

# MANET 中一种具有能量意识的 无信标地理路由算法

王国栋, 王 钢

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 地理路由具有有效的传输性能和良好的可扩展能力, 是当前移动 Ad Hoc 网络路由算法中的一个研究热点. 在许多实际场合下, 网络中的节点能量有限且难以补充, 所以合理调整节点之间的能量消耗成为提高网络寿命的一种重要手段. 本文针对贪婪转发和空洞解决方案中存在的节点能量消耗不平衡的问题, 提出了一种具有能量意识的无信标地理路由算法 EBGR (Energy-Aware and Beaconless Geographic Routing). 该算法包括两个模式: 贪婪竞争策略和空洞解决策略. 在贪婪竞争策略中, 源节点或中继节点(即上游节点)广播数据包, 位于数据包转发域内具有最小动态转发延迟的节点(即下游节点)转发数据包, 其余候选节点侦听到该广播包后, 自动放弃转发该数据包. 当遇到节点空洞时, 将角度和能量信息同时加入到转发节点的动态延迟计算中, 从而在数据包转发过程中有效地避免空洞和平衡节点间的能量消耗. 仿真结果表明, 与已有的 BLR 和 GEAR 等典型地理路由算法相比, 平均投递率提高 2% 到 4%; 平均网络寿命提高了 10% 到 20%.

**关键词:** 信标; 竞争; 地理路由; 转发; 网络寿命; 能量

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112(2010)07-1547-05

## An Energy-Aware and Beaconless Geographic Routing for Mobile Ad Hoc Network

WANG Guo-dong, WANG Gang

(Department of Electronic and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Geographic routing has been widely hailed owing to its efficiency and scalability, and it is one of research hotspots for routing algorithms of Mobile Ad Hoc Network. Since node energy in such network is limited and cannot be supplemented easily in many cases, balancing energy consumption is one of the most important method to prolong network lifetime. To solve the problem of the energy-consumption imbalance of greedy routing and perimeter routing, we present an Energy-Aware and Beaconless Geographic Routing (EBGR). It operates in two strategies: contend-based greedy-forwarding strategy and void handling strategy. In the contend-based greedy-forwarding strategy, nodes forward data packets by competition. When receiving a data packet from upstream node, intermediate nodes within its forwarding area contend to relay it by waiting for a dynamic forwarding delay (obtained by energy and location information and called DFD). The intermediate node with minimum DFD transmits the data packet first and other nodes cancel their scheduled transmission for the same data packet by overhearing its packet forwarding. When there are no neighbor nodes in the forwarding area, a void handling strategy is employed. Applying angle progress and energy information to DFD, we can allow data packet to traverse the void and to balance energy consumption. Finally, simulation results show that EBGR exhibits 2% - 4% packet delivery ratio higher and 10% - 20% network lifetime longer than BLR and GEAR.

**Key words:** beacon; contend; geographic routing; forwarding; network lifetime; energy

### 1 引言

移动 Ad Hoc 网络 (Mobile Ad Hoc Network, MANET) 是由若干移动自组织节点组成的、不需要固定基础设施

支撑的无线多跳网络. MANET 面临的关键问题之一就是路由问题, 即如何在众多节点中合理高效地分配无线资源并在源节点和目的节点之间建立稳定有效的路由, 从而将数据分组传送到目的节点.

最近几年,由于GPS技术的广泛利用,很多学者对基于地理位置的路由算法开展研究.由于地理路由不要求路由管理过程,它相对于先应式、后应式等路由算法,具有更低的路由负载.同时,对于大规模网络,地理路由还具有简单性和可扩展性等优点.

