

文章编号:1000-582X(2011)06-092-06

泊松分布站点 TCP 流在 WLANs 中的 吞吐量分析与验证

廖 勇,杨士中,王 丹

(重庆大学 通信与测控中心 重庆 400044)

摘 要:分析了 Bianchi G 提出的 IEEE 802.11 MAC DCF 的吞吐量模型,在其基础上扩展了重传限制和在其离散马尔科夫链中增加了不退避直接传输状态,修正并完善了该经典模型,同时提出了在一定时间内 BSS 中接入 AP 的无线站点数目符合泊松分布的假设,并给出了对应模型和计算吞吐量的量化表达式,最后通过仿真 AP 到无线站点的单向 TCP 流,验证了提出的模型的合理性和有效性。

关键词:传输控制协议;离散马尔科夫链;泊松分布;服务质量

中图分类号:TN925

文献标志码:A

Analysis and verification of TCP goodput of poisson distribution station over WLANs

LIAO Yong, YANG Shi-zhong, WANG Dan

(Center of Communication & Tracking Telemetering Command, Chongqing University,
Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: By analyzing the throughput model of IEEE 802.11 MAC DCF put forward by Bianchi G, the retransmitting limit is extended and the state of direct transmission with no backing off is added in its discrete Markov chains to refine and perfect the classic model. The following assumption is proposed: the number of wireless stations accessing to AP in BSS met poisson distribution within a certain period of time. Under this assumption, both of the corresponding model and the quantified expression of calculating its goodput are provided. The rationality and effectiveness of the proposed model are verified with emulation of unidirectional TCP flow from AP to wireless stations.

Key words: TCP; discrete markov chains; poisson distribution; QoS

IEEE 802.11 系列标准已经在实际中得到了广泛的应用,随着移动互联网需求的增加,网络视频、音频等多媒体的大量应用,如何更有效的研究传输层和 MAC 层之间的数据交互变得非常有意义。

近年来,众多学者一直在发展和完善 IEEE 802.11 DCF 分析模型,其中较为典型的有文献 [1-13]。在文献 [1] 中, Bianchi G 提出一种简单但较准确的计算 IEEE 802.11 DCF 吞吐量的分析模

收稿日期:2010-12-10

基金项目:CNGI2005 示范工程资助项目 (CNGI-04-4-2D); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (XDJXS11161157)。

作者简介:廖勇(1982-),男,重庆大学博士研究生,主要从事无线网络方向研究,(Tel)13650546326;
(E-mail)liaoy@cqu.edu.cn。

杨士中(1937-),中国工程院院士,重庆大学博士生导师,教授,研究方向为无线网络通信、测控及遥感信息传输。

型,该模型基于离散马尔科夫链,并适用于 DATA/ACK 和 RTS/CTS/DATA/ACK 两种接入机制。文献[2]分析了在饱和状态下两种接入机制的吞吐量和延迟分析模型。文献[3]分析了多速率下的性能异常站点吞吐量模型,弥补了之前分析模型速率单一的不足。文献[4]扩展了非饱和状态下的分析模型,该模型也是基于马尔科夫链。文献[5]分析了在 AP 存在下的基础网络中饱和状态典型应用 HTTP 的 TCP 吞吐量分析模型。文献[6]研究了层间依赖尤其是物理层的多样性对基础网络结构下 TCP 吞吐量的影响。文献[7]分析了 Ad hoc 下 TCP 和 UDP 流相互竞争下的性能影响。文献[10]提出一种基于 p 持续饱和 TCP 流的基础网络环境下的分析模型,该模型也是基于马尔科夫链。文献[11]在 Bianchi G 的马尔科夫链模型上,考虑了饱和与非饱和状态,并且在模型中扩展了空闲状态。特别值得一提的是,意大利学者 Bruno R 近年来一直活跃在 IEEE 802.11 建模分析领域:文献[7]中分析了 TCP 上下行传输的吞吐量分析模型;文献[8]中分析了在基础网络环境下的 TCP 流上下行传输模型;文献[12]中进一步分析了在基础网络环境下 TCP 和 UDP 上下行传输的吞吐量分析模型,以及饱和状态下 UDP 流对 TCP 流的性能影响;文献[13]中提出一种在基础网络结构下计算饱和 TCP 性能的平均值方法。

