

城市场景车载 Ad Hoc 网络竞争 转发关键参数分析

李元振^{1,2}, 廖建新¹, 李彤红³, 朱晓民¹, 张 磊¹

(1. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876;
2. 聊城大学计算机学院, 山东聊城 252059; 3. 马德里科技大学, 西班牙马德里 28660)

摘 要: 论文对城市场景下的基于竞争转发的车载 Ad hoc 网络路由算法进行了分析, 该分析对于确定竞争转发策略中节点定时器的值具有重要的意义, 是竞争转发路由策略的有益和重要的补充. 论文给出了保证抑制策略以一定概率执行成功的条件下, 节点定时器参数的下限值. 仿真和分析结果的对比验证了本文分析的有效性.

关键词: 车载 Ad hoc; 路由算法; 竞争转发; 定时器

中图分类号: TN915.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 05-1154-05

Analysis of Key Parameter of Contention-Based Forwarding Strategy for Vehicular Ad Hoc Networks in City Scenarios

LI Yuan-zhen^{1,2}, LIAO Jian-xin¹, LI Tong-hong³, ZHU Xiao-min¹, ZHANG Lei¹

(1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
2. School of Computer Science, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China;
3. Technical University of Madrid, Madrid 28660, Spain)

Abstract: This paper proposed an analysis of the contention-based forwarding (CBF) routing protocol for VANETs in city environments, which is very important to determine the value of the timer used in CBF. And this paper is one beneficial and important component of the routing protocol in previous paper. The lower bound of the timer was given on the condition that the suppression scheme accomplished successfully with given probability. The analysis is validated by comparing simulation and analysis results.

Key words: vehicular Ad hoc; routing algorithm; contention-based forwarding; timer

1 引言

由装备无线收发装置的车辆组成的车载 Ad hoc 网络 (VANET, vehicle ad hoc networks) 是一种特殊的自组织移动 Ad hoc 网络. 近年来, 使用车载网络进行车辆间通信的研究和应用逐渐成为一个研究热点, 例如 Fleet Net^[1] 和 CarNet^[2]. 由于车载 Ad hoc 网络具有不同于普通 Ad hoc 网络的特点^[3], 车载 Ad hoc 网络的研究和应用面临许多新的挑战. 车载 Ad hoc 网络由于车辆的高速移动以及街道障碍物阻挡等原因, 网络分割现象更加严重, 路由问题更加复杂. 在这样一个高速移动环境中维持拓扑结构信息将会导致网络负载显著增加. 另一方面通信设备通过发动机提供电力支持, 车辆的承载空间

可以确保天线的尺寸和其他额外的通信设备, 这样可以确保节点具有强大的计算能力和存储能力等. 车辆沿着既定的道路运动具有一定的规律性和可预测性, 可以对节点的运动轨迹进行预测. 全球定位服务 (GPS, global positioning system) 能够为节点提供精确定位和精准时钟信息, 利于获取自身位置信息和进行时钟同步.

文献[4]针对上述车载 Ad hoc 网络特点提出了适用于城市场景的一种基于竞争转发的路由算法. 算法总体思路是通过竞争转发策略选择合适的下一跳节点. 数据包沿着选定的岔路口序列进行路由. 利用节点计算能力强的特点, 在岔路口区域进行下一个岔路口的计算, 减少了数据包中携带完整岔路口序列信息的数据量. 针对车载网络环境网络分割现象严重问题, 利用节点的存

储能力强的特点,新算法中对暂时找不到下一跳的数据包使用“暂存转发机制”.但该文没有对竞争策略关键组成部分定时器的设置进行充分地讨论.本文将对该问题进行分析,确定定时器关键参数的设置方法,给出该参数的下限值,并通过仿真和分析对比的方法验证了本文分析和该下限的有效性.

2 城市场景竞争转发策略介绍

文献[4]提出的基于竞争转发的路由算法总体上是一个基于锚点的路由.算法根据街道的物理长度和街道上统计的车辆流量信息利用 Dijkstra 算法来确定锚点(岔路口).锚点动态确定,即每个处于岔路口区域的节点计算下一个岔路口,进行岔路口的更新.利用“暂存转发机制”来处理网络分割现象.

算法的核心是竞争策略.竞争策略需要知道当前节点的位置信息,下一岔路口(目的节点)的位置信息和前一跳节点的位置信息.

