

一种基于 802.11 DCF Basic Access 机制的移动自组网动态速率控制模型

夏文洁^{*①} 李千目^① 孙晋厚^② 刘凤玉^①

^①(南京理工大学计算机学院 南京 210094)

^②(二炮装备研究院 北京 100085)

摘要: 802.11 移动自组网由于其固有的动态拓扑、分布式协作等特点,路由协议普遍采用多播方式以提高无线链接的传输效率,由此带来的拥塞使得移动自组网中多播拥塞控制至关重要。针对移动自组网中节点固有的随机特性,基于 802.11 DCF 协议,该文提出一种精确描述节点数据产生、排队、发送动态过程的拟生灭模型,并通过矩阵几何方法对其进行稳态分析,得出节点速率阈值方程组,并用 OPNET 进行了仿真实验,仿真结果与理论值拟合较好,为移动自组网中的拥塞控制提供了一个量化的指标。

关键词: 移动自组网; 802.11 DCF; 拟生灭模型; 拥塞控制; 数据速率控制

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)11-2650-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01623

A Data-rate Control Model Based on 802.11 DCF Basic Access Mechanisms in Mobile Ad hoc Networks

Xia Wen-jie^① Li Qian-mu^① Sun Jin-hou^② Liu Feng-yu^①

^①(Department of Computer Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

^②(The Second Artillery Equipment Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: Mobile Ad hoc NETWORKS (MANET) has inherent characteristic of dynamic topology, distributed collaboration, thus on-demand routing protocols employs multicast mechanism to improve transmission efficiency. However multicast is apt to cause network congestion which makes congestion condition in MANET critical. On the basis of the stochastic characteristics of MANET node and 802.11 DCF basic access mechanisms, the paper proposes an infinite state quasi-birth-and-death model to accurately describe the packet generating, queuing, sending process of individual node. Stationary analysis is performed with matrix-geometric method and the set of equations for packet arrival rate threshold is obtained. The effectiveness of this model is demonstrated by the simulations in OPNET. The contribution of this paper is to provide a mathematical tool for congestion control research.

Key words: Mobile Ad hoc NETWORKS (MANET); 802.11 DCF; Quasi-birth-and-death; Congestion control; Data-rate control

1 引言

移动自组网(MANET)由于其拓扑结构高度动态变化的特性,通常采用多播协议进行路由,大多数多播路由协议采用的是洪泛广播,典型的有主动式路由协议如 DSDV, WRP, FSR 等,被动式路由协议如 DSR, AODV 等^[1]。洪泛式路由协议由于其

简单性,易于实现,不需要维护网络的拓扑结构和路由计算,因而非常适合于拓扑变化剧烈的移动自组网,但广播所带来的拥塞^[2]使得这些路由协议的应用仅局限于中小规模网络,因此定量地研究广播协议对网络拥塞的影响一方面可以为拥塞控制提供依据,另一方面也可为网络路由协议的选择提供参考。

MANET 网络中拥塞检测通常需要考虑多种度量(例如信道利用率,MAC 负荷,缓冲延迟等)^[3]。为了解决路由发现过程中的拥塞问题,文献[4,5]采用动态拥塞预测方法,通过度量计算来进行拥塞检测,进而提出拥塞自适应的动态路由协议;文献[6,7]

2012-12-14 收到, 2013-05-27 改回

国家自然科学基金(60903027, 6127419), 中国博士后基金(2012M521089), 江苏博士后资助计划(1201044C)和江苏省自然科学基金(BK2011370)资助课题

*通信作者: 夏文洁 jsnjxwj@yahoo.com.cn

在拥塞检测的基础上进行速率控制以避免网络饱和；文献[8]则基于博弈理论提出一种新的跨层拥塞控制方法。由于洪泛广播容易引起广播风暴，许多学者致力于广播协议的研究和改进^[9,10]，但目前大部分的理论分析研究缺乏理论基础，相应协议很难适应高动态变化网络的基本特征和应用需求^[11]。文献[12]通过实验表明，采用广播方式进行数据传输时，上层应用程序设计应充分考虑 MAC 层的拥塞状况，本文将此作为研究点，考虑包的转发，退避算法，最大重试次数的因素，引入拟生灭模型，对数据发送过程的冲突退让及重试过程进行精确建模，研究了在理想信道下，MANET 网络采用广播进行数据传输时，数据到达率及最大重试次数对网络拥塞的影响，导出了为避免拥塞节点数据到达率的阈值，并利用 OPNET 平台^[13]对模型进行了验证。