综上所述,多媒体数据流在 WLANs 中的研究主要集中在对 Ad hoc 或基础服务集(BSS)中 TCP 性能的研究和改进,而对无线站点的出现分布对系统吞吐量的影响并没有研究。笔者首先分析了 Bianchi G 提出的经典 IEEE 802.11 MAC DCF 离散马尔科夫链模型^[1],并在其基础上进行了重传计数器以及不退避直接传输状态的扩展,进一步完善了该模型。其次针对特定的 IEEE 802.11 BSS 网络中饱和 AP 对无线站点进行单向 TCP 流传输进行了研究,分析了采用 DCF 接入信道的站点吞吐量模型,提出了在一定时间内接入关联 AP 的无线站点数目符合泊松分布的假设,并给出了其对 TCP 吞吐量影响的关系表达式,最后通过仿真软件进行了模拟,验证了所提假设的合理性和有效性。

1 IEEE 802.11 DCF 吞吐量分析

整个分析的理论原型和相关数学符号主要参照文献[1]。首先进行吞吐量分析,分析假设

1)所有竞争的站点都处于饱和状态,就是在任一时刻,该站点都有数据发送要求。

2)站点之间没有相互干扰,不存在隐藏终端的问题。

3)忽略无线信道的捕获效应和误码问题。

4)只分析 DCF 的 DATA+ACK 机制,暂不分析 RTS+CTS+DATA+ACK 的机制。

1.1 包传输概率

每个站点在传输数据之前,都要经历 DIFS,然后进入退避阶段,如果在退避期间,发现退避计数器减少到 0,并且感知到信道是处于空闲状态,这个时候此站点进行数据的传输。

设 $b(t)$ 是一个站点的随机退避计数器。当站点进入退避阶段,发现信道忙(即有另外的站点已经退避到 0 抢占到信道),这时退避计数器停止工作。退避计数器的值依赖于发生碰撞和信道忙的历史。定义 $W = CW_{\min}$, m 表示最大的退避阶段,即 $CW_{\max} = 2^m W$ 。又定义 $W_i = 2^i W$, ($i \in (0, m)$), i 叫做退避阶段。设 $s(t)$ 是时间 t 时刻站点处于的退避阶段。

考虑重传计数器对退避计数器的影响^[3],又定义 L_{retry} 为站点的重传值,这样,可以得到

$$W_i = \begin{cases} 2^i W, & 0 \leq i \leq m-1; \\ 2^m W, & m \leq i \leq L_{\text{retry}}. \end{cases} \quad (1)$$

如果 $L_{\text{retry}} \leq m$,

$$W_i = 2^i W, 0 \leq i \leq L_{\text{retry}}. \quad (2)$$

在退避阶段 i ,每个站点的退避时间为 $[0, W_i - 1]$ 。

定义 p 为条件碰撞概率, p_b 为信道忙概率,这 2 个概率相对退避过程是相互独立的,并且在 n 确定的时候是常数。每个站点可以通过退避阶段 i 和退避计数器 k 来表示。这样,可以根据二维过程 $\{s(t), b(t)\}$ 建立一个离散的马尔科夫链(W, n 较大时近似更精确)。

当退避计数器等于 0,站点感知到信道处于空闲并且确认时间超过 DIFS,站点将不使用退避过程而直接进行传输,定义这个过程为 State $\{-1, 0\}$ ^[2]。

于是,在经典的离散马尔科夫链模型的基础上综合考虑了重传计数器 L_{retry} 和直接传输过程,得到的新的基于重传计数器和直接传输状态的马尔科夫链,如图 1 所示。显然,考虑到这 2 个因素之后,该状态转移图就变得更加完善。由于该图中非空的单步转移概率和文献[2]的表述一致,这里不再累述。