文献[1~4]研究了基于贪婪转发的路由算法.每个节点周期性地广播信标,从而保证得到邻节点的位置信息.当一个节点将要发送一个数据包时,它根据自己、邻节点和目的节点的位置信息来决定下一跳节点.贪婪转发算法通常选择的路径接近最优,但是由于纯粹的贪婪转发一直选取最短路径上的节点作为中继节点,导致这些节点的能量过早消耗殆尽,严重影响了网络寿命.其次,当数据包投递过程中遇到空洞,它们通常采用基于平面图的空洞解决方案.例如在文献[5]中,节点首先剔除可能导致回路的链路,使得网络拓扑“平面化”.当遇到节点空洞,转发就会沿着空洞边缘进行,得以避免空洞.同样在这种情况下,空洞边缘节点的能量会被过早消耗掉.除了这两个问题以外,这种周期性发送信标的机制还将导致额外的路由开销,包括带宽占用、保存信息和能量消耗等.

文献[6~8]研究了能量消耗和网络寿命之间关系.这些算法仍然采用了信标机制,将节点的剩余能量等信息也加入到信标中,使得节点在做转发选择时,兼顾邻节点的能量消耗,从而提高了网络寿命.但是当网络拓扑变化较快时,这些算法的性能并不能令人满意.

另一类代表性的路由算法是基于竞争(或无信标)的地理路由算法,如BLR<sup>[9]</sup>,CBF<sup>[10]</sup>和IGF<sup>[11]</sup>.这类路由算法不再采用周期性发送信标的机制,从而可以在一定程度上降低网络开销.大致思想如下:(1)在预先设定好的转发区域中的节点成为下一跳的候选节点,它们在此转发域中互相竞争,发送数据包.(2)采用一个分布式的机制使得这种竞争只产生单路径传播.(3)采用一种有效机制来解决节点空洞问题.然而,由于无法通过信标获知邻节点的信息,这些算法的空洞解决方案效率并不令人满意,例如,它们通常采用的临时信标机制和局部泛洪都将导致较多的延迟和能量消耗.

本文提出了一种具有能量意识的无信标地理位置路由算法EBGR(Energy-Aware and Beaconless Routing).该算法采用无信标机制,针对转发区域中是否存在邻节点,提出了两种不同的解决方案.当转发域存在邻节点时,采用贪婪竞争策略.它将位置和能量信息结合,选择具有最小动态转发延迟的下一跳节点,从而可以在保证数据包的投递的同时,提高了网络寿命.当转发域无邻节点时,则该转发区域等效于一个路由空洞,此时,该算法将位置信息换算成角度信息,并将它与能量信息结合,确定出具有最小动态转发延迟的下一跳节

点,从而使数据包的转发避免此空洞,不但有效提高了数据包投递率,而且还减少了低能量节点的能量消耗.

## 2 EBGR路由算法

### 2.1 前提和假设

所有节点处于一个二维的网络空间中,每个节点可以通过某种装置(如GPS)知道自己的位置.存在一种位置服务机制(如GLS<sup>[12]</sup>)使源节点准确得知目的节点的位置信息.由于没有信标,每个节点不知道邻节点的位置,且每个节点的通信范围相同,链路也是双向的.

### 2.2 贪婪竞争策略

为了实现贪婪竞争策略的成功转发,我们首先引入一个转发域的概念.这个转发域必须满足如下条件:

(1)所有在此区域内的节点都比上游节点离目的节点更近;(2)所有在此区域内的节点之间可以互相通信,以避免竞争出现多于1个的胜利者;(3)这个区域必须尽量大,使得上游节点有较大可能找到下游节点.根据这三个条件,我们采用的转发区域为如图1所示的60°阴影扇形区域.

