

基于拟生灭过程的多跳 Ad hoc 网络洪泛方式下 拥塞控制及饱和条件研究

夏文洁¹ 李千目¹ 刘凤玉¹ 孙晋厚²

(南京理工大学计算机学院 南京 210094)¹ (二炮装备研究院 北京 100085)²

摘 要 802.11 Ad hoc 网络中拥塞控制是保证网络稳定性的重要因素。拥塞发生时,通常的做法是控制流量,而研究网络何时出现拥塞则是目前的首先任务。针对多跳 Ad hoc 网络,对单个节点的数据发送过程,考虑包的最大重传次数、数据包的缓冲队列,提出一种新的基于 802.11 MAC 接入协议 DCF Basic Access 机制的无限状态拟生灭过程模型。研究了在洪泛方式下为避免网络到达饱和状态,节点 MAC 层上数据包的到达率应满足的条件。指出在 DCF 协议下到达率对网络状态的影响。与现有文献的区别是,从网络层的角度进行研究,提出了一种新的更精确地描述数据发送过程的模型。给出了多跳 Ad hoc 网络中稳定性与数据到达率的数学关系式,为多跳 Ad hoc 网络的拥塞控制提供了一个重要的参考。

关键词 拟生灭模型,802.11 DCF,Ad hoc,数据到达率,洪泛,拥塞

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Congestion Control and Saturation Condition in Multi-hop Ad hoc Based on Quasi-birth-and-death Model

XIA Wen-jie¹ LI Qian-mu¹ LIU Feng-yu¹ SUN Jin-hou²

(Dept. of Computer Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)¹

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

Abstract Congestion control is an important factor for the performance of IEEE 802.11 in Ad hoc wireless network. When congestion occurs, the packet rate is controlled, and researching what time congestion exists is a primary task. This paper performed researches on multi-hop Ad hoc network by modeling the packet sending process of individual node. Considering packet maximum retry time and packet buffer queue, and on the basis of 802.11 DCF basic access mechanisms, the paper proposed an infinite state quasi-birth-and-death model. By solving the model, the research on how to prevent saturated network under flooding mechanism was performed and corresponding formula which involves the packet arrival rate on MAC layer was obtained. The impact of packet arrival rate on stability was pointed out. This is fundamentally different from earlier work, which usually focuses on the DCF mechanisms itself, while we from the network layer view proposed a new model which accurately describes the actual packet transmission process and formularizes the mathematical relationship between the stability and packet arrival rate, which provides a mathematical tool for congestion control research.

Keywords Quasi-birth-and-death, 802.11 DCF, Ad hoc, Packet arrival rate, Flooding, Congestion

1 引言

Ad hoc 网络是由一组静止或者移动的节点组成的自主网络,其采用分布式管理。网络中所有的节点都具有路由功能,负责发现和维护到其它节点的路由,并向邻居节点发射或者转发分组。因此 Ad hoc 通常是一种多跳网络,其路由协议的研究是一个热点^[1-3]。此外,由于其 MAC 层普遍采用 IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function) 协议^[4],利用带有二进制指数退避算法的 CSMA/CA 来解决无线信号传输过程中的冲突,因而 Ad hoc 网络的数据传输的拥塞控制及性能分析是一个重要的研究课题^[5,6]。而根据 OSI 的分层模型^[7],MAC 层对上面的网络层提供服务,上层业务的分组发送是否成功取决于 MAC 上的分组发送,因此 MAC

层上的拥塞控制对路由协议的研究具有重要作用。研究网络在洪泛方式下避免到达饱和状态的条件是本文的出发点。

由于 MAC 层接入性能的重要意义,国内外有许多学者致力于这方面的研究。Bianchi 在文献[8]中在网络处于饱和状态下针对 802.11 DCF 协议中的退让机制建立二维马尔可夫模型,对系统的吞吐量、平均延时进行了分析,其模型基于两点假设:(1)冲突概率为常数;(2)网络处于饱和状态,即每个节点在任意时刻都有数据包要发送。在此基础上,大量文献进行了扩展及改进。文献[9]将 Bianchi 的模型扩展到多跳网络,分析了带 QoS 的 802.11e 的接入机制;文献[10]则研究了带信道错误的二维马尔可夫模型;文献[11-13]考虑了在信道处于非饱和状态下,引入节点在任意时刻是否有数据包要发送的概率,使模型更加贴近实际;文献[14]分析了非饱和的