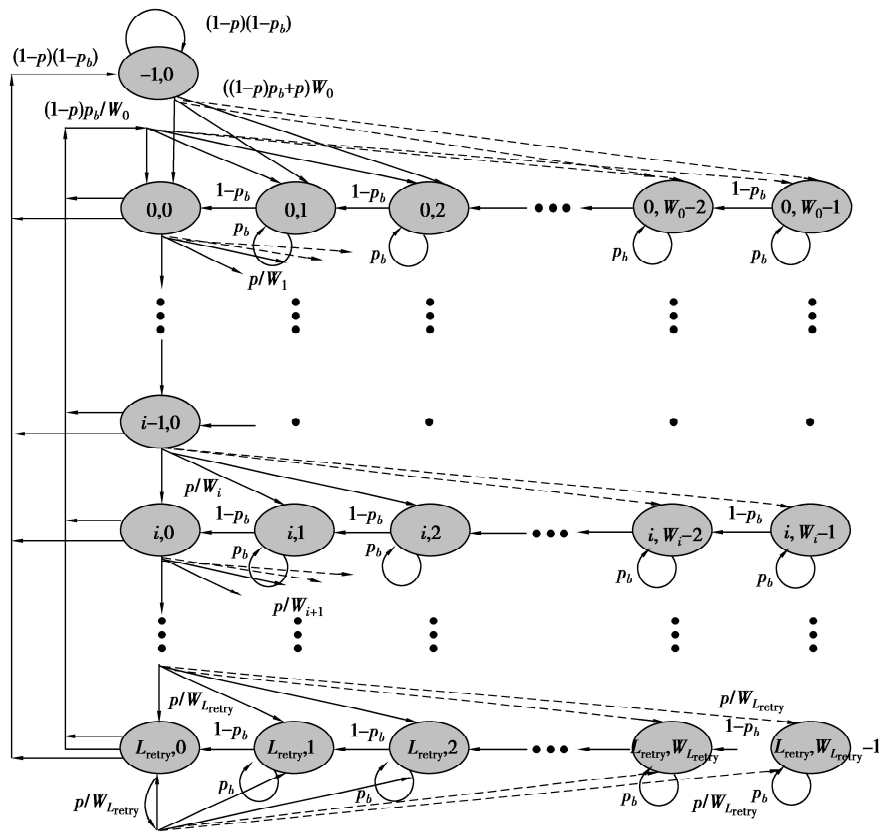


图 1 基于重传计数器和不退避直接传输的离散马尔科夫链状态迁移图

为了便于计算该模型的稳定状态概率, 设定

$$b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}, \quad (3)$$

$i \in (0, L_{\text{retry}}), k \in (0, W_i - 1)$ 。

为静止的马尔科夫链分布, 在稳定状态下, 下面的关系式有效

$$b_{i,0} = p^i b_{0,0}, \quad 0 \leq i \leq L_{\text{retry}} - 1. \quad (4)$$

$$b_{L_{\text{retry}},0} = \frac{p^{L_{\text{retry}}}}{1-p} b_{0,0}. \quad (5)$$

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \frac{1}{1-p_b} b_{i,0}, \quad 0 \leq i \leq L_{\text{retry}},$$

$$1 \leq k \leq W_i - 1. \quad (6)$$

$$b_{0,0} = \frac{p_b + p(1-p_b)}{1-p_b} b_{-1,0}. \quad (7)$$

这些关系式之间有

$$\sum_{i=-1}^{L_{\text{retry}}} \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} = 1 \text{ 或 } b_{-1,0} + \sum_{i=0}^{L_{\text{retry}}} \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} = 1. \quad (8)$$

通过公式(4)-(6)可以得到

$$b_{-1,0} + \frac{1}{1-p_b} \sum_{i=0}^{L_{\text{retry}}-1} p^i b_{0,0} \sum_{k=0}^{W_i-1} \frac{W-k}{2^i W} +$$

$$\frac{1}{1-p_b} \frac{p L_{\text{retry}}}{1-p} b_{0,0} = 1. \quad (9)$$

用公式(7)代入到等式(9), 可以计算出 $b_{-1,0}$

$$b_{-1,0} = \frac{2(1-p_b)^2(1-2p)(1-p)}{2(1-p_b)^2(1-2p)(1-p) + (p_b + p(1-p_b))(1-2p)(W+1) + pW(p_b + p(1-p_b))(1-(2p)^{L_{\text{retry}}})}. \quad (10)$$

公式(4)-(10)中, 如果已知 W, L_{retry}, p 和 p_b , 可以计算出模型的稳定状态概率。由以上推导已经得到 W 和 L_{retry} , 还需要求出 p 和 p_b 。