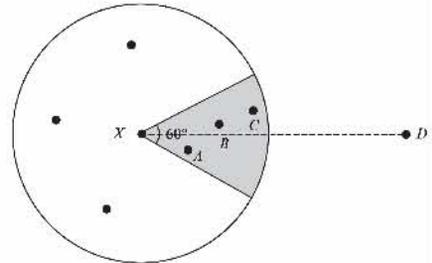


图1 转发域的选取示意图

一旦一个节点(源节点或中继节点)需要发送数据包,它将自己和目的节点的位置信息写入数据包头,然后将它广播给所有邻节点.接收到数据包后,每个邻节点提取这两个位置信息,判断自己是否处于转发域.如果在转发域外,丢弃这个包;否则,则需要计算自己的动态转发延迟DFD(Dynamic Forwarding Delay).动态转发延迟是由当前节点、上游节点和目的节点的位置信息,以及当前节点的能量状况计算得到的(详细计算方法将在后面介绍).根据转发域内所有节点的DFD值,选取具有最小DFD值的节点作为中继节点(也称为下游节点),等待DFD时间后,转发数据包.当被选作中继节点的DFD时间耗尽时,该节点将包头中上游节点的位置信息替换为自己的,然后将数据包广播出去.由于此节点率先广播了数据包,转发域内处于竞争状态的其它节点侦听到这个消息,随即取消了各自的发送计划.上游节点侦听到有下游节点转发同一数据包后,它将删除存储在自己这的数据包.这样的过程循环往复,直到目的节点接收到此数据包.

这里,DFD值的计算如式(1)所示:

$$DFD = \text{Max\_delay} \left[ \alpha \frac{r-p}{r} + (1-\alpha) \frac{E-e}{E} \right] \quad (1)$$

其中,  $\alpha (0 < \alpha \leq 1)$  是可调系数,  $r$  是节点的通信半径,  $p$  是指当前节点相对于上游节点向目的节点前进的距离,  $e$  指当前节点的剩余能量,  $E$  是节点的初始能量,  $Max\_delay$  是一个节点等待的最长时间, 一般设为 50ms. 由图 1 可以看出, 节点  $C$  离目的节点  $D$  最近, 但如果它的剩余能量小于节点  $B$ , 则其  $DFD$  值比节点  $B$  的大, 而节点  $B$  从剩余能量和距离长度两方面综合考虑最好, 即其  $DFD$  值最小, 因此节点  $B$  将赢得竞争, 发送数据包.

### 2.3 空洞解决策略

如果经过  $Max\_delay$  的等待时间, 上游节点仍未侦听到下游节点的转发, 即转发域内无节点, 此上游节点将转为空洞解决模式. 首先我们介绍空洞的特性以及对策, 然后引入相应的  $DFD$  公式.

如图 2, 当节点  $X$  要转发数据包  $P$  时(目的节点为  $D$ ), 它的转发域内无邻节点. 因此, 应当转入空洞解决模式. 图中, 节点  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  和  $A_4$  为

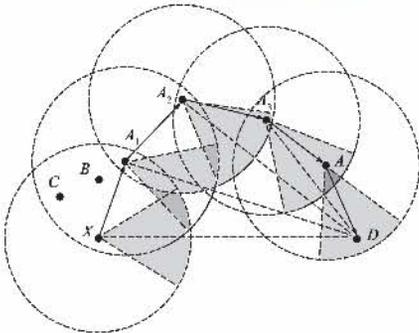


图2 空洞解决方案示意图

空洞的边界点, 实线表示它们之间的链路, 圆形区域代表某节点的通信范围, 阴影部分表示它的  $60^\circ$  转发域.  $XD$  连线将节点  $X$  的通信区域分为两侧, 避绕空洞可以从它们其中的一侧进行, 因此我们规定以节点  $X$  为轴心,  $XD$  为轴, 逆时针旋转进入的这一侧. 我们称节点  $X$  的邻节点为  $N_i$ , 显然  $\angle N_iXD$  ( $\angle N_iXD > 30^\circ$ ) 越小, 越贴近空洞边缘, 选取这样的节点作为下游节点, 对于绕过空洞更有效, 如图 2 中的节点  $A_1$ , 它在节点  $X$  的邻节点中  $\angle N_iXD$  最小, 也是空洞的边缘节点, 因此我们设计的  $DFD$  应当使它赢得竞争. 接着, 节点  $A_1$  也经过同样的过程将数据包传给节点  $A_2$ . 而节点  $A_3$  处于节点  $A_2$  的  $60^\circ$  转发域内, 所以节点  $A_2$  无需转换为空洞解决模式, 将数据包传给了  $A_3$ . 不断重复上述的过程, 数据包通过路径  $X \rightarrow A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow A_3 \rightarrow A_4 \rightarrow D$ , 绕过空洞并到达目的节点  $D$ . 由上面的设想可知, 我们的  $DFD$  值至少要包含这样的形式:

$$DFD = Max\_delay \frac{\theta - 30^\circ}{150^\circ} \quad (2)$$

这里  $\theta$  就是当前节点的  $\angle N_iXD$  值, 而  $30^\circ < \theta \leq 180^\circ$  (因为  $XD$  一侧的  $30^\circ$  转发域中无节点), 所以我们选取了  $\theta$  的最大活动范围  $150^\circ$  作为分母.

其次, 由于我们的目的是延长网络寿命, 因此应当

像式(1)那样, 把节点的剩余能量状况考虑进来. 于是我们在节点空洞模式的  $DFD$  值重新计算为:

$$DFD = Max\_delay \left[ \alpha \frac{\theta - 30^\circ}{150^\circ} + (1 - \alpha) \frac{E - e}{E} \right] \quad (3)$$

最后, 由于这  $150^\circ$  范围内的节点不能保证互相可以通信, 因此当一个邻节点赢得竞争并发出信息时, 需要节点  $X$  帮它广播一个信息来通知所有节点竞争结束, 从而处于这  $150^\circ$  转发域的其它节点取消发送并删除相应数据包. 显然, 当式(1)和式(3)中  $\alpha$  为 1 时, 我们的算法将转化为纯地理路由. 而当  $0 < \alpha \leq 1$ , 转发将会包含能量因素, 当组成空洞边缘的节点剩余能量低于周围节点时, 周围节点将会分担转发工作. 这样不但可以令数据包转发绕过空洞, 而且平衡了能量消耗.

### 2.4 算法细节描述

结合 2.2 和 2.3 节所述, 该算法过程详细描述如下:

A. 当节点  $i$  发送一个数据包时:

A.1 将包头中上游节点信息改为自己的, 将模式设置为“贪婪竞争”, 然后广播数据包.

A.2 ①如果在最大时延  $Max\_delay$  的时间内,  $i$  侦听到下游节点发送此数据包, 将缓存中的此数据包删除.

②如果在最大时延  $Max\_delay$  的时间内,  $i$  仍未侦听到下游节点发送此数据包, 将数据包头中的模式设置为“空洞解决模式”, 再次将数据包广播.

③如果在第二次发送后的  $Max\_delay$  的时间内,  $i$  侦听到下游节点发送此数据包, 立刻将此消息广播给它的邻节点, 然后删除缓存中的此数据包.

④如果第二次仍未侦听到下游节点的发送信息, 认定自己为孤立节点和数据包发送失败, 将缓存中的此数据包删除.

B. 当节点  $i$  接收到一个数据包时:

根据数据包头中的信息, 判断自己是否在相应模式下的转发域内.

B.1 如果不在转发域内, 丢弃此数据包.

B.2 如果在转发域中, 按照相应模式下的动态延迟公式, 计算自己的延迟发送时间.

①如果在自己的延迟时间内, 未侦听到有节点转发该数据包, 则按照步骤 A 来发送数据包.

②如果在自己的延迟时间之前, 侦听到有节点转发了该数据包, 取消发送计划, 删除缓存中的该数据包.

## 3 仿真结果及性能分析

### 3.1 仿真环境

为检验 EBGR 的两个策略的性能, 将如下两个算法进行仿真: 只带有贪婪竞争模式的 EBGR, 带有两个模式的 EBGR. 为简单起见, 分别称它们为 EBGR-G 和 E-

BGR-GV.同时,将它们与 BLR 和 GEAR 算法进行比较.因为 BLR 是较早提出的典型基于竞争的地理路由,而 GEAR 是比较典型的包含能量意识的有信标地理路由.