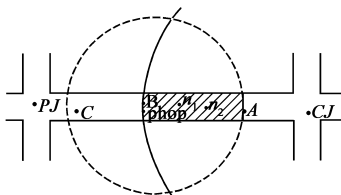


图1 岔路口区域竞争转发示意图

每个节点收到数据包后,检查自己的位置是否更靠近下一个岔路口(目的节点),若是则成为竞争候选节点,把数据包缓存到本地缓存,启动一定时器;否则,直接丢弃数据包.节点上定时器的设置是竞争转发策略的一个关键步骤.总体的想法是位置越优秀的节点定时器的值越小,位置越靠近前一跳节点的节点定时器的值越大.定时器时间到数据包被广播出去.其他竞争候选节点和前一跳节点收到该广播信息,把本地缓存中缓存的具有相同 id 的数据包删除,完成一次数据包的一跳转发,这被称为抑制策略^[5].最后一跳的处理方法是:目的节点在收到前一跳发来的广播数据包后立即发送一个 ACK 消息进行确认.完成对其他竞争节点的抑制和确保其他竞争节点删除缓存中暂存该数据包的拷贝.可以看到竞争转发路由中定时器的设置至关重要.但文献[4]中仅仅给出了设置表达式并没有进行数学分析.如图 1 所示的街道上数据包转发的场景,其定时器的设置表达式为

$$t = \tau(1 - \text{dist}(i, \text{phop})/P_{\max}) \quad (1)$$

其中 P_{\max} 为无线信号最大通信距离, dist 表示欧氏距离, τ 是一个定时器参数, phop 为前一跳节点, i 为当前节点.

3 定时器超时时长分析

3.1 网络模型和定时器时延的初步分析和确定

不考虑数据链路层的影响.即假定网络层传到下层的数据包可以马上发送出去,无缓存中的排队时延.

因为计算机的处理速度非常快,这样的假设是合理的.假定数据包大小 L ,无线信道的带宽 B ,则发送时延为

$$T_s = \frac{L}{B} \quad (2)$$

沿用前文^[4]的符号定义,无线信号传播半径 P_{\max} ,无线信号传播速度 $C = 3 \times 10^8 \text{m/s}$,则传播时延为

$$T_p = \frac{P_{\max}}{C} \quad (3)$$

当数据包大小 $L = 1000 \text{Byte}$,无线信道的带宽 $B = 1 \text{Mbps}$,无线信号传播半径 $P_{\max} = 250 \text{m}$ 时,则 $T_s = 8 \text{ms} \gg T_p = 0.83 \text{ns}$.这样网络中的主要时延应该是发送时延 T_s .后面的分析将忽略 T_p 的影响.

以当前节点 phop 广播发送数据包时记为时刻 0,则 T_s 时刻后节点 phop 辐射半径内所有节点都收到这个数据包.为了最小化端到端的时延,最远点的节点(假设一个节点刚好位于无线传输的边界上)应立即开始广播发送数据包,即最远点发送数据包的时刻为 T_s .假设有 n 个节点(不包括 phop 节点)分布在竞争区域.竞争区域为图 1 中阴影部分区域,我们把它抽象为图 2 的模型.从左往右依次对节点进行编号为 $1, 2, 3, \dots, n$.最远的节点 n 竞争成功,竞争成功后抑制其余的 $n-1$ 个节点数据包的发送.按照一般的竞争转发定时器超时值设置公式,则节点 $n, n-1, n-2, \dots, 3, 2, 1$ 的计时器超时时长依次递增.若编号为 $n-1, n$ 的两节点超时的差值大于 T_s ,则节点 n 能够成功抑制节点 $n-1$ 的发送.因为传播时间很小,所以抑制节点 $n-1$ 的同时也抑制了其他的节点.所以只需要考虑最后两个节点.

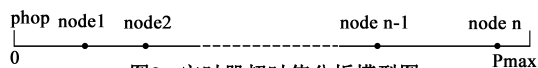


图2 定时器超时时值分析模型图

现考虑节点 n 对节点 $n-1$ 的抑制.通过上文的分析可知,节点 n 若要成功地抑制节点 $n-1$ 的发送,他们之间定时器的差值应该大于 T_s ;若小于 T_s 则节点 $n-1$ 在节点 n 发送完成之前就把数据包交付给下层.这样导致网络中出现多个数据包的副本.则节点 $n, n-1, \dots, 1$ 分别的发送数据包的时刻为 $0, T_s, \dots, (n-1)T_s$ 才可保证抑制策略的成功执行.按照竞争转发一般的设置如公式,即距离和定时器时长呈线性关系,只需要确定两个点即可确定关键参数 τ .为了确定其中的参数,假设节点理想地均匀分布在竞争区域内,设节点 n 的坐标为 P_{\max} ,节点 0 的坐标为 $\frac{P_{\max}}{n}$.这样可以得到定时器时延的表达式为