设 τ 是 1 个站点在 1 个随机选取时隙里面传输数据的概率。当站点的退避计数器为 0 时, 站点处

于 $b_{i,0}$ 的任意一个状态, 所以

$$\tau = \sum_{i=-1}^{L_{\text{retry}}} b_{i,0} = b_{-1,0} + \sum_{i=0}^{L_{\text{retry}}-1} b_{i,0} + b_{L_{\text{retry}},0}$$

再把等式(4)和(5)代入到上式可得,

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{2(1-p_b)^2(1-2p)}{2(1-p_b)^2(1-2p)(1-p) + (p_b + p(1-p_b))(1-2p)(W+1) + pW(p_b + p(1-p_b))(1-(2p)L_{\text{retry}})} \\ &= \frac{b_{0,0}}{1-p}. \end{aligned} \quad (11)$$

当 2 个或以上的站点在一个时隙里面发生碰撞时, 帧传输碰撞概率定义如下

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1}. \quad (12)$$

如果一个站点在一个时间间隔内发现信道忙, 那么信道忙概率 p_b 定义为

$$p_b = 1 - (1 - \tau)^n. \quad (13)$$

式(11)是 1 个非线性系统, 容易证明这个系统有唯一解。将公式(12)(13)代入式(11), 即可解出 τ (推算 τ 的过程是考虑了重传计算器和不退避直接传输的条件, 得出的是 1 个更加完善的表达式)。 τ 求解出来之后, p 和 p_b 自然就能求解, 也就能算出这个模型的稳定状态概率。

1.2 吞吐量

参照文献[1], 归一化吞吐量 S 的表达式如下

$$S = \frac{P_s E[P]}{E[\psi] + P_s T_s + (1 - P_s) T_c}. \quad (14)$$

$E[P]$ 是平均负载长度, T_s 是一次成功传输占用信道的时间, T_c 是站点之间发生碰撞占用信道的

$$\left\{ \begin{aligned} T_s &= T_{\text{plcp}} + T_{\text{mac}} + T_{\text{cont}} + T_{\text{mpdu}} + \text{SIFS} + T_{\text{ack}} + T_{\text{cont}} + \text{DIFS} \\ T_c &= T_{\text{plcp}} + T_{\text{mac}} + T_{\text{mpdu}} + T_{\text{cont}} + \text{DIFS} \end{aligned} \right. \quad (15)$$

注意

1) T_{cont} 指的是信道竞争时间, 它是一个关于站点个数 n 的函数, 具体推导过程见文献[4]

$$T_{\text{cont}}(n) \approx \text{SLOT} \times \frac{1 + P_c(n)}{2n} \times \frac{CW_{\min}}{2}. \quad (16)$$

$P_c(n)$ 是成功传输一个包所经历的碰撞概率, 可由 CW_{\min} 和站点个数 n 解出

$$P_c(n) = 1 - (1 - 1/CW_{\min})^{n-1}. \quad (17)$$

SLOT 是时隙, 数值跟物理层的调制方式有密切关系。SLOT 和默认的 CW_{\min} 值参考文献[1]的表 1, 分别是 $20 \mu\text{s}$ 和 32。

2) 对 IEEE 802.11b 而言, 长短前导传输速率是不同的。PLCP 的前导和头的大小都是固定的, 所以这部分时间是能确定的

$$\begin{aligned} T_{\text{plcp}} &= T_{\text{plcp_preamble}} + T_{\text{plcp_header}} \\ &= \begin{cases} \frac{P_{\text{plcp_longpreamble}} + P_{\text{plcp_header}}}{R_{\text{plcp_longpreamble}}}, \text{longpreamble} \\ \frac{P_{\text{plcp_shortpreamble}} + P_{\text{plcp_header}}}{R_{\text{plcp_shortpreamble}}}, \text{shortpreamble} \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

$$P_{\text{plcp_longpreamble}} = 144 \text{ Bits}, P_{\text{plcp_shortpreamble}} = 72 \text{ Bits},$$