我们的仿真实验在 NS2 仿真平台上进行,网络场景中包含 100 到 300 个节点,它们的起始位置被随机分配到 2000m×2000m 的二维场景中去. MAC 层采用带有 2Mbps 带宽的 IEEE 802.11 算法.每个节点的通信半径为 250m,并且 DFD 中  $\alpha$  设定为 0.5,  $Max\_delay$  设定为 50ms.节点的起始能量值为 200J,发送功率和接收功率分别为 1W 和 0.375W.仿真过程中,共有 30 个 CBR 流产生,它们别随机分配给其中的 30 对节点.每个 CBR 数据包大小为 64 bytes.仿真时间持续 300 秒,在这段时间内,每个节点运动遵循“waypoint”模型,即当节点到达目的地时,它不做任何停留,向下一个目的点移动.为测定算法对拓扑变化的适应性,我们做出了 5 组不同速度下的仿真实验,每一组运行 100 次,最后性能的结果是它们的平均值,这五组的平均速度分别为: 5m/s, 10m/s, 15m/s, 20m/s 和 25m/s,仿真中速度变化服从正态分布.其次,为测定算法对于节点密度(平均邻节点个数)的适应性,我们还做出了 5 组不同节点密度下的仿真实验,每组进行了 100 次,它们的密度分别为: 4, 8, 12, 16, 20.最后,GEAR 的信标更新周期设置为 1s.

### 3.2 仿真结果

图 3 显示出几个算法在不同速度下的投递率.由于 BLR 和 EBGR-G 没有采取对应节点空洞的措施,因此它们的投递率相对较低.而 GEAR 是针对静态网络设计的算法,它在速度相对较大的情况下,投递率并不是很理想.由 EBGR-G 和 EBGR-GV 的投递率对比可以看出,我们的空洞解决方案是切实可行的,提高了投递效率.由图 3 还可以看出,随着节点移动速度增大,数据包的投递率下降了,这是由移动速度加快带来了链路的不稳定造成的.

图 4 对比了在几种算法下,速度对网络寿命的影响.在此需要说明的是,网络寿命指从网络初始化到第一个节点能量耗尽的这段时间.显然只考虑利用位置

信息贪婪转发的 BLR 寿命最短,这是因为上游节点每次都选取最短路径上的节点作为下游节点,使得这条路径上的节点能量消耗过快.由图 4 可知,GEAR 的能量意识发挥了作用,使得节点在选取下一跳时考虑能量因素,从而一定程度上平衡了能量消耗.但由于节点必须通过一段时间接收来自邻节点的一定数量的信标,才能判断周围节点的情况,这种机制在移动网络里并不是非常适用.相反,我们的 EBGR-GV 首先采用了无信标机制,减少了能量消耗,增加了网络寿命.其次,它在贪婪竞争和空洞解决策略上,都考虑了能量平衡的问题,因此它的网络寿命最长.

图 5 显示了不同节点密度下,几个算法的数据包投递率的比较结果.我们从中可以看出,随着节点邻居个数增多,投递率也随之上升.这是因为在转发数据包过程中,节点有更多的选择来选取下一跳节点,出现节点空洞,孤立节点或未知原因的几率变小了.在节点密度为 4 的情况下,出现节点空洞的概率比较大,因此,具有空洞解决方案的算法 EBGR-GV 和 GEAR 的投递率,比没有解决方案的算法 BLR 和 EBGR-G 高得多.随着节点密度增大,这种差距也开始减小.在以节点密度为横坐标的情况下,EBGR-GV 的投递率最高.而且这四种算法投递率的高低关系,再次证明了我们图 3 中投递率的分析.