$$t = \frac{nT_s}{P_{\max}}(P_{\max} - \text{dist}) = \tau(1 - \text{dist}/P_{\max}) \quad (4)$$

$$\tau = nT_s = \frac{nL}{B} \quad (5)$$

可以看到 τ 的值和节点数, 数据包大小和链路带宽相关. 上式的得出是假定节点理想均匀分布的情况, 在实际的网络环境下可以考虑 $\tau = knT_s$ 来提高成功的概率. 我们通过粗略的分析得出了 τ 这个关键参数, 后文将通过数学分析给出更精确的结果, 并验证 $\tau = knT_s$ 设置的合理性.

3.2 定时器参数下限值分析

为了方便分析做如下定义.

定义 1 抑制策略执行成功是指节点 n 在节点 $n-1$ 及其他节点定时器超时时间到之前已成功把数据包广播出去. 即成功抑制其他节点的发送, 保证网络中不会出现数据包的副本. 反之, 则抑制策略执行不成功.

下面利用数学分析得到 τ 的精确的表达式和为了保证一定的抑制策略执行成功概率的 τ 下限值.

定理 1 在 τ 固定的情况下, 当节点 $n, n-1$ 之距离大于 $P_{\max}(1 - \frac{T_s}{\tau})$, 则抑制策略执行成功. 反之, 抑制策略执行不成功, 网络中会出现数据包的多个副本.

证明 按照式(1), 对确定的 τ , 节点 $n, n-1$ 的定时器超时值为

$$t_n = \tau(1 - \frac{\text{dist}(\text{phop}, n)}{P_{\max}}), t_{n-1} = \tau(1 - \frac{\text{dist}(\text{phop}, n-1)}{P_{\max}}),$$

则两个定时器超时时间的差值 Δt 为:

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_{n-1} - t_n \\ &= \tau \frac{\text{dist}(\text{phop}, n) - \text{dist}(\text{phop}, n-1)}{P_{\max}} \\ &= \tau \frac{\text{dist}(n, n-1)}{P_{\max}} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中, $\text{dist}(\text{phop}, n) - \text{dist}(\text{phop}, n-1) = \text{dist}(n, n-1)$ 是因为节点在同一街道上, 忽略街道的宽度. 为了保证节点 $n, n-1$ 不发生冲突, $\Delta t > T_s$, 将式(6)代入得到

$$\text{dist}(n, n-1) > P_{\max} \frac{T_s}{\tau} \quad (7)$$

证毕.

定理 2 竞争区域中有 n 个节点时, 竞争转发中抑制策略执行成功的概率:

$$P_n = (1 - \frac{T_s}{\tau})^n$$

证明 按照一般的假设, 网络中的 n 个节点同服从均匀分布且节点位置相互独立, n 个节点位置用 n 维随机变量 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 表示, 定义它们之间的距离为 $\Delta_{i-1} = X_i - X_{i-1}$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n, X_0 = 0$, 则 n 维随机变量 $\{\Delta_0, \Delta_1, \dots, \Delta_{n-1}\}$ 的联合概率密度函数^[6,7]为:

$$f_{\Delta_0, \dots, \Delta_{n-1}}(\delta_0, \dots, \delta_{n-1}) = \frac{n!}{P_{\max}^n} \quad (8)$$

其中, $\sum_{i=0}^{n-1} \delta_i \leq P_{\max}, \delta_i \geq 0, i = 0, \dots, n-1$.

对随机变量 $\delta_0, \dots, \delta_{n-2}$ 进行积分可以得到 Δ_{n-1} 的概率密度函数, 进而得到其分布函数:

$$\begin{aligned} f_{\Delta_{n-1}}(\delta_{n-1}) &= \frac{n!}{P_{\max}^n} \int_0^{P_{\max} - \delta_{n-1}} \dots \int_0^{P_{\max} - \delta_{n-1} - \dots - \delta_1} d\delta_{n-2} \dots \delta_0 \\ &= \frac{n}{P_{\max}^n} (P_{\max} - \delta_{n-1})^{n-1} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} F_{\Delta_{n-1}}(\delta_{n-1}) &= \int_0^{\delta_{n-1}} \frac{n}{P_{\max}^n} (P_{\max} - \delta_{n-1})^{n-1} d\delta_{n-1} \\ &= 1 - (1 - \frac{\delta_{n-1}}{P_{\max}})^n \end{aligned} \quad (10)$$

$\delta_{n-1} = \text{dist}(n, n-1)$, 考虑式(7)和式(10)得到抑制策略执行成功的概率:

$$P_n = 1 - F_{\Delta_{n-1}}(\frac{T_s}{\tau}) = (1 - \frac{T_s}{\tau})^n \quad (11)$$

证毕.