2 网络模型

2.1 节点数据处理模型

图 1 描述了移动节点内部数据包处理流程，节点网络层接收到的数据包有两个来源：自身产生的数据包和需要转发的数据包。节点自身产生的数据包由传输层及以上的应用程序产生，向下传递至网络层，并进入网络层与 MAC 层之间的缓冲队列等待发送。在典型的移动自组网络中，除了自身产生的数据包外，节点的网络层还会收到大量来自邻居节点的需要转发的数据包，节点首先检测并丢弃重复的数据包，对于非重复的数据包，若目的节点是自己，数据包将被直接传递至传输层及以上，反之数据包将会进入缓冲队列等待转发。

2.2 拟生灭模型

为简化模型，作如下假设：

假设 1 节点均匀分布在给定区域内，移动模型为 Random Waypoint Mobility^[14]。

假设 2 节点的数据产生服从泊松过程，参数为 λ_0 。数据包的长度固定为 L ，并且 $L < L_{th}$ ， L_{th} 是 RTS 门限^[15]dot11RTSThreshold。同时 L 小于分包阈值 aFragmentationThreshold，以确保数据包在 MAC 层不会发生分包及重组的过程。

假设 3 缓冲队列无限长。为了研究数据包的到达率和最大重试次数对网络拥塞的影响，假设节点缓冲区无限大，因此来自于网络层的数据包只有在重试次数超过限制时才会被丢弃。在这种假设下

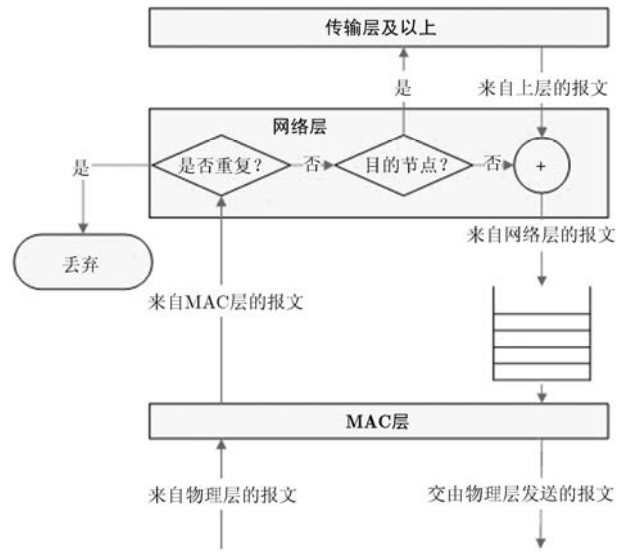


图 1 节点数据处理流程

得出的数据到达率的阈值应该小于缓冲区为有限的情况下的值。

假设 4 MAC 层接入采用 Basic Access 的 DCF 机制^[15]。使用 Basic Access 接入时，数据包的最大重试次数为 dot11ShortRetryLimit。

假设 5 信道是理想的。

假设 6 各节点随机选定数据发送目标。

假设 7 网络范围为长为 a ，宽为 b 的矩形区域，信号覆盖半径为 R 。

在 CSMA/CA 协议^[15]中，节点在各时隙的开始尝试发送数据包，由于假设 5 信道是理想的，因此数据包发送成功与否在时隙的开始即可得知。在离散时间轴上，令 S^i 表示数据包的发送次数的状态集， K_{max} 表示发送次数上限(发送次数超过上限时数据包将被丢弃)，根据假设 4， $K_{max} = \text{dot11ShortRetryLimit}$ ，令 k 表示数据发送的重试次数(当 $k < K_{max}$ 时，节点将尝试发送)，于是 $S^i = \{1, 2, \dots, K_{max}\}$ 。令 $N(t)$ 表示 t 时刻缓冲队列中数据包的个数， $J(t)$ 表示发送中的数据包的重试次数，则 2 维状态集 $S = \{N(t), J(t)\}$ 具有状态集 $\Omega = \{(i, j), i \in [0, \infty), j \in [1, K_{max}]\}$ ，其中 $i \in Z, j \in Z, Z$ 为整数集， S_{ij} 表示其中元素。在图 1 中，发送队列中数据有两个来源：自身产生的数据和需要转发的数据(目的节点不是自己)，进一步，需要转发的数据包也分为两部分，一部分是由邻居节点产生的并且目的节点不是自己的数据包，另一部分是由信号覆盖范围外其它节点产生并且目的节点不是自己的数据包。令 λ

