出的代价就越大;  $V(s)$  是关于  $s$  的单调递增函数, 即链路的稳定性越大, 转发获得的报酬就越多。

令  $f(s) = \frac{C(s)}{V(s)}$ , 则  $f(s)$  应该满足以下条件: (1) 是关于  $s$  的单调递减函数; (2)  $f(s) \in (0, 1)$ ; (3) 当  $s=0$  时,  $f(s)=1$ ; 当  $s=+\infty$  时,  $f(s)=0$ 。因此, 选取

$$f(s) = \left(\frac{1}{1+\sqrt{s}}\right)^\lambda \quad (8)$$

式中,  $\lambda$  ( $\lambda$  为正整数) 是一个调整因子, 通过调整  $\lambda$  的大小能够改变  $f(s)$  的递减速度。

将式(8)代入式(7), 得到

$$P(r, s) = 1 - \left(\frac{1}{1+\sqrt{s}}\right)^{\frac{\lambda}{r-1}} \quad (9)$$

由式(9)可以看出, RREQ 的转发概率随着链路稳定性的增加而增大, 随着邻居节点数目的增大而减小。这样既可以提高稳定链路的被选概率, 又可以在邻居节点较多时有效地减少冗余 RREQ。

## 3 GA-ROC 算法

### 3.1 链路稳定性评估

文献[26]提出一种利用节点运动信息评估链路稳定性的方法: 设两个节点  $i$  和  $j$  的传输半径为  $R$ , 移动速率和方向分别为  $(v_i, \theta_i)$  和  $(v_j, \theta_j)$ , 当前坐标分别为  $(x_i, y_i)$  和  $(x_j, y_j)$ , 则链路  $L_{ij}$  的稳定性评估值 LET (Link Expiration Time) 的计算如式(10)所示:

$$LET = \frac{-(ab+cd) + \sqrt{(a^2+c^2)R^2 - (ad-bc)^2}}{a^2+c^2} \quad (10)$$

这里

$$a = v_i \cos \theta_i - v_j \cos \theta_j$$

$$b = x_i - x_j$$

$$c = v_i \sin \theta_i - v_j \sin \theta_j$$

$$d = y_i - y_j$$

在 LET 的基础上, 路径稳定性评估值 RET (Route Expiration Time) 定义为该路径上的最小 LET 值, 即

$$RET = \min\{LET_h\} \quad h \in [1, hop] \quad (11)$$

其中,  $hop$  为这条路由的最大跳数。

### 3.2 基于博弈的 RREQ 转发

节点在广播 RREQ 时用自己的邻居节点数目和运动信息更新 RREQ。当其邻居节点收到此 RREQ 后, 将 RREQ 中记录的邻居节点数目和评估出来的链路稳定性代入式(9)就可以得到此 RREQ 的转发概率, 但若邻居节点数目恰好为 1, 则规定转发概率等于 1。并且在转发 RREQ 之前, 必须用转发节点的邻居节点数目和运动信息更新 RREQ。具体描述如图 2 所示。

Algorithm 1 Game-based RREQ Forwarding

```

1. neighbor node i receives the RREQ
2. IF r=1 THEN
3.     p=1
4. ELSE
5.     calculates the forwarding probability p for this RREQ
6. ENDIF
7. generates an uniform random number T between 0 and 1
8. IF T ≤ p THEN
9.     updates RREQ
10.    broadcasts this RREQ
11. ELSE
12.    drops this RREQ
13. ENDIF

```

图 2 基于博弈的 RREQ 转发

### 3.3 GA-ROC 算法描述

在 GA-ROC 算法中, 源节点广播 RREQ, 该 RREQ 中记录了源节点 ID、目的节点 ID、广播序列号、转发节点列表以及广播节点的运动信息和邻居节点数目。当邻居节点收到 RREQ 后, 首先根据 RET 值和路由跳数决定是否丢弃此 RREQ, 如果不丢弃则进行基于博弈的 RREQ 转发。当目的节点第一次收到此 RREQ 后会等待一段时间, 以获得稳定性更好的路径, 在等待定时器超时后, 目的节点选择稳定性最好的路径应答 RREP。GA-ROC 算法描述如图 3 所示。