在节点数为 n 的情况下, 若要抑制策略执行成功概率 $P_n > P_0$, 将式(11)代入得到

$$\tau > \frac{T_s}{(1 - P_0^{1/n})} \quad (12)$$

下面对 3.1 节中得出结论进行讨论. 将式(5)代入式(11), 得抑制策略成功执行的概率

$$P_n^a = (1 - \frac{1}{n})^n < e^{-1} = 36.79\% \quad (13)$$

当 $\tau = knT_s$ 时, 代入式(11)得到抑制策略成功执行的概率

$$P_n^b = (1 - \frac{1}{kn})^n < e^{-\frac{1}{k}} \quad (14)$$

可以看到, 参数 k 提高, 抑制策略成功概率的提升不会有很大成比例的提升. 如前文 3.1 节中的设置, 当 $\tau = nT_s$, 抑制策略成功执行的概率上限值仅 36.79%, 若要抑制策略成功执行概率的上限达到 80%, 要 $k \geq 5$. 当 $k = 10$ 时, 我们计算得到成功概率下限 ($n = 1$ 时, P_n^a, P_n^b 对变量 n 都是单调增函数) 达到 90%. 这样可以看到, 理想情况下得到的 τ 并不合适, 但通过合理的设置 $\tau = knT_s$ ($k = 10$), 完全可以到达我们期望的成功概率.

前面的讨论是竞争区域有 n 个车辆分布的情况, 更一般的情况由下面的定理给出结论.

定理 3 车辆密度为 μ 时, 竞争转发路由中抑制策略执行成功的概率:

$$P = e^{-\mu P_{\max} \frac{T_s}{\tau}}$$

证明 对于车载 Ad hoc 网络, 文献[8]已经证明在一定区域间分布的车辆数为泊松分布, 车辆之间的间隔为指数分布. 那么在竞争区域中车辆数目为 n 的概率由下式给出:

$$P(X = n) = \frac{(\mu P_{\max})^n}{n!} e^{-\mu P_{\max}} \quad (15)$$

其中 $\mu = \frac{\lambda}{EV}$, μ 代表单位长度上车辆数, λ 代表车辆到达率, EV 代表车辆速度的数学期望. 根据文献[9]中定理 5.2, 可以得出: 这 n 个车辆的位置相互独立, 且均匀分布在竞争区域中. 这样利用式(11)和式(15), 得出:

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P(X=n)P_n = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\mu P_{\max})^n}{n!} e^{-\mu P_{\max}} \left(1 - \frac{T_s}{\tau}\right)^n = e^{-\mu P_{\max} \frac{T_s}{\tau}} \quad (16)$$

证毕.

若要抑制策略执行成功概率 $P > P_0$, 将式(16)代入得到 τ 的下限.

$$\tau > -\mu P_{\max} \frac{T_s}{\ln P_0} \quad (17)$$

3.3 其他情况分析

3.2 节讨论的情况是车辆在街道上数据包转发的情况(竞争转发策略详细的算法请参阅文献[4]). 图 3 描述的是 *phop* 节点的通信范围覆盖当前岔路口转发的情况. 图 4 描述的 *phop* 节点位于岔路口区域的竞争转发. 论文[4]中定时器参数 τ 在所有情况下相同的, 不同的定时器使用不同的设置表达式. 所以按照论文[4], 图 3 和图 4 描述的情况都可以直接利用由式(17)得到的 τ 的值.