由图 6 我们可以看出,随着节点密度的增大,网络寿命降低了.这是由于单个节点邻居增多,导致邻节点间的通信更加频繁.对于无信标算法,例如,当某节点进行转发时,有更多的节点处于转发域,即使不被选为下一跳的节点也得进行接收、保存的操作.对于有信标的算法 GEAR,随着邻节点个数增多,每个节点接收信标的次数也会大大增加.如图 6,随着节点密度增大,单纯基于位置的 BLR 算法的网络寿命的下降速度降低了,这是因为它在转发过程中的可选节点更多,可以传给离目的节点更近的邻节点.这样在传递数据包过程中,减少了总跳数,节省了网络的总能量,一定程度上提高了网络寿命.最后,在以节点密度为横坐标的情况下,EBGR-GV 的寿命仍然最高.而且这四个算法寿命的高低

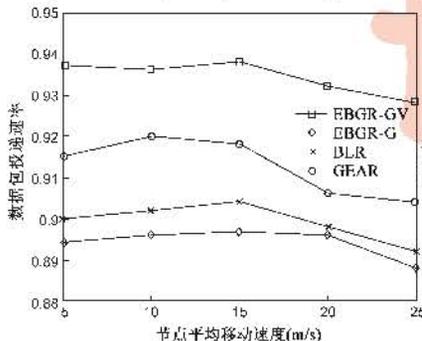


图3 不同速度下的数据包投递率 (平均邻节点个数为8)

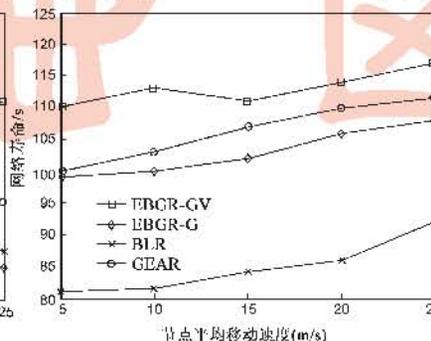


图4 不同速度下的网络寿命 (平均邻节点个数为8)

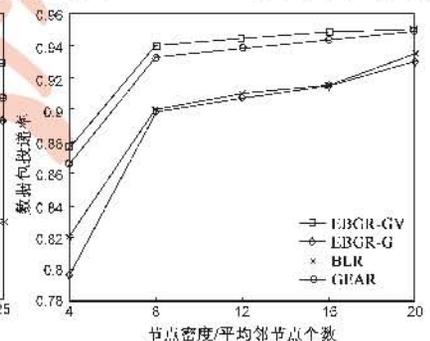


图5 不同节点密度下的数据包投递率 (节点平均速度为15m/s)

关系,再次证明了我们对图 4 中网络寿命的分析。

基于以上 4 组仿真数据和仿真分析,我们可以看出,无论是节点速度变化,还是节点密度改变,EBGR 都具有较高的投递率和网络寿命.经过对 4 组仿真数据的平均化计算,与已有的 BLR 和 GEAR 等典型地理路由算法相比,平均投递率提高 2% 到 4%;平均网络寿命提高了 10% 到 20%。

#### 4 总结

本文提出了一种具有能量意识的无信标地理路由算法 EBGR.它针对两种不同情况,做出了两种有效策略:贪婪竞争策略和空洞解决策略.在贪婪竞争策略中,上游节点广播数据包,处于其转发区域的邻节点根据 DFD 值进行转发竞争(这里 DFD 值是由位置和能量信息计算得到的),从而达到了能量平衡.当转发区域不存在节点时,节点进入空洞解决模式,此模式下的 DFD 值由角度和能量信息计算得出,不但绕过了节点空洞,还平衡了节点间的能量消耗.最后,由于两种策略都考虑了能量因素,有效提高了网络寿命。