Algorithm 2 GA-ROC Algorithm

```

1. source node s broadcasts a RREQ
2. neighbor node i receives the RREQ
3. calculates LET
4. updates RET and hop_count recorded in RREQ
5. IF this RREQ is a duplicate one THEN
6.     IF it has a bigger RET THEN
7.         IF it has a less hop_count THEN
8.             records the information about this RREQ
9.         ELSE
10.            drops the RREQ
11.        ENDIF
12.    ELSE
13.        drops the RREQ
14.    ENDIF
15. ELSE
16.        records the information about this RREQ
17. ENDIF
18. IF node i is the destination THEN
19.    stores the RREQ received until timer is timeout
20.    IF timer is timeout THEN
21.        selects the best path to reply a RREP
22.    ENDIF
23. ELSE
24.    executes game-based RREQ forwarding
25. ENDIF

```

图 3 GA-ROC 算法描述

## 4 仿真分析

本文使用 ns-2.29 作为仿真工具, 通过仿真实验分别研究了调整因子  $\lambda$  的选取和 GA-ROC 算法的性能。基本的仿真参数设置如表 1 所列。

表1 仿真参数的设置

参数	值
场景大小	700m×700m
节点数目	50
无线传输模型	Two-ray ground reflection
传输半径	250m
节点移动模型	Random Waypoint
节点最小移动速度	1m/s
节点最大移动速度	[10,20,30,50,80]m/s
节点停留时间	0s
数据分组	CBR,512Bytes/packet
数据流	15connects,4packets/s
仿真时间	600s

#### 4.1 性能指标

(1)平均路由生命周期——仿真时间内所有可用路由的平均维持时间。

(2)分组递交率——仿真时间内目的节点成功接收的数据分组数目与源节点发送的数据分组数目的比值。

(3)路由开销——仿真时间内使用的控制分组总数与发送的数据分组总数的比值,这里控制分组包括 RREQ、RREP 和 RERR。

(4)平均时延——仿真时间内所有被目的节点成功接收的数据分组从源节点传输到目的节点经历的时延的期望值。

(5)平均路由跳数——仿真时间内所有路由跳数的期望值,反映了路由的平均长度。

#### 4.2 调整因子λ的选取

分别在λ=10,20,30,40,50时对GA-ROC算法的分组递交率、路由开销和平均时延进行了仿真实验和比较分析。仿真结果如图4所示,所有仿真结果都是取5次实验的平均值。

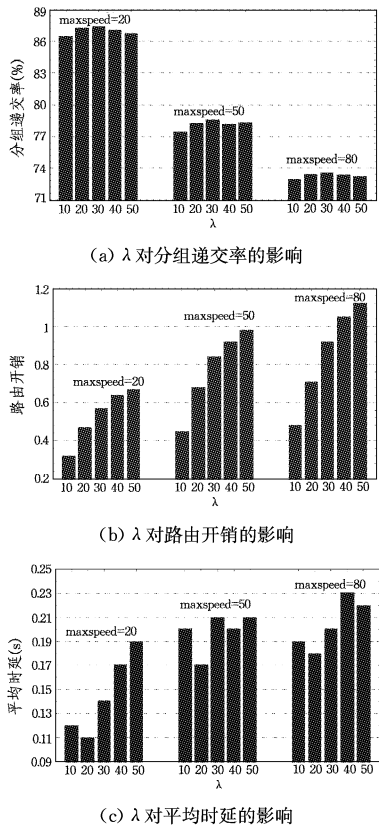


图4 不同移动速度时调整因子λ对GA-ROC性能的影响

从图4(a)中可以看到,GA-ROC算法的分组递交率随着

λ的增大呈现先增大后减小的变化趋势,其中λ=30时最高,λ=20时稍次之;从图4(b)中可以看到,GA-ROC算法的路由开销随着λ的增大而增大,其中λ∈[10,30]时的增大速度明显高于λ∈[30,50]时的增大速度;从图4(c)中可以看到,虽然GA-ROC算法的平均时延在不同移动速度下的变化趋势不完全一致,但是基本上在λ值较小时的平均时延相对较小,λ值较大时的平均时延较大。而且明显可以看出在不同移动速度下λ=20时都获得了最小的平均时延。因此,基于以上实验结论和分析,可以得出调整因子λ的一个比较合适的取值为λ=20。