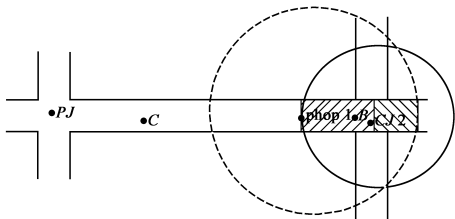


图3 街道上竞争转发:通信范围覆盖当前岔路口区域

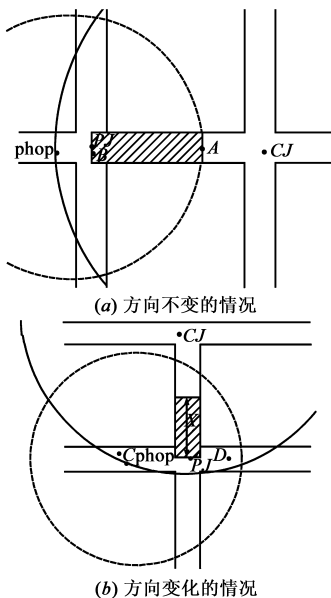


图4 岔路口区域竞争转发

另一方面, τ 的值和端到端时延密切相关. τ 的值越小, 一跳转发时延越小, 端到端时延也越小. 论文[4]中统一设置参数 τ 而没有最小化 τ 的值, 还有进一步优化的空间. 图 4 描述的情况下, 可以进一步减小 τ 的值. 把式(17)中 P_{\max} 换成相应的竞争区域的物理长度 L_{con} , 这样我们得到一个更一般的下限公式.

$$\tau > -\mu L_{con} \frac{T_s}{\ln P_0} \quad (18)$$

将图 4(a), (b) 中相应的竞争区域的长度代入式(18)可以得到两种情况下参数 τ 的值. 对图 3 可使用类似的方法来确定. 因篇幅所限, 不再赘述.

4 仿真实验与分析

为了验证上述结论的正确性, 我们对实际网络进行仿真, 并对实验统计结果与理论分析值进行比较分析. 仿真时, 节点通信半径 $P_{\max} = 250\text{m}$, 数据包大小 $L = 1000\text{Byte}$, 无线信道的带宽 $B = 1\text{Mbps}$. 每次的仿真结果取 100000 次实验的统计平均值. 实验结果中, Simul 表示仿真值, Analy 表示理论值.

图 5 在节点数不同的网络环境下比较了抑制策略执行成功概率与 τ 值之间的关系的理论分析结果与仿真结果, 验证了公式的结论. 如图 5 所示, 理论曲线的变化趋势与仿真结果相一致. 当网络节点比较稀疏时 τ 的值可以设置的比较小就能达到很高的成功率. 网络节点增多, 节点间的平均距离变小, 抑制策略执行成功的概率变小, 这和 3.1 节中的分析是相同的结论, 验证了 3.1 节中的分析. 另一方面仿真和实验结果显示 $n = 15$ 的时候, τ 设置为 1s 成功概率为 88.685%, 说明竞争策略在节点比较稠密的情况下, 设置合理的 τ 值也能工作良好.

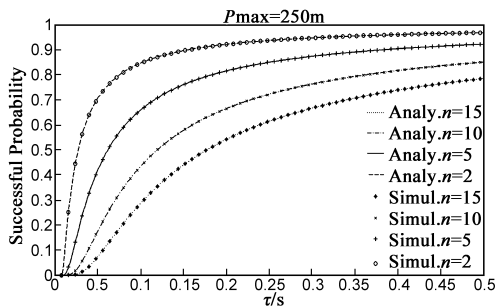
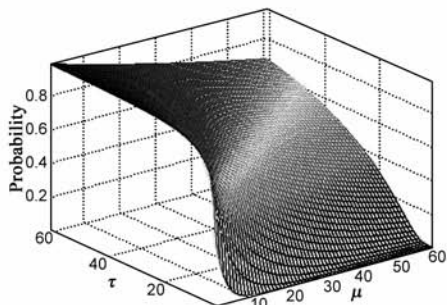


图5 抑制策略成功的概率(节点数为n)

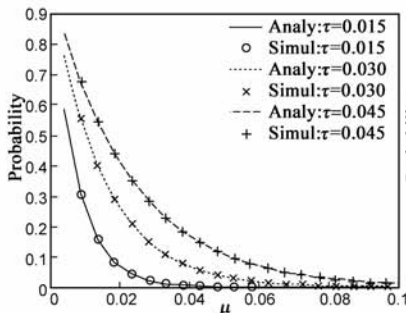
图 6 描述的是抑制策略执行成功概率 P 和车辆密度 μ 、定时器参数 τ 之间的关系图, 验证了式(16)的结果. 图 6(a) 只有分析结果, 图 6(b) 是当 τ 固定的时候, P 和车辆密度 μ 之间关系的仿真和分析结果, 图 6(c) 则是当 μ 固定的时候, P 和定时器参数 τ 之间关系的仿真和分析结果. 可以看到抑制策略执行成功的概率随着节点车辆密度 μ 的增加而减少, 随着的定时器参