表示 MAC 层上的数据接收率, 根据假设 2 和假设 6:

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_0 + (1 - P_c) \\ &\cdot \left(\bar{N}_b \cdot \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{n} \right) + (n - \bar{N}_b) \cdot \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{\bar{N}_b}{n} \right) \right) \\ &= \frac{n + (1 - P_c) \cdot (n^2 + \bar{N}_b^2 - n\bar{N}_b - \bar{N}_b)}{n} \cdot \lambda_0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 \bar{N}_b 为节点的平均邻居节点个数, 根据假设 1 和假设 7, $\bar{N}_b = \pi R^2 \cdot (n/(ab)) - 1$ 。令 P_{tr} 表示一个时隙内数据成功发送概率, P_c 表示冲突概率。由假设 5, $P_{tr} = 1 - P_c$ 。结合假设 5, 由文献[16], P_c 可由式(2)计算得出。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= 2(1 - 2P_c)q / \left\{ q[(1 - 2P_c)(CW_{\min} + 1) + P_c CW_{\min}] \right. \\ &\quad \left. \cdot (1 - (2P_c)^m) + 2(1 - q)(1 - P_c)(1 - 2P_c) \right\} \\ P_c &= 1 - (1 - \tau)^{\bar{N}_b - 1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 τ 表示发送数据的概率(发送时隙为随机选定), 并且通常 $\tau \neq P_{tr}$ 。 m 是最大竞争窗口的阶次, 例如若 $CW_{\min} = 7, CW_{\max} = 255$, 则 $m = 5$ 。令 q 表示队列中尚有数据包的概率, 有

$$q = 1 - P(X = 0) = 1 - e^{-\lambda E[S_{ts}]} \quad (3)$$

平均时隙长度 $E[S_{ts}]$ 由式(4)决定:

$$E[S_{ts}] = (1 - P_t)\sigma + P_t P_c T_c + P_t (1 - P_c) T_s \quad (4)$$

在一个时隙内, $P_t = 1 - (1 - \tau)^{\bar{N}_b}$ 表示至少有一个数据正在传输的概率(考虑到多跳网络中一跳或两跳相邻的邻居节点会相互竞争信道, 并由假设 1 和假设 7, $\bar{N}_b = 4\pi R^2 \cdot (n/(ab)) - 1$ 为平均两跳邻居节点个数), σ 为空闲时长, T_c 为平均冲突时间长度, T_s 为平均成功发送时间长度, 并且有

$$\left. \begin{aligned} T_c &= (H + L)/W + ACK_{\text{timeout}} \\ T_s &= (H + L)/W + T_{\text{SIFS}} \\ &\quad + \tau_p + T_{\text{ACK}} + T_{\text{DIFS}} + \tau_p \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 τ_p 为传输时延, H 为 MAC 层和 PHY 层数据头长度总和, W 为 MAC 层数据传输速率。

于是有数据发送重试次数 k 的状态转移如图 2 所示。

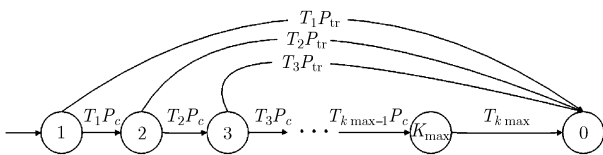


图 2 重试状态转移图

0 表示吸收态(数据发送成功或者丢弃), $T_i, \{i = 1, 2, \dots, K_{\max}\}$ 为状态 i 的逗留时间, i 为当前的重试次数。考虑状态 i 的逗留时间, 即退避时长应包括: (1)退避窗口的平均大小; (2)退避过程中因检测到信道正忙而导致的休眠时间; (3)数据传输时间。