#### 4.3 算法性能及分析

在对GA-ROC算法性能的研究中分别仿真了AODV<sup>[27]</sup>,ROMSP<sup>[3]</sup>和GA-ROC(λ=20)3种不同的路由发现算法,并根据仿真结果对它们的性能进行了比较分析。其中,AODV采用的是基本洪泛路由发现策略:对于具有相同源节点、目的节点及广播序列号的RREQ分组,每个节点只转发一次;ROMSP采用的是基于路径稳定性的路由发现策略,在实现中进一步限定对具有相同源节点、目的节点及广播序列号的RREQ分组,不仅要具有更高的稳定性,而且要同时具有更少的跳数才允许被转发。

所有仿真结果都是取5次实验的平均值,并给出了置信度为0.95时的置信区间。

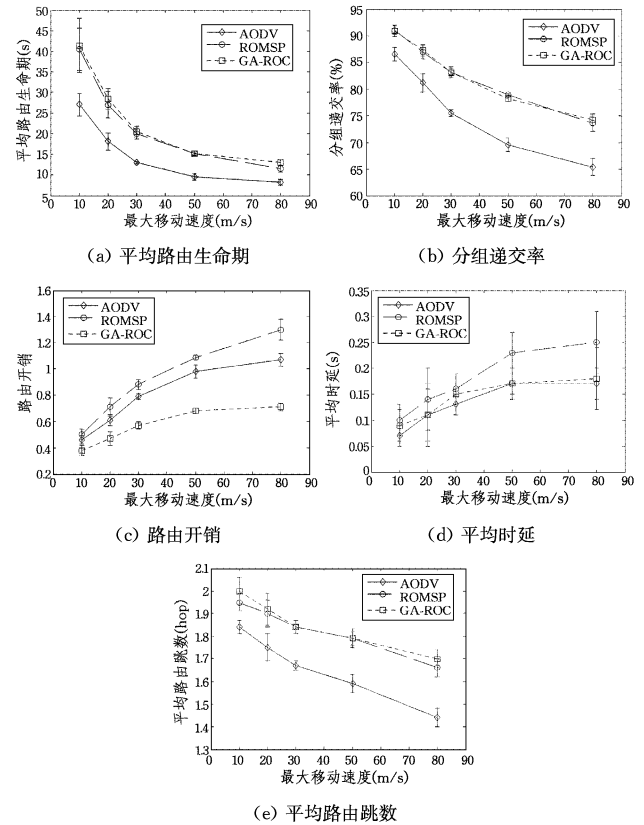


图5 不同节点移动速度时的GA-ROC算法性能

从图5(a)中可以看到:随着节点移动速度的增加,3种路由发现算法的路由生命周期都明显减小。在移动速度从10m/s增加到30m/s的区间内,3种算法路由生命期的下降趋势显著,而当移动速度超过30m/s后,路由生命期的下降趋势明显变缓。此外还可以看到,无论节点移动速度如何变化,GA-ROC算法和ROMSP算法的路由生命周期都基本相同,说明基