到稿日期:2011-05-28 返修日期:2011-07-31 本文受国家自然科学基金(60903027)资助。

夏文洁(1983-),男,博士生,主要研究方向为 Ad hoc 网络,E-mail:jsnjxwj@yahoo.com.cn。

多跳网络;文献[15]提出了一种基于定长时隙的多跳 Ad hoc 网络 DCF 协议马尔可夫链模型。

上述文献都是针对 DCF 机制本身的概率来分析的,即分析在退让过程中检测到信道正忙的概率,进而通过概率演算来得到网络吞吐量、包延时间和出错率的表达式,并没有考虑节点的缓冲区长度因素。事实上,由于每个节点都有一个发送队列,数据的发送过程是一个排队系统,因此一个数据包的发送过程并不仅仅包括信道竞争、冲突退避和数据传输,还应包括在缓冲队列中的等待时间。文献[16,17]利用排队论,分别采用 $M/M/1$ 、 $M/G/1$ 对 DCF 协议进行建模。由于都考虑了节点缓冲区的因素,因而模型与实际更加贴近。文献[19]在此基础上,在假设分组数据的服务时间遵循指数分布,并且碰撞的概率恒定的情况下,考虑了二进制指数退让机制、节点缓冲队长,建立了一个三维马尔可夫链进行分析,给出了吞吐量与包到达率之间的关系。但对于排队系统而言,显然有一个从初始状态到稳定状态的过渡过程,而系统最终会达到稳定状态还是不稳定(饱和)状态,是与系统参数 λ 相关的。文献[19]并没有指出存在一个分组到达率的临界值,当到达率大于此临界值时,网络将进入饱和状态。尽管文献[13]给出了在非饱和状态下网络的吞吐量与数据包到达率之间的关系,指出存在一个临界值 λ_c ,当 $\lambda > \lambda_c$ 时,网络达到饱和状态,并且给出了 λ_c 的表达式,但其模型并没有将节点缓冲区长度和重试次数结合起来考虑。并且文献[13,19]的研究对象均是基于结构式(Infrastructure mode)的网络,即有中心节点(AP),所有的节点均和 AP 进行通信。由于没有考虑数据传输过程中的分组转发,因而其结论并不适用合于多跳 Ad hoc 网络。对于节点来说,由转发机制带来的额外数据包将会使排队模型变得更为复杂。并且上述文献中均没有考虑超过最大重试次数时数据包的丢弃过程,而根据 802.11,存在一个最大重试次数,超过时分组将被丢弃。

本文在前人工作的基础上,针对多跳 Ad hoc 网络,考虑分组转发、MAC 层上 DCF 的竞争退让机制、最大重试次数,对节点数据包发送过程建立了一个无限状态拟生灭模型并对其进行了分析。

2 模型建立

为简化模型,做出如下假设:

- 1) 节点均匀分布在给定区域内。
- 2) 每个节点上层数据包的到来服从参数为 λ 的泊松过

$$\begin{cases} \tau = \frac{2(1-2P_c)q}{q[(1-2P_c)(CW_{\min}+1)+P_cCW_{\min}(1-(2P_c)^m)]+2(1-q)(1-P_c)(1-2P_c)} \\ P_c = 1 - (1-\tau)^{\bar{N}_b-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中, τ 为节点在一个随机选定的时隙里发送数据包的概率,且一般情况下 $\tau \neq P_r$; m 是最大竞争窗口的阶次,例如若 $CW_{\min}=7$, $CW_{\max}=255$,则 $m=5$; $\bar{N}_b$ 代表单个节点的邻近节点数。由假设 1 和假设 7 可知, $\bar{N}_b = \pi R^2 \cdot \frac{n}{ab}$, q 代表队列中至少有一个数据包等待发送的概率。由于每个节点数据包的到达服从参数为 λ 的泊松分布,注意到在多跳 Ad hoc 网络中,每个节点的缓冲数据包队列中除了节点自身产生的数据包外,还应包括来自邻居节点的需要转发的数据包。利用文献[20]的推导结果,有:

程,且各节点独立。同时数据包的大小为固定长度 L ,且 $L < L_{\text{thres}}$, L_{thres} 为 RTS 数据包长门限(dot11RTSThreshold)。注:按照 802.11,当包的大小超过 L_{thres} 时,节点在发送数据报文之前会进行 RTS/CTS 握手。