平均时间。 P_s 是一次传输成功的概率, $E[\psi]$ 是 ψ 的均方值, ψ 是在 1 个传输发生之前的连续空闲 SLOT。

$E[P]$ 中 P 在实际传输中是 1 个动态变量, $E[P]$ 的求法可以通过概率密度函数来计算[1]。在分析中, $E[P]=P$, 也就是包的长度。

T_s 和 T_c 依赖于信道接入方式, 这里只考虑 DCF 中的 DATA+ACK 的传输机制, 其传输流程如图 2 所示。

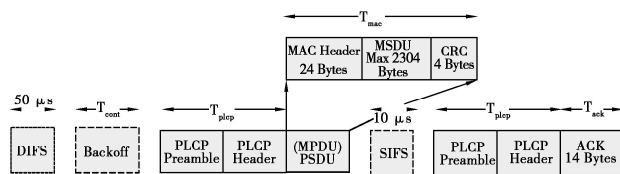


图 2 采用 CSMA DATA ACK 机制传输数据流程

所以 T_s 和 T_c 的计算式如下

$P_{\text{plcp_header}} = 48 \text{ Bits}$, $R_{\text{plcp_longpreamble}} = 1 \text{ Mbps}$, $R_{\text{plcp_shortpreamble}} = 1 \text{ Mbps}$, $= 2 \text{ Mbps}$ 代入(18)可以算出来 T_{plcp}

$$T_{\text{plcp}} = \begin{cases} 192 \mu\text{s}, \text{longpreamble} \\ 96 \mu\text{s}, \text{shortpreamble} \end{cases}. \quad (19)$$

3) 传输 MPDU 的时间包括 MAC 头和 MSDU 以及尾部的 CRC 循环冗余校验的时间

$$\begin{aligned} T_{\text{mpdu}} &= T_{\text{mac_header}} + T_{\text{msdu}} + T_{\text{crc}} = \\ &= \frac{P_{\text{mac_header}} + P_{\text{msdu}} + P_{\text{crc}}}{R}. \end{aligned} \quad (20)$$

$$T_{\text{ack}} = \frac{P_{\text{ack}}}{R}. \quad (21)$$

R 是实际传输速率, 对 IEEE 802.11b 而言, 有 $1/2/5.5/11 \text{ Mbps}$ 4 种速率可选。当速率确定之后, 这部分的传输时间也能确定。

4) DIFS 和 SIFS 根据协议标准都是确定的, 分别是 $50 \mu\text{s}$ 和 $20 \mu\text{s}$ 。

成功一次传输概率为

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1-(1-\tau)^n}. \quad (22)$$

最后

$$E[\psi] = \frac{1}{p_b} - 1. \quad (23)$$

由于 $E[\psi]$, P , T_s , T_c 都是时隙的倍数, 所以采用公式(15)、(22)、(23)可以得到 DCF 基本接入方式 DATA+ACK 的归一化吞吐量 S .

1.3 泊松分布站点吞吐量

如图 3, 假设在 1 个圆形区域内, 只有 1 个 AP, 并且这个 AP 的有效传输半径是 250 m. 进入到 BSS AP 有效传输半径的站点是相互独立的, 可以用泊松分布近似这种现象. 为了让进入的站点都能进行有效的竞争, 终端站点的数目最大不能超过 25^[3].

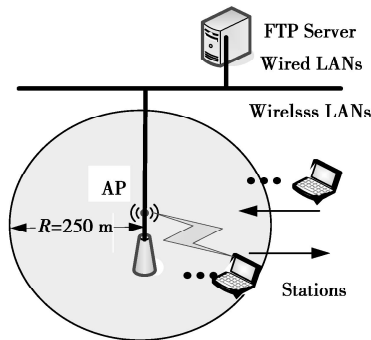


图 3 BSS AP 和无线站点通信网络拓扑

假设站点进入到 AP 范围内和移出其范围的概率相同, 并且站点进入到 AP 范围内立即处于饱和状态, 那么则有

$$P(X = 0) = P(X > 0) = 1/2, \quad (24)$$

$$P(X = 0) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^0}{0!} \rightarrow \lambda = \ln 2. \quad (25)$$

那么 AP 范围内同时有 n 个站点同时出现的概率有

$$P(X = n) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^n}{n!} = \frac{1}{2} \frac{(\ln 2)^n}{n!}. \quad (26)$$