与已有的地理路由算法相比,该算法具有以下特点:(1)已有的具有能量意识的路由算法可以提高网络寿命,但它们采用的信标机制,使得这种“提高”较为有限.而 EBGR 创新地结合了能量意识和无信标机制,更好地平衡了节点能量消耗,提高了网络寿命.(2)为无信标地理路由提出了更为有效的空洞解决方案,而且该方案也提高了网络寿命。

#### 参考文献:

- [1] 王建新,赵湘宁,辉宇.一种基于两跳邻居信息的贪婪地理路由算法[J].电子学报,2008,36(10):1903-1909.  
Wang Jianxin, Zhao Xiangning, Hui Yu. A greedy geographic routing algorithm based on 2-hop Neighbors[J]. Acta Electronic Sinica, 2008, 36(10): 1903-1909. (in Chinese)
- [2] Arad N, Shavitt Y. Minimizing recovery state in geographic ad hoc routing[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(2): 203-217.
- [3] Wang K, Xu Y L, Huang L S, Chen G L. GPS based location oriented routing protocol for MANET[J]. Chinese Journal of Electronics, 2006, 15(1): 173-178.
- [4] Kuhn F, Wattenhofer R, Zollinger A. An algorithmic approach to geographic routing in ad hoc and sensor networks[J]. IEEE/

ACM Transactions on Networking, 2008, 16(1): 51-62.

- [5] Ma X L, Sun M T, Zhao G, Liu X Q. An efficient path pruning algorithm for geographical routing in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(4): 2474-2488.
- [6] Yan Y, Ramesh G, Deborah E. Geographic and energy aware routing: a recursive data dissemination algorithm for wireless sensor networks[R]. UCLA/CSD-TR: UCLA Computer Science Department, 2001.
- [7] Zeng K, Ren K, Lou W, Moran P J. Energy aware geographic routing in lossy wireless sensor networks with environmental energy supply[A]. QShine'06 the 3rd International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks[C]. Waterloo: Academic Press, 2006. 43-57
- [8] Razzaque M A, Choong S H. Load and Energy Balanced geographic routing for sensor networks[A]. IEEE Proceedings Advanced Communication Technology[C]. Gangwon-Do: Academic Press, 2008. 1419-1422.
- [9] Heissenbüttel M, Braun T, Bernoulli T, Wälchli M. BLR: beacon-less routing algorithm for mobile ad-hoc networks[J]. Elsevier Computer Communication, 2004, 27(11): 1076-1086.
- [10] Flier H, Widmer J, Ksemann M, Mauve M, Hartenstein H. Contention-based forwarding for mobile ad hoc networks[J]. Elsevier's Ad Hoc Networks, 2003, 1(4): 351-369.
- [11] Blum B, He T, S Son, Stankovic J. IGF: a robust state-free communication protocol for sensor networks[R]. USA: CS Department, University of Virginia, 2003.
- [12] Li J, Jannotti J, Douglas S J. A scalable location service for geographic ad hoc routing[A]. ACM/IEEE Proceedings MO-BICOM[C]. New York: Academic Press, 2000. 102-114.

#### 作者简介:



王国栋 男,1984 年生于内蒙古包头,北京航空航天大学电子信息工程学院硕士生.研究方向为 MANET 和传感器网络中的路由算法。

E-mail: wgd8412@sina.com



王 钢(通信作者) 男,1973 年生于山东德州,北京航空航天大学电子信息工程学院副教授,研究方向为移动自组织网络和无线传感器。

E-mail: gwang@buaa.edu.cn

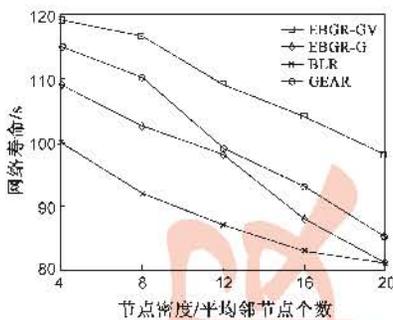


图6 不同节点密度下的网络寿命 (节点平均速度为15m/s)