于是第 i 次数据发送的平均逗留时间由式(6)决定。

$$\begin{aligned} T_i &= E[T_i^b] + \sum_{k=0}^{\lfloor E[T_i^b]/T^{\text{eff}} \rfloor} T^{\text{eff}} P_{tr} P_c^{k-1} + T^{\text{eff}} \\ &= E[T_i^b] + T^{\text{eff}} \left[\sum_{k=0}^{\lfloor E[T_i^b]/T^{\text{eff}} \rfloor} P_{tr} P_c^{k-1} + 1 \right] \end{aligned} \quad (6)$$

T_i^b, T^{eff} 分别表示退让时间和传输时间。

显然 $E[T_i^b] = CW_i \cdot \sigma / 2$, $T^{\text{eff}} = L/W + T_{\text{DIFS}}$, 于是有平均服务时间

$$\begin{aligned} T_i &= CW_i \cdot \sigma / 2 + (L/W + T_{\text{DIFS}}) \\ &\cdot \left[\sum_{k=1}^{\lfloor CW_i \cdot \sigma / 2T^{\text{eff}} \rfloor} P_{tr} P_c^{k-1} + 1 \right] \end{aligned} \quad (7)$$

CW_i 表示第 i 次重试的退让窗口的大小, 由式(8)决定

$$CW_i = \begin{cases} 2^{i-1} \cdot (CW_{\min} + 1) - 1, & 1 \leq i \leq m \\ 2^m \cdot (CW_{\min} + 1) - 1, & m < i \leq K_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

根据假设 2 和假设 3, 可得 $S = \{N(t), J(t)\}$ 的状态转移如图 3 所示。

在图 3 中, 状态的转移只发生在相邻的状态之间, 符合拟生灭过程的定义(Quasi-birth-and-death)^[17], 其状态空间为

$$\Omega = \{0\} \cup \{(i, j), i \geq 1, 1 \leq j \leq K_{\max}\} \quad (9)$$

式中 i, j 均为整数, 0 为空系统。状态 (i, j) 表示队列中有 i 个数据包, $i - 1$ 个数据包处于等待状态, 正在发送的数据包正进行第 j 次尝试。其生成元形式如式(10):

$$Q = \begin{bmatrix} L_0 & F_0 & & & \\ B_1 & L_1 & F_1 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & B_k & L_k & F_k \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.3 模型分析

设 $H = B_k + L_k + F_k, k \geq 2$, 则

定义阈值方程组

$$\left. \begin{aligned} & \frac{n+(1-P_c)(n^2+\bar{N}_b^2-n\bar{N}_b-\bar{N}_b)}{n} \lambda_c - \frac{K_{\max}}{\sum_{k=1}^{K_{\max}} CW_k \cdot \sigma / 2 + (L/W + T_{DIFS}) \left[\sum_{n=1}^{n=\lfloor \frac{CW_k \cdot \sigma}{T^{\text{eff}}} \rfloor} P_{\text{tr}} P_c^{n-1} + 1 \right]} (1-P_c) = 0 \\ & \tau = 2(1-2P_c) \left(1 - e^{-\frac{n+(1-P_c)(n^2+\bar{N}_b^2-n\bar{N}_b-\bar{N}_b)}{n} \lambda_c \cdot E[S_{ts}]} \right) \Bigg/ \left(\left(1 - e^{-\frac{n+(1-P_c)(n^2+\bar{N}_b^2-n\bar{N}_b-\bar{N}_b)}{n} \lambda_c \cdot E[S_{ts}]} \right) \left[(1-2P_c)(CW_{\min} + 1) \right] \right. \\ & \quad \left. + P_c CW_{\min} (1 - (2P_c)^m) \right) + 2e^{-\frac{n+(1-P_c)(n^2+\bar{N}_b^2-n\bar{N}_b-\bar{N}_b)}{n} \lambda_c \cdot E[S_{ts}]} (1-P_c) (1-2P_c) \\ & P_c = 1 - (1-\tau)^{\pi R^2 \frac{n}{ab} - 1} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