前面分析得到, n 个站点接入信道的碰撞概率为常数 p , 由假设可知, n 个站点同时出现在 AP 半径内和 n 个站点同时竞争信道是等价的, 所以得出

$$p = \frac{1}{2} \frac{(\ln 2)^n}{n!}. \quad (27)$$

式(12)变形

$$\tau(p) = 1 - (1 - p)^{n-1}. \quad (28)$$

当 $p \ll 1$ 时, 对式(28)用二项式定理

$$(1 - p)^{n-1} \approx (1 - p)^n \approx 1 - np + \frac{n(n-1)}{2} p^2. \quad (29)$$

将式(29)代入式(28)可得

$$\tau = np - \frac{n(n-1)}{2} p^2. \quad (30)$$

将式(27)代入式(30)可得

$$\tau = \frac{1}{2} \frac{(\ln 2)^n}{(n-1)!} - \frac{1}{8} \frac{1}{n!} \frac{(\ln 2)^{2n}}{(n-2)!}, 0 \leq n \leq 25. \quad (31)$$

至此, 只要知道 AP 范围内随机站点数目 n , 那么可以推导出其系统吞吐量.

2 模拟验证

模拟拓扑结构如图 3 所示. 假设 AP 通过有线网络连接 1 个 FTP 服务器, 这个服务器以 100 Mbps 速率连接 AP. AP 和无线站点之间的传输速率是自适应, 无线站点共有 10 个, 位置都是随机产生的, 并且出现数目符合泊松分布, 如图 4 所示.

仿真软件为 NS2^[14], 仿真时间是 165 s, 站点相关参数设置如表 1.

表 1 MAC 和 PHY 系统参数

参数	长度(Bytes)
报文负载	1 500
MAC 头	28
PHY 头	24
ACK	14

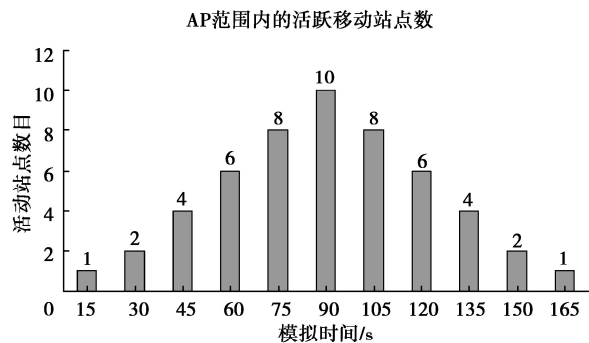


图 4 模拟时间内关联 AP 的泊松分布无线站点数目

仿真结果如图 5 所示, 分析图 5 中所有 10 个无线站点的吞吐量情况, 得到以下 2 个结论

1) 随着站点数目增加, 系统 TCP 吞吐量在逐渐下降, 这是由于无线局域网 MAC CSMA/CA 的性能异常^[15]造成的. 由于仿真的时候, 泊松分布站点出现的位置是随机的, 如果出现位置距离 AP 较远, 由于采用的是速率自适应机制, 那么传输速率较小,