数 τ 的增大而增大. μ 的含义是单位长度上的车辆数目,从图 6(b)可以看到该参数在 0.004 ~ 0.1 之间变化,也就是车辆距离是 10 ~ 250m,这代表了大部分的网络场景.从图 6(c)上可以看到,当网络场景比较稀疏的时候($\mu = 1/250, 1/150$), τ 小于 0.05 就可以达到 80% 以

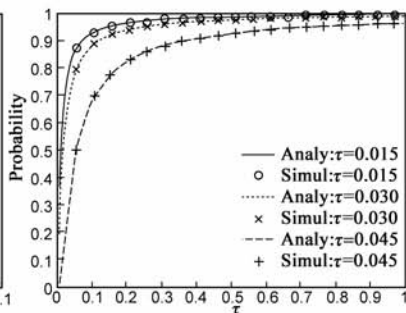
上的成功率.当车辆密度增加到 1/50 时, τ 设置 0.2 也可满足要求.仿真实验和分析的对比结果表明了本文分析的有效性,可以使用本文算法针对不同的网络密度和期望的抑制策略成功执行概率值来选择确定定时器参数 τ .



(a) P 和 μ, τ 关系的分析结果



(b) τ 固定



(c) μ 固定

图6 抑制策略执行成功概率

5 结束语

本文对竞争转发路由中的关键参数 τ 进行了分析,得出了该参数和抑制策略成功执行的概率、节点密度、传播时延、发送时延的关系.该文的分析是文献[4]的有益和重要的补充.仿真和分析的结果对比验证了本文分析的有效性.

参考文献

[1] Daimler Chrysler A G, et al. University of Hannover and Mannheim, et al. FleetNet-Internet on the Road [EB/OL]. <http://www.et2.tu-harburg.de/fleetnet>, 2008-04-12.

[2] R Morris, J Jannotti, F Kaashoek, et al. CarNet: A scalable ad hoc wireless network system[A]. Proceedings of the 9th Workshop on ACM SIGOPS European workshop: beyond the PC: new challenges for the operating system[C]. New York, NY, USA: ACM, 2000. 61 - 65.

[3] 常促宇, 向勇, 史美林. 车载自组网的现状与发展[J]. 通信学报, 2007, 28(11): 116 - 126.
Chang Cu-yu, Xiang Yong, Shi Mei-lin. Development and status of vehicular ad hoc networks[J]. Journal of Communications, 2007, 28(11): 116 - 126. (in Chinese)

[4] 李元振, 廖建新, 李彤红, 等. 一种基于竞争转发的城市市场景车载 Ad Hoc 网络路由算法[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2639 - 2645.
Li Yuan-Zhen, Liao Jian-Xin, Li Tong-Hong, et al. A contention-based forwarding routing protocol for vehicular Ad hoc networks in city scenarios[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2639 - 2645. (in Chinese)

[5] F H, Widmer J, K M, et al. Contention-based forwarding for mobile ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2003, 1(4): 351 - 369.

[6] Ghasemi A, Nader-Esfahani S. Exact probability of connectivity in one-dimensional ad hoc wireless networks[J]. IEEE Commun Lett, 2006, 10(4): 251 - 253.

[7] 田野, 盛敏, 李建东, 等. 一维 Ad Hoc 网络二连通性研究[J]. 电子学报. 2008, 36(04): 715 - 719.
Tian Ye, Sheng Min, Li Jian-dong, et al. On biconnectivity for one-dimensional wireless Ad hoc networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(04): 715 - 719. (in Chinese)

[8] Yousefi S, Altman E, El-Azouzi R, et al. Analytical model for connectivity in vehicular Ad hoc networks[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2008, 57(6): 3341 - 3356. (in Chinese)

[9] Ross S M. Introduction to Probability Models[M]. New York: Academic, 2000.

作者简介



李元振 男, 博士, 1979 年 12 月出生于山东, 从事宽带通信网与下一代网络技术方面的有关研究.
E-mail: liyuanzhen@163.com



廖建新 男, 1965 年出生于四川, 分别于 1985、1991、1996 年获电子科技大学学士、硕士、博士学位, 1996 年至 1998 年在北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室从事博士后研究, 现为北京邮电大学教授, 博士生导师. 在国内外核心期刊及会议上已发表论文数百篇. 主要研究方向是通信软件、增值业务提供技术.
E-mail: liaojx@bupt.edu.cn