解之可得阈值 λ_c 。

3 参数估计

注意到式(17)是在假设节点总数已知, 并且网络区域为矩形区域的情况下得出的, 在实际的应用中, 节点总数的估计可采用文献[18]所提出的精度可控的基于概率的节点总数估算方法, 而邻居节点个数的估计可采用文献[19]所提出的高扩展性, 网络开销小的基于组测试的邻居发现算法(在该算法基础上, 进一步通过邻居节点之间简单的信息交换即可估算出两跳邻居节点个数)。

4 实验与数值分析

4.1 实验参数与环境

本文研究的对象为 802.11b, 物理层采用直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum)工作方式, 传输速率为 1 Mbit/s, 所需要的其它网络参数如表 1。数值计算及网络实验环境参数如表 2 所示。

表 1 802.11 参数

MAC 报头长度	24 byte	T_{DIFS}	50 μ s
物理层报头长度	16 byte	ACK 超时	300 μ s
ACK 长度	14 byte	CW_{\min}	31
传输时延 τ_p	1 μ s	CW_{\max}	1023
时隙长度 (aSlotTime)	20 μ s	MAC 层传输 速率	1 Mb/s
T_{SIFS}	10 μ s		

表 2 网络参数

信号覆盖半径	50	最大重试次数	7
区域大小	500 m \times 500 m	RTS 门限	2048 byte
模拟时间	3 h	数据包长度 L	1024 byte

4.2 数据到达率、最大重试次数对 $f(\lambda_0)$ 的影响

在上面的分析中, 基于一个事实是 $K_{\max} > m$, 即最大重试次数大于最大竞争窗口的阶次, 因此本文只考虑 $K_{\max} > 5$ 。为了观察节点个数对平稳函数 $f(\lambda_0)$ 的影响, 分别给出 $n = 50$, $n = 70$, $n = 90$ 的曲线如图 4~图 6, 其中横坐标为数据到达率, 即每秒到达的数据包个数, 单位是 pkt/s(pkt 为 packet 的缩写), 纵坐标为平稳函数 $f(\lambda_0)$ 的值。图中标出了令 $f(\lambda_0) = 0$ 的阈值。当 $n = 50$ 时, 节点的数据到达率阈值在 10.6 pkt/s 左右, $n = 70$ 时, 数据到达率阈值约为 8.9 pkt/s 左右, $n = 90$ 时, 数据到达率阈值约为 6.1 pkt/s。

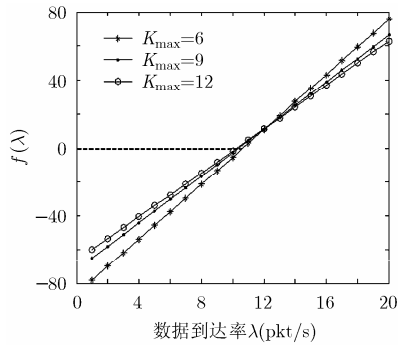
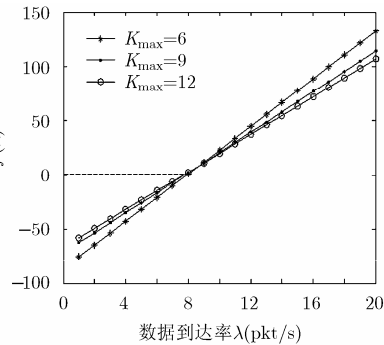
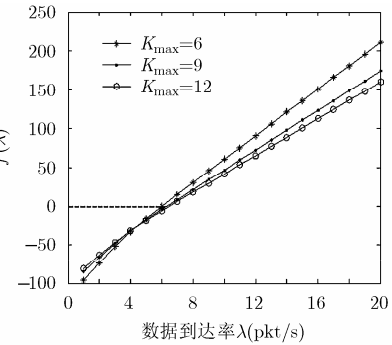
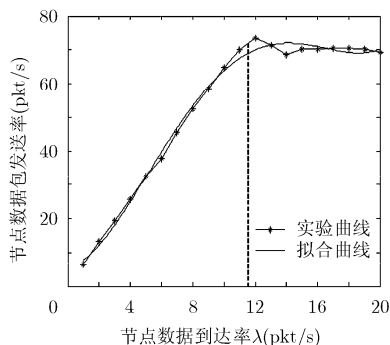
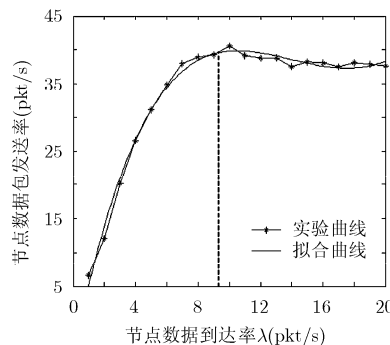
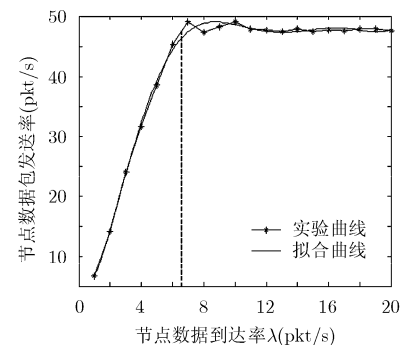
4.3 网络仿真