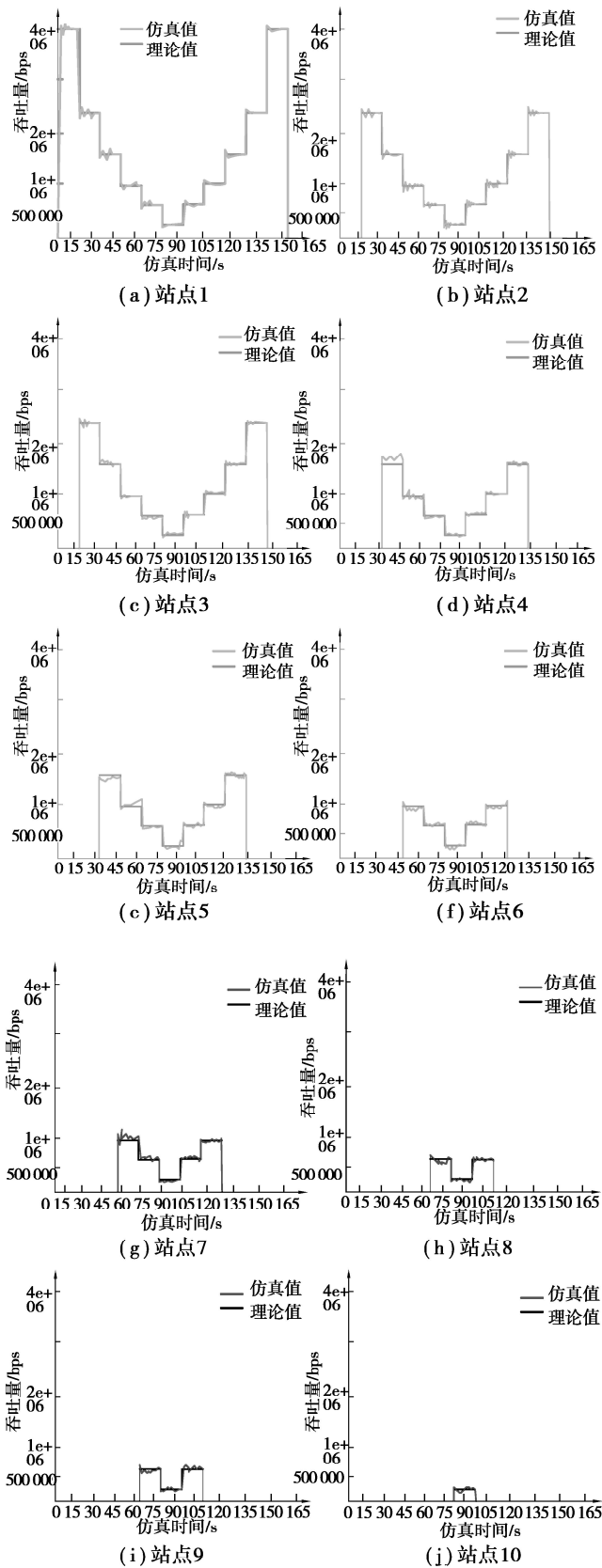


图 5 各泊松分布无线站点仿真和理论 TCP 吞吐量对比图

又由于所有站点公平接入信道,接入信道的时间与速率成反比关系,速率小的站点必然影响与 AP 距离较近的速率好的站点的吞吐量性能,从而造成

整体吞吐量性能降低。

2) 对应每一个站点,把理论计算得出的吞吐量和实际站点活跃期间仿真得到的吞吐量进行了对比。从所有站点的仿真和理论吞吐量对比来看,发现仿真得到的实际 TCP 吞吐量和计算出来的理论吞吐量是比较一致的。站点以泊松分布出现之后以饱和状态接收 AP 的数据,虽然开始接入时有一些系统抖动,但是随着仿真时间的推移,在站点的活跃期间,吞吐量性能慢慢趋于稳定。从这个仿真结果验证了所提泊松分布站点 TCP 流吞吐量计算模型的合理性和有效性。

3 结 语

在深入分析 Bianchi G 提出的 IEEE 802.11 DCF 离散马尔科夫链模型的基础上,扩展引入了长重传限制和不退避直接传输状态,进一步完善了该分析模型,并分析了新模型的稳定状态概率以及吞吐量。同时,分析了无线环境中关联 AP 的站点服从泊松分布对系统吞吐量的影响,通过数值分析得出了其计算每个站点吞吐量的量化表达式,并从仿真的角度验证了所提分析模型的合理性和有效性。

下一步工作是研究非饱和状态下,无线 AP 对关联的无线站点瞬时传输对系统吞吐量的影响。由于实际环境中,无线网络一直处于传输的状态毕竟是少数,而绝大多数情况都属于非饱和状态。这是一个非常有挑战同时有较大理论创新的课题。

参考文献:

- [1] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Area in Communications, 2000, 18(3): 535-547.
- [2] ZIOUVA E, ANTONAKOPOULOS T. CSMA/CA performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis [J]. Computer Communications, 2002, 25(3): 313-321.
- [3] YANG D, LEE T, JANG K, et al. Performance enhancement of multirate IEEE 802.11 WLANs with geographically scattered stations[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(7): 906-919.
- [4] LATKOSKI P, HADZI-VELKOV Z, POPOVSKI B. Extended model for performance analysis of non-saturated IEEE 802.11 DCF in erroneous channel[C]// IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, October 9-12, 2006, Vancouver, BC, Canada: IEEE Computer Society, 2006: 783-788.