于博弈的 RREQ 转发不会造成路由稳定性的下降。而且稳定性路由发现算法的路由生命期要明显高于 AODV 路由发现算法,但是这种优势随着节点移动速度的增加会受到一定的削弱。从图 5(b)中可以看到:随着节点移动速度的增加,3 种路由发现算法的分组递交率都明显减少。但是利用稳定性寻路的算法 GA-ROC 和 ROMSP 的分组递交率要明显高于采用普通洪泛寻路的 AODV 算法,而且优势程度随着节点移动速度的增加而增加。此外,GA-ROC 算法的分组递交率与 ROMSP 算法基本相同。从图 5(c)中可以看到:3 种路由发现算法的路由开销都随着节点移动速度的增加而增加。但基于稳定性的 ROMSP 算法的路由开销要高于采用普通洪泛寻路的 AODV 算法,这说明 ROMSP 算法虽然能够找到稳定性更好的路由,增加分组递交率,但是在其寻路过程中中间节点进行了更多的重复广播,从而抵消了由于路由稳定性增强而减少的那部分路由开销。而 GA-ROC 算法虽然也是利用稳定性进行寻路,但是由于其在寻路过程中采用了基于博弈的 RREQ 转发,大大减少了中间节点的 RREQ 广播,使得其路由开销明显低于 ROMSP 和 AODV。从图 5(d)中可以看到:3 种路由发现算法的平均时延都随着节点移动速度的增加而增加。在节点移动速度从 10m/s 增加到 50m/s 的区间内,3 种算法的平均时延增加比较快速,而当节点移动速度大于 50m/s 后,平均时延的增加比较缓慢。同时还可以看到 ROMSP 的平均时延要略高于 AODV 和 GA-ROC,而后两种算法的平均时延则基本相同。从图 5(e)中可以看到,3 种路由发现算法的平均路由跳数都随着节点移动速度的增大而减少,说明了节点的移动性有助于减少路由长度。同时可以看到 GA-ROC 和 ROMSP 的路由长度基本相同,但都略高于 AODV 的路由长度,说明了稳定性路由发现算法会在一定程度上增加路由长度。

**结束语** MANETs 基于稳定性的路由发现过程中会产生大量的冗余 RREQ 广播,降低网络性能,因此,本文提出了一种基于策略型博弈的路由开销控制算法 GA-ROC。在 GA-ROC 算法中,收到同一 RREQ 分组的邻居节点之间形成了一种策略型博弈,参加博弈的邻居节点利用唯一存在的混合策略纳什均衡得到该 RREQ 分组的转发概率。同时由于 GA-ROC 算法中不存在人为设置的静态条件,而且转发概率的计算以链路稳定性和邻居节点数目作为参数,因此 GA-ROC 算法能够自适应网络环境的变化。大量的仿真结果说明,提出的 GA-ROC 算法不仅能够较好地保持稳定性路由算法对于增加路由有效时间和分组递交率的优点,还能够显著地降低路由开销和平均时延,控制路由长度。

本文研究工作及结果说明 GA-ROC 算法在节点连通度较高的 MANET 网络环境中具有较好的性能,下一步工作将研究提高 GA-ROC 算法对节点连通度较差的 MANET 网络如延时容忍网络的适用性。

## 参 考 文 献

[1] 吴大鹏,武穆清,甄岩,等. 面向链路稳定性的 MANET 路径建立机制[J]. 电子与信息学报,2009,31(9):2226-2231  
 [2] 胡曦,李喆,刘军. 移动 Ad hoc 网络中基于链路稳定性预测的按