3) 每个节点的缓冲区为无限大。

4) 每个节点的 MAC 层接入协议采用 Basic Access 的 DCF 接入机制,即数据包发送之前没有 RTS/CTS 的握手过程,可设置 dot11RTSThreshold 参数。根据 802.11 规定,当采用 RTS/CTS 机制时,针对 RTS/CTS 及数据包的重试门限有不同的规定,RTS 的重试门限为 dot11ShortRetryLimit,而数据包重试门限为 aLongRetryLimit。此时,对重试过程的建模将会更为复杂,我们将此作为下一步研究的内容。当仅使用 Basic Access 接入时,数据包的最大重试次数为 dot11ShortRetryLimit。

5) 信道是理想的,即每个成功发送的数据报文均可在接收范围内被节点正确收到,也即仅考虑由 CSMA/CA 机制所引起的包的冲突而导致的重传。

6) 每个节点数据包的发送目的节点为随机选定。

7) 整个网络区域是长为 a 、宽为 b 的矩形区域,每个节点的信号覆盖半径为 R 。

8) 考虑单个节点数据包发送的排队模型,由于 CSMA/CA 机制将时间分为一个一个的时隙(time slot),数据包的发送仅在每个时隙的开始,因此结合假设 5,每个数据包在时隙的开始即发送时刻是否成功发送,应考虑离散时间轴上每个包的发送状态。设 S' 为单个数据包的发送次数的状态集,为方便表达,引入 $K_{\max}$ 表示最大发送次数,则由假设 4, $K_{\max} = \text{dot11ShortRetryLimit}$,引进变量 k 表示当前要发送的数据包的尝试次数,即当前是第几次发送。当 $k < K_{\max}$ 时,节点将尝试发送,于是 $S' = \{1, 2, \dots, K_{\max}\}$ 。考虑二维状态集 $S = \{N(t), J(t)\}$,其中 $N(t)$ 表示 t 时刻当前系统中等待发送的数据包的个数, $J(t)$ 表示当前正在发送的数据包的发送次数,于是 S 具有状态集 $\Omega = \{(i, j), i \in [0, \infty), j \in [1, K_{\max}]\}$,且有 $i \in Z, j \in Z, Z$ 为整数集。我们用 S_{ij} 来表示其中的状态,根据假设 2,数据包的到达率服从泊松过程,到达率为 λ ,同时设在 DCF 机制下,在一个时隙内成功发送数据包的概率为 P_r ,在一个时隙内发生冲突的概率为 P_c 。由假设 5,则有 $P_r = 1 - P_c$ 。利用文献[13]的结果,同时由假设 5 即不考虑信道错误,则 P_c 可由如下方程组计算得:

$$\lambda_0 = \frac{(n-1)(n-2) + (n-2)(1-P_c)(n-1)(\bar{N}_b-1)}{(n-1)(n-2) - (n-2)(1-P_c)(n-1-\bar{N}_b)} \cdot \lambda$$

于是有

$$q = 1 - P(X=0) = 1 - e^{-\lambda_0 E[S_b]} \quad (2)$$

$E[S_b]$ 为平均时隙长度,由下式决定:

$$E[S_b] = (1-P_r)\sigma + P_r P_c T_c + P_r (1-P_c) T_r \quad (3)$$

式中, $P_r = 1 - (1-\tau)^n$ 表示在一个时隙内至少有一个数据传输的概率,注意 P_r 与 P_r 不同; σ 为空闲时隙的时间长度; T_c 为平均冲突时长; T_r 为平均成功发送时长,且满足:

$$\begin{cases} T_c = (H+L)/W + \text{ACK}_{\text{timeout}} \\ T_r = (H+L)/W + T_{\text{SIFS}} + \tau_p + T_{\text{ACK}} + T_{\text{DIFS}} + \tau_p \end{cases} \quad (4)$$

式中, τ_p 为传输时延, H 为 MAC 层和物理层的数据报头的长度之和, W 为 MAC 层的传输速率。

将式(4)代入式(3), 将式(3)代入式(2), 将式(2)代入式(1), 方程(A)可用数值方法进行求解。证明可见文献[8], 限于篇幅略去。

考虑当前发送次数 k 的状态转移图如图 1 所示。

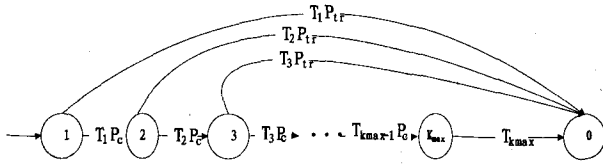


图 1 重试过程状态转移图

其中 0 为吸收态, 即表示数据包发送结束(发送成功或者丢弃)。在图 1 中, 需要确定状态 i 的逗留时间 T_i 。在 DCF 的工作过程中, 每个退避阶段的平均逗留时间应包括: (a) 退避窗口的平均大小; (b) 退让过程中检测到其它节点有数据传输时的休眠时间; (c) 传输数据包所需要的时间。