本文用 OPNET 验证上述理论结果。根据上述研究, 需要观察的是节点的数据包的发送率, 即 MAC 对网络层的服务率。实验中参数依照表 1 和表 2 进行设定, 使用自定义 MANET 节点, 移动模型为 Random Waypoint Mobility, 最大重试次数为 7, 分别在 $n = 50$, $n = 70$, $n = 90$ 的情况下进行了实验。数据包的产生时间为实验开始后 100 s, 取不同的产生速率分别实验, 并对结果数据实施了拟合, 得到了 3 种节点数据发送率(node data traffic sent rate)与数据到达率(packet arrival rate)关系实验结果如图 7~图 9 所示, 其中横坐标为数据到达率(pkt/s), 纵坐标为数据发送率(pkt/s)。

对实验结果进行误差分析, 得到 3 种节点数误差如表 3 所示。

表 3 阈值误差

节点数	理论阈值	仿真阈值	误差率(%)
50	10.6	≈ 11.5	7.8
70	8.9	≈ 9.3	4.3
90	6.1	≈ 6.5	6.2

图 4 平稳函数($n=50$)图 5 平稳函数($n=70$)图 6 平稳函数($n=90$)图 7 数据发送率($n=50$)图 8 数据发送率($n=70$)图 9 数据发送率($n=90$)

由假设 3, 理论阈值应小于实验阈值, 实验阈值与理论阈值误差在 5%左右(图中标出了理论值)。图 7~图 9 表明当数据到达率小于阈值时, 数据发送率随着到达率的增大而增大, 但当数据到达率大于阈值时, 节点的数据发送率将达到一个最大值后开始下降并保持稳定(这个最大值即节点的吞吐量), 此时由于拥塞导致大量数据包处于缓冲队列中, 整个网络已经达到饱和状态。同时图 7~图 9 表明, 数据到达率的阈值随着网络节点数目的增加而下降, 这是由多播传输带来的必然结果, 对于 MANET 网络层中采用多播的应用例如按需路由算法, 此阈值即为允许的最大数据速率, 算法设计及实现时应避免数据到达率大于阈值从而避免网络拥塞。此阈值一方面可用于 MANET 网络拥塞控制过程中节点速率的控制, 同时还可用于验证特定的广播路由协议算法能否在特定的网络规模下正常运行。

5 结论

基于 802.11 DCF Basic Access 机制, 本文建立了 MANET 网络节点数据发送的拟生灭模型, 并运用矩阵几何方法进行平稳分析得出阈值方程组, 研究了在多播方式下 MANET 网络如何通过控制速率来避免拥塞。实验结果表明, 该模型可以精确描述节点数据发送的动态过程, 为 MANET 中如何通