需路由协议[J]. 电子与信息学报,2010,32(2):284-289  
 [3] Sakhaee E, Taleb T, Jamalipour A, et al. A Novel Scheme to Reduce Control Overhead and Increase Link Duration in Highly Mobile Ad Hoc Networks[C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Kowloon, 2007: 3972-3977  
 [4] 肖百龙,郭伟,刘军,等. 移动自组织网络基于链路稳定性的伪流言路由算法[J]. 通信学报,2008,29(6):26-33  
 [5] Wang N C, Huang Y F, Chen J C. A stable weight-based on-demand routing protocol for mobile ad hoc networks[J]. Information Sciences, 2007, 177(24):5522-5537  
 [6] Taleb T, Sakhaee E, Jamalipour A, et al. A stable routing protocol to support ITS services in VANET networks[J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2007, 56(6):3337-3347  
 [7] Tseng Y C, Ni S Y, Chen Y S, et al. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network[J]. Wireless Networks, 2002, 2(8):153-167  
 [8] Woon W, Yeung K L. Self-Pruning Broadcasting for Mobile Ad Hoc Networks[C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. 2009:1-6  
 [9] Yen Yun-sheng, Chang Hung-chieh, Chang Ruay-shiung, et al. Routing with adaptive path and limited flooding for mobile ad hoc networks[J]. Computers and Electrical Engineering, 2010, 36(2):280-290  
 [10] Mohammed A, Ould-Khaoua M, Mackenzie L M, et al. An adjusted counter-based broadcast scheme for mobile ad hoc networks [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Computer Modeling and Simulation (EUROSIM/UKSIM 2008). 2008:441-446  
 [11] Mohammed A, Ould-Khaoua M, Mackenzie L M, et al. Dynamic probabilistic counter-based broadcasting in mobile ad hoc networks[C]//Proceedings of 2nd International Conference on Adaptive Science & Technology. 2009:120-127  
 [12] Zhang Q, Agrawal D P. Dynamic probabilistic broadcast in MANETs[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2005, 65:220-233  
 [13] 于坤,单劲松,朱全银. Ad hoc 网络的基于债务关系的合作激励机制[J]. 计算机应用研究,2012,29(9):3444-3447  
 [14] 王博,黄传河. Ad hoc 网络中一种基于防策略支付模型的安全激励合作算法[J]. 计算机学报,2012,35(7):1370-1389  
 [15] 王博,黄传河,杨文忠,等. Ad hoc 网络中基于惩罚机制的激励合作转发模型[J]. 计算机研究与发展,2011,48(3):398-406  
 [16] Jose J J, Srikant R. A game theory based reputation mechanism to incentivize cooperation in wireless ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2010, 8(4):416-429  
 [17] Marcela M, Nstor P, Muioz, et al. A game theoretic trust model for on-line distributed evolution of cooperation in MANETs[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2011, 34(1): 39-51  
 [18] Chen Ting-Ting, Wu Fan, Zhong Sheng. FITS: A finite-time reputation system for cooperation in wireless ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2011, 60(7): 1045-1056  
 [19] 张程,刘慧君,陈自郁,等. 基于信用的重复博弈模型在节点转发中的应用[J]. 解放军理工大学学报,2012,13(2):152-158

(下转第 123 页)

组成的排队网络,假设 TDMA 数据链端机节点为  $M_1/G_1/1$  排队系统,轮询数据链端机节点为  $M_2/G_2/1$  排队系统,则该报文传输过程可抽象为  $M_1/G_1/1+M_2/G_2/1$  系统。同理当轮询数据链端机节点发送的报文经过转发站发送至 TDMA 数据链端机节点时,则报文传输过程可抽象为  $M_1/G_1/1+$

$M_2/G_2/1$  系统。由于 TDMA 数据链和轮询数据链的资源调度方式具有不确定性,因此对于这样的一个排队网络采用解析方法进行求解,工作量且不易实现,另外不具有普遍适用性,所以,采用仿真的方法进行分析,通过对仿真模型重用减少工作量,使得仿真结果更具普遍性。

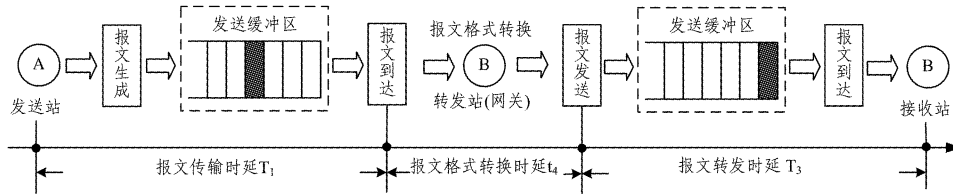


图 8 两点之间通过转发站进行报文传输

图 9 体现了报文转发传输时延与时隙重复率之间的关系,随着时隙重复率的增加,报文转发传输时延也增大。当时隙重复率为 10 时,虽然中继时延间隔固定,但是由于服务响应时延较高,导致中继传输时延最高,在 1.68 秒趋于平稳。当时隙重复率为 11 时,由于单位时隙内分配的时隙个数增多,时隙间隔减小,报文服务强度增大,服务响应时延降低,报文转发传输时延随之降低,在 0.60 秒趋于稳定。当时隙重复率为 12 时,单位时隙内分配的时隙个数进一步增多,时隙间隔减小,报文服务强度进一步增大,服务响应时延进一步降低,报文中继时延也进一步降低,在 0.50 秒趋于平稳。