我们利用了文献[20]中关于数据包的平均服务时间的结论:

$$T_i = \frac{CW_i \sigma + 2T^{\text{eff}}}{2(1 - N_b \cdot \lambda_0 \cdot T^{\text{eff}})} \quad (5)$$

CW_i 为当前的竞争窗口的大小, 其取值为:

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

同时有

$$T^{\text{eff}} = L/W + T_{\text{DIFS}} \quad (6)$$

结合假设 2 和假设 3, 单个节点的数据包的排队模型状态转移图如图 2 所示。

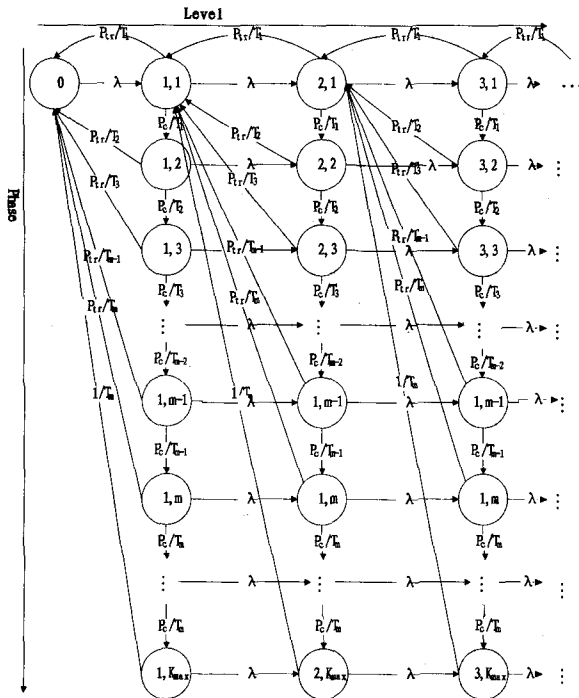


图 2 数据发送过程状态转移图

由图 2 可以看出, 状态的转移只能发生于相邻的状态之间, 也即在单位时间内状态转移只能发生于相邻的水平(level)之间或者同一水平的不同相位之间。由文献[21]中定义

1.3.1 可知, 它是一个拟生灭模型(Quasi-birth-and-death), 并且它的转移子块与水平无关, 与相位相关, 其状态空间为:

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

式中, i, j 均为整数, 状态 0 对应空的系统, 状态 (i, j) 代表队列中共有 i 个数据包, 其中 $i-1$ 个等待发送, 一个正处于第 j 次发送阶段。同一水平 i 内的状态, 按照发送次数递增的顺序进行排列。在不同水平之间, 按照递增顺序进行排列, 其生成元形见式(1), 其中元素为: $L_0 = -\lambda$; $F_0 = (\lambda, \vec{0})$, $\vec{0}$ 代表 $K_{\max}-1$ 维 0 向量; $B_1 = (T_1 P_r, T_2 P_r, \dots, T_{K_{\max}} P_r)^T$; L_k, F_k 都是 $K_{\max}$ 阶方阵, $k \geq 1$; B_k 是 $K_{\max}$ 阶方阵, $k \geq 2$ 。当 $k \geq 1$ 时, L_k, B_k, F_k 的元素形式如下:

$$L_k(i, j) = \begin{cases} -(\lambda + \frac{1}{T_i} P_c), & i = j \& i < m \\ -(\lambda + \frac{1}{T_m} P_c), & i = j \& m \leq i < K_{\max} \\ \frac{1}{T_i} P_c, & i = j-1 \& i < m \\ \frac{1}{T_m}, & i = j-1 \& m \leq i < K_{\max} \end{cases}$$

$$B_k(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{T_i} P_r, & i < m, j = 0 \\ \frac{1}{T_m} P_r, & m \leq i < K_{\max}, j = 0 \\ 0, & j \neq 0 \end{cases}$$

$$F_k(i, j) = \lambda, i = j \& i < K_{\max}$$

3 模型分析与求解

拟生灭模型的特点为, 除边界状态的转移块不同外, 其它转移块均相同。已有许多学者给出了矩阵分析的方法^[21, 22]及数值方法^[23]来求解此类拟生灭过程的稳态分布。在此我们不去深究其分析过程, 而只是引用其结果。