过数据速率控制来避免网络拥塞提供了一个量化的指标, 另一方面也为特定网络规模下路由协议的选择提供了一种参考。

参考文献

- [1] Justin L, Hai Liu, and Ivan S. Handbook of Wireless Ad hoc and Sensor Networks[M]. London: Springer-Verlag, 2008: 121-150.
- [2] Senthil Kumaran T and Sankaranarayanan V. Early congestion detection and optimal control routing in MANET[J]. *European Journal of Scientific Research*, 2011, 63(1): 15-31.
- [3] Srinivas K and Chari A A. ECDC: energy efficient cross layered congestion detection and control routing protocol[J]. *International Journal of Soft Computing and Engineering*, 2012, 2(2): 2231-2307.
- [4] 蒋道霞, 潘守伟, 徐佳, 等. 一种用于移动 Ad hoc 网络的拥塞适应路由协议[J]. *南京航空航天大学学报*, 2010, 42(1): 77-83.
- [5] Jiang Dao-xia, Pan Shou-wei, Xu Jia, et al. Congestion adaptive protocol in mobile Ad hoc networks[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2010, 42(1): 77-83.
- [6] Senthil Kumaran T and Sankaranarayanan V. Congestion free routing in Ad hoc networks[J]. *Journal of Computer Science*, 2012, 8(6): 971-977.

- [6] Soundararajan S and Bhuvaneshwaran R S. Multipath rate based congestion control for mobile Ad hoc networks[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2012, 55(1): 42-47.
- [7] Saravanan K and Ravichandran D T. Data rate control algorithm for MAC protocol in 802.11 multi hop Ad hoc networks[J]. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2012, 3(5): 1-8.
- [8] 邵飞, 伍春, 汪李峰. 基于多 Agent 强化学习的 Ad hoc 网络跨层拥塞控制策略[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(6): 1520-1524.
- Shao Fei, Wu Chun, and Wang Li-feng. Research on cross-layer congestion control strategy based on multi-agent reinforcement learning in Ad hoc network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(6): 1520-1524.
- [9] Woon Wilson and Yeung Kwan L. Self-pruning broadcasting for mobile Ad hoc networks[C]. Global Telecommunications Conference, Hawaii, 2009: 1-6.
- [10] Lichtblau Björn and Redlich Jens-Peter P. Network-wide broadcasts for wireless mesh networks with regard to reliability[C]. IEEE 19th Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux, Eindhoven, 2012: 1-6.
- [11] 李丽君, 刘鸿飞, 杨祖元, 等. 车用自组网信息广播[J]. *软件学报*, 2010, 21(7): 1620-1634.
- Li Li-jun, Liu Hong-fei, Yang Zu-yuan, *et al.*. Broadcasting methods in vehicular Ad hoc networks[J]. *Journal of Software*, 2010, 21(7): 1620-1634.
- [12] Gaba A, Voulgaris S, and Van Steen M. Towards congestion-aware all-to-all information dissemination in mobile ad-hoc networks[C]. IEEE GLOBECOM Workshops, Florida, 2010: 1690-1695.
- [13] 胡静. 基于 OPNET 的无线传感器网络仿真[J]. *电气电子教学学报*, 2006, 28(6): 73-94.
- Hu Jing. Simulation of wireless sensor networks based on OPNET[J]. *Journal of Electrical & Electronic Engineering Education*, 2006, 28(6): 73-94.
- [14] Bettstetter C, Resta G, and Santi P. The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless Ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2003, 2(1): 25-39.
- [15] IEEE 802.11-1999. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification[S]. 1999.
- [16] Laddomada D F, Mesiti M, *et al.*. Unsaturated throughput analysis of IEEE 802.11 in presence of non ideal transmission channel and capture effects[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(4): 1276-1286.
- [17] Neuts M F. Matrix-Geometric Solutions in Stochastic Models[M]. Baltimore: The John Hopkins University Press, 1999: 1-200.
- [18] Chen Shi-ping. Estimating the number of nodes in a mobile wireless network[C]. Global Telecommunications Conference, Miami, 2010: 1-5.
- [19] Luo Jun and Guo Dong-ning. Neighbor discovery in wireless Ad hoc networks based on group testing[C]. The 46th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Monticello, 2008: 791-797.
- 夏文洁: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为 Ad hoc 网络.
- 李千目: 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 研究方向为信息安全、智能决策.
- 孙晋厚: 男, 1982 年生, 硕士, 工程师, 研究方向为自动控制、导航控制、无线通讯.
- 刘凤玉: 女, 1943 年生, 教授, 研究方向为智能决策、性能保持和自主计算.