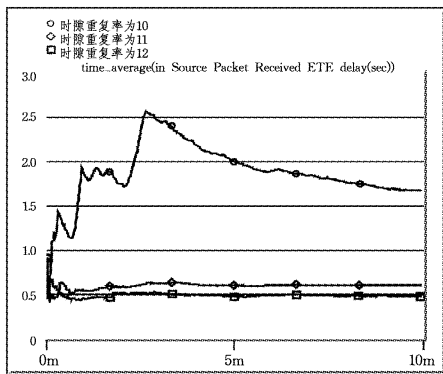


图 9 不同时隙重复率下的转发传输时延

**结束语** 本文采用指数分布模型描述数据链的业务源,利用排队模型分析数据链点对点报文传输时延,采用解析方法分析了服务响应时延在不同报文到达强度和报文服务强度条件下的变化;在此基础上分析了数据链中继报文传输时延以及转发报文传输时延,并利用 OPNET 网络仿真平台对其进行分析与仿真,分析了不同中继条件下,时隙重复率以及中继时延间隔下的报文中继传输时延,以及不同时隙重复率下

的报文转发传输时延。

由以上分析可知,数据链的报文传输时延主要取决于发送站的报文到达强度和报文服务强度。报文到达强度主要取决于实际应用背景,为了减小传输时延,必须提高站点的报文服务强度,即分配给发送站点尽量多的时隙。但一个作战单元时隙分配过多,会使整个数据链网络容纳的作战单元个数减少。数据链包括各种类型的报文,不同类型报文的到达强度不同,对时延的要求也不同。例如对于执行远程拦截任务的战斗机,在 12.8 分的时元内,只需用 1 个时隙来发射其位置和状态信息;而对于传输目标航迹信息的报文,则需要较多的发送时隙,从而有较短的发送周期,能够较快地更新目标的航迹信息。但是针对此类报文的时隙分配也不是越多越好,时隙分配的数量要考虑到雷达的探测周期,若报文发送周期比雷达的一个探测周期小得多,则可能造成两个相邻的航迹信息报文传达了同一个航迹信息,从而造成时隙资源的浪费。

因此,需要综合考虑作战单元所承担的任务、发送报文的类别,以及该报文到达强度、报文对时延的要求等因素,确定分配一个作战单元的时隙个数,在将报文时延控制在可接受范围的前提下,尽量少占用时隙资源,容纳较多作战单元。

参 考 文 献

[1] Mei Wen-hua, Cai Shan-fa. JTIDS/Link16 Data Link (in Chinese)[M]. Beijing National Defense Industry Press, 2007  
 [2] 李献昌,刘凯,张军. S-TDMA 协议点对点通信的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(13): 3079-3079  
 [3] 田斌鹏. 战术数据链实时性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007  
 [4] 梁俊,田斌,等. 一种支持 QoS 的 DTDMA 协议性能分析与仿真[J]. 空军工程大学学报, 2010, 11(1): 59-63  
 [5] 王翔,吕娜,张岳彤. 武器数据链多址接入技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(5): 77-79

(上接第 104 页)

[20] 杨娟,李颖,张志军,等. 移动 Ad hoc 网络容量非合作规划博弈模型的稳定性[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(1): 75-81  
 [21] 龙飞,汪春霆,杨治安. 一种基于博弈论的无线网状网络路由与信道分配联合优化算法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(2): 94-101  
 [22] 姬文江,马建峰,田有亮,等. 无线 mesh 网中一种基于博弈论的公平性路由协议[J]. 通信学报, 2012, 33(11): 17-23  
 [23] 先兴平,刘群,吴涛. 拍卖博弈模型在无线传感器网络路由中的应用研究[J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(5): 1083-1088

[24] 施锡铨. 博弈论[M]. 上海:上海财经大学出版社, 2000: 1-9  
 [25] Osborne M J. An introduction to game theory[M]. England: Oxford University Press Inc., 2004: 122-124  
 [26] Su W, Lee S J, Gerla M. Mobility prediction and routing in ad hoc wireless networks[J]. Int. J. Netw. Manage, 2001, 1(11): 3-30  
 [27] Perkins C, Belding-Royer E, Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing [OL]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>, 2003