根据前面的分析, 在网络处于非饱和状态的情况下, 拟生灭过程将存在稳态分布。反之, 则不存在。于是求解此过程存在稳态分布的条件即可得到多跳 Ad hoc 网络最终处于稳定(非饱和)状态的条件。

下面考虑过程 $\{N(t), J(t)\}$ 存在稳态分布的充要条件。

令 $H = B_k + L_k + F_k, k \geq 2$, 则有:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} (P_r - P_c) & \frac{1}{T_1} P_c & & & \\ \frac{1}{T_2} P_r & -\frac{1}{T_2} P_c & \frac{1}{T_2} P_c & & \\ \frac{1}{T_3} P_r & 0 & -\frac{1}{T_3} P_c & \frac{1}{T_3} P_c & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{T_{m-1}} P_r & 0 & -\frac{1}{T_{m-1}} P_c & \frac{1}{T_{m-1}} P_c & \\ \frac{1}{T_m} P_r & 0 & -\frac{1}{T_m} P_c & \frac{1}{T_m} P_c & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{T_m} P_r & 0 & -\frac{1}{T_m} P_c & \frac{1}{T_m} P_c & \\ \frac{1}{T_m} P_r & 0 & -\frac{1}{T_m} P_c & \frac{1}{T_m} P_c & \end{bmatrix}_{K_{\max} \times K_{\max}}$$

显然 H 为不可约生成元, 令 $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{K_{\max}})$ 表示该生成元的稳态概率向量, 于是 π 应满足方程

$$\begin{cases} \pi H = 0 \\ \pi e = 1 \end{cases}$$

e 为单位列向量。

这是一个线性方程组, 容易解之, 于是有

$$\pi_i = \frac{T_i}{\sum_{k=1}^{K_{\max}} T_k}, 1 \leq i \leq K_{\max} \quad (7)$$

根据文献[22]中定理 3.1.1,过程存在平稳概率的条件是

$$\pi B_k e > \pi F_k e$$

将式(7)代入便可得到使网络达到平稳状态 λ 所要满足的条件:

$$\lambda < \frac{K_{\max}}{\sum_{k=1}^{K_{\max}} T_k} \cdot P_r = \frac{K_{\max}}{\sum_{k=1}^{K_{\max}} T_k} \cdot (1 - P_c) \quad (8)$$

而 P_c 由式(1)确定,注意 P_c 的定义中包含 λ 。同时由式(5)可知, T_i 与 λ 及上层数据包长 L 有关,因而式(7)实际上是 λ , L , $K_{\max}$ 之间的关系式。

为便于表达,令

$$f(\lambda) = \lambda - \frac{K_{\max}}{\sum_{k=1}^{K_{\max}} T_k} \cdot (1 - P_c) \quad (9)$$

于是平稳的条件即为 $f(\lambda) < 0$ 。而临界值 λ_c 满足 $f(\lambda_c) = 0$ 。

可以看出数据包的到达率和包的长度及最大重试次数将决定系统是否存在稳态分布。从直觉上,随着 λ , L , $K_{\max}$ 的增长,系统必然趋于不稳定,原因是我们假设单个节点的缓冲区是有限的,这将导致单个节点有大量的数据包积压。

在文献[13]中给出了为使整个网络吞吐量达到最大值的到达率的临界值:

$$\lambda_c' = \frac{1}{N[T_c - T_c] + \frac{(\sigma - T_c)(1 - \tau_m)N + T_c}{\tau_m(1 - \tau_m)^{N-1}}}$$

其中,

$$\tau_m = \frac{\sigma - \sqrt{\sigma^2 - 2(N-1)(\sigma - T_c)}}{(N-1)(\sigma - T_c)}$$

此处 λ_c' 是使网络达到最大吞吐量的临界值。比较在 $n=10, 20, 30$ 时 λ_c' 与 λ_c 的取值,如表 1 所列。

表 1 数据到达率临界值比较

n	λ_c	λ_c'
10	≈ 80	≈ 73
20	≈ 3.3	≈ 36
30	≈ 1.2	≈ 24

从表 1 可以看出,在结构式的网络中达到最大吞吐量的临界值与多跳 Ad hoc 网络中的临界值差别较大。原因在于 Ad hoc 网络中,节点之间相互都有通信,包的冲突概率要大得多。以 Ad hoc 网络的路由算法为例, λ_c 即为允许的最大数据产生率。当 $\lambda > \lambda_c$ 时,网络将处于拥塞状态,大量数据包由于一直处于排队状态造成较大的时延,这是在路由算法设计与实现时应避免的状况。限于篇幅,实验及数据另行发表。