(下转第 104 页)

- contactless power bi-directional push mode [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 20(10):66-71.
- [11] 马皓,孙轩.原副边串联补偿的电压型耦合电能传输系统设计[J].中国电机工程学报,2010,30(15):48-52.
MA HAO, SUN XUAN. Design of voltage source inductively coupled power transfer system with series compensation on both sides of transformer [J]. Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2010, 30 (15): 48-52.
- [12] 傅文珍,张波,丘东元,等.自谐振线圈耦合式电能无线传输的最大效率分析与设计[J].中国电机工程学报. 2009, 29 (18): 21-26.
FU WEN-ZHEN, ZHANG BO, QIU DONG-YUAN, et al. Maximum efficiency analysis and design of self-resonance coupling coils for wireless power transmission system[J]. Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2009, 29(18): 21-26.
- [13] WANG C S, COVIC G A, STIELAU O H. Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51 (1): 148-157.
- [14] HU A P, HUSSMANN S. Improved power flow control for contactless moving sensor applications[J]. IEEE Power Electronics Letters, 2004, 2(4):135-138.
- [15] CHWEI-SEN W, STIELAU O H, COVIC G A. Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(5):1308-1314.
- [16] BOYS J T, COVIC G A, GREEN A W. Stability and control of inductively coupled power transfer systems[J]. IEEE Proceedings: Electric Power Applications, 2000, 147(1):37-43.
- [17] 孙跃,陈国东,戴欣,等.非接触电能传输系统恒流控制策略[J].重庆大学学报:自然科学版,2008,31(7):766-769.
SUN YUE, CHEN GUO-DONG, DAI XIN, et al. A constant current control method for contactless power transmission systems [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2008, 31 (7): 766-769.

(编辑 侯湘)

(上接第 97 页)

- [5] MIORANDI D, KHERRRANI A A, ALTMAN E. A queueing model for HTTP traffic over IEEE 802. 11 WLANs[J]. Elsevier Computer Networks, 2006, 50 (1):63-79.
- [6] CHOI S, PARK K, KIM C. Performance impact of interlayer dependence in infrastructure WLANs [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(7): 829-845.
- [7] BRUNO R, CONTI M, GREGORI E. Performance modelling and measurements of TCP transfer throughput in 802. 11-based WLANs [C]//9th ACM/IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. October 2-6, 2006, Malaga. Spain: Association for Computing Machinery, 2006:4-11.
- [8] BRUNO R, CONTI M, GREGORI E. Design of an enhanced access point to optimize TCP performance in Wi-Fi hotspot networks [J]. ACM/Springer Wireless Networks Journal, 2007, 13(2):259-274.
- [9] CAI K, FEELEY M J, CULLY B, et al. Understanding performance for two 802. 11 competing flows[C]//IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems. October 8-11, 2007, Pisa. Italy: IEEE Computer Society, 2007: 1-11.
- [10] YU J, CHOI S. Modeling and analysis of TCP dynamics over IEEE 802. 11 WLAN [C]//The International Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services. January 24-26, 2007, Obergurgl, Tyrol. Austria:IEEE Computer Society, 2007: 154-161.
- [11] PITTS J M, SHEPHERD O M. Analysing the transition between unsaturated and saturated operating conditions in 802. 11 network scenarios [C]//IEEE Military Communications Conference. November 16-19, 2008, Washington DC. USA:IEEE Incorporated, 2008:1-7.
- [12] BRUNO R, CONTI M, GREGORI E. Throughput analysis and measurements in IEEE 802. 11 WLANs with TCP and UDP traffic flows[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(2): 171-186.
- [13] BRUNO R, CONTI M, GREGORI E. Average-value analysis of 802. 11 WLANs with persistent TCP flows [J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13 (4): 218-220.
- [14] Fall K, VARDHAN K. The Network Simulator (NS2) [EB/OL]. [2009-05-23] [http://www. isi. edu/nsnam/ns/](http://www.isi.edu/nsnam/ns/).
- [15] HEUSSE M, ROUSSEAU F, NERGER-SABBATEL G, et al. Performance anomaly of 802. 11b [C]//IEEE International Conference on Computer Communications. March 30-April 3, 2003, San Francisco, CA. USA:IEEE Incorporated, 2003: 836-843. (编辑 侯湘)