结束语 本文基于 802.11 多跳 Ad hoc 网络 DCF Basic Access 机制,针对节点的数据包的排队、重试和丢弃,建立了一个无限状态拟生灭模型,并对其进行了稳定性分析。研究了洪泛方式下使网络避免到达饱和状态的条件。本模型精确描述了节点数据包的缓冲及发送过程,相对于前人对 DCF 的分析工作,我们从网络层的角度分析了网络达到稳定的条件。这对 Ad hoc 网络层上的拥塞控制具有直观的意义。对于网络层上的程序设计如路由算法,需要控制自己的发包率不能超过 λ_c ,也就是上述的包到达率,从而不致使网络达到拥塞进而饱和状态。下一步研究的重点是在此基础上分析吞吐量及丢包率等。

参考文献

- [1] 张信明,刘琼,代仕芳,等. 移动 Ad hoc 网络通信量相关干扰感知路由协议[J]. 软件学报,2009,20(10):2721-2728
- [2] 高雪梅,张信明,史栋,等. 移动 Ad hoc 网络模糊逻辑移动预测路由算法[J]. 软件学报,2009,20(12):3205-3212
- [3] 张信明,史栋,邹丰富,等. 一种移动 Ad hoc 网络综合选路基准[J]. 软件学报,2009,20(11):3077-3085
- [4] Part II. Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications[S]. 1999:85-99
- [5] 徐伟强,汪亚明,俞成海,等. 移动 Ad hoc 网络的跨层优化拥塞控制[J]. 软件学报,2010,21(7):1667-1678
- [6] 徐伟强,吴铁军,汪亚明,等. 强动态 Ad hoc 网的拥塞控制:价格协作和滚动优化[J]. 软件学报,2008,19(9):2389-2402
- [7] Tanenbaum A S. Computer Networks [M]. Fourth Edition. Prentice Hall,2003
- [8] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2000,18(3):535-547
- [9] Robinson J W, Randhawa T S. Saturation throughput analysis of IEEE 802.11e enhanced distributed coordination function[J]. IEEE JSAC,2004,22(5):917-928
- [10] Chatzimisios P, Boucouvalas A C, Vitsas V. Influence of channel BER on IEEE 802.11 DCF[J]. IEEE Electronics Letters,2003,39(23):1687-1689
- [11] Barowski Y, Biaz S, Agrawal P. Towards the performance analysis of IEEE 802.11 in multi-hop ad-hoc networks[C]//Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. New Orleans, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2005:100-106
- [12] Duffy K, Malone D, Leith D J. Modeling the 802.11 distributed coordination function in non-saturated conditions [J]. IEEE Communications Letters,2005,9(8):715-717
- [13] Laddomada D F, Mesiti M, Mondin F, 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
- [14] Cheng S T, Wu M. Performance evaluation of Ad hoc WLAN by M/G/1 queueing model[C]//Proc. of the Int'l Conf. on Information Technology: Coding and Computing. Las Vegas, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2005:655-681
- [15] 雷磊,许宗泽,蔡维珍. 基于定长时隙的多跳 Ad hoc 网络 DCF 协议马尔可夫链模型[J]. 软件学报,2010,21(3):564-574
- [16] Tickoo O, Sikdar B. A queueing model for finite load IEEE 802.11 random access MAC[C]//2004 IEEE International Conference on Communications. 2004:175-179
- [17] Winands E, Denteneer T, Resing J, et al. A finite-source queueing model for the IEEE 802.11 DCF[J]. European Transactions on Telecommunications,2005,6(1):77-89
- [19] 杨卫东,马建峰,李亚辉. 基于分组到达率的 802.11 DCF 性能分析[J]. 软件学报,2008,19(10):2762-2769
- [20] Jun T, Roy N, Julien C. Modeling Delivery Delay for Flooding in Mobile Ad hoc Networks[C]//2010 IEEE International Conference on Communications(ICC). 2010:1-6
- [21] Latouche G, Ramaswami V. Introduction to Matrix Analytic Methods in Stochastic Modeling, SIAM, 1999
- [22] Neuts M F. Matrix-Geometric Solutions in Stochastic Models [M]. The John Hopkins University Press, 1981
- [23] Philippe B, Saad Y, Stewart W J. Numerical methods in Markov chain modelling[J]. Operations Research, 1992, 40(6):1156-1179