

多信道认知用户饱和吞吐量分析

谭学治, 徐贵森, 刘玉涛, 刘春红

(哈尔滨工业大学 通信技术研究所, 哈尔滨市 150080, xuguisen@hitcrc.hit.edu.cn)

摘要: 为计算认知网络中系统饱和吞吐量的变化情况, 提出一种分析认知用户间饱和吞吐量的三维马尔科夫模型. 模型假设存在有限的认知用户在理想的信道上通信, 通过分析 802.11DCF (distributed coordination function) 提供的两种退避接入机制, 计算出认知用户间饱和吞吐量的理论值, 并通过 NS2 仿真软件建立多信道实验场景, 计算系统实际吞吐量. 实验结果表明, 多信道理论仿真结果与实际吞吐量基本吻合; 随着认知用户信道数的增加, 系统的饱和吞吐量近似成线性增加.

关键词: 802.11; 多信道; 认知用户; 饱和吞吐量

中图分类号: TN929.532

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)05-0732-04

Throughput analysis of multi-channel cognitive users

TAN Xue-zhi, XU Gui-sen, LIU Yu-tao, LIU Chun-hong

(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China, xuguisen@hitcrc.hit.edu.cn)

Abstract: In order to compute the change of system saturation throughput in cognitive network, a three dimensional Markov chain model was presented to analyze the saturation throughput of cognitive users, with the assumption of finite number of cognitive users and ideal channel conditions. The model was applied to two access mechanisms proposed by IEEE 802.11 to compute the theoretical value of saturation throughput between cognitive users. A multi-channel simulation platform was built by NS2 to compute the actual saturation throughput. Compared with simulation results, the model is extremely accurate in predicting the system throughput and the system throughput increases linearly with the number of cognitive users' channels.

Key words: 802.11; multi-channel; cognitive user; saturation throughput

认知无线电技术以其高效利用频谱资源被认为是解决频谱资源贫乏问题的最佳方案^[1]. 认知无线电的原则是, 认知用户在不干扰主用户通信的情况下进行通信, 即当认知用户检测到主用户通信时, 必须选择其他信道进行通信或不通信^[2-3]. 基于以上考虑, 以往的单信道系统吞吐量的计算模型已不能满足认知网络吞吐量的计算需要, 因此本文在文献[4]的基础上结合认知网络特点提出一种新的多信道马尔科夫模型, 该模型使用 IEEE802.11DCF 两种接入机制, 针对计算认知用户间饱和吞吐量而设计. 为了验证该模型的准确性, 本文在 NS2 仿真软件的基础上对其信道、移动节点和路由协议部分的代码进行修改, 实

现了本文提出多信道模型, 修改后的移动节点最多可在 10 条信道上通信, 其中每条信道又都遵守 802.11DCF 提供的两种接入机制. 根据不同数量认知用户计算理论吞吐量, 同时针对同一场景使用 NS2 仿真验证模型的准确性.

1 认知用户理论吞吐量计算

1.1 数据包传输概率

为了使数据包接入信道, IEEE802.11 使用一种载波监听多路访问机制, 该协议采用二进制指数退避算法, 同时提供两种信道接入机制—基本机制和 RTS/CTS 接入机制^[5]. 基本接入机制指当发送方准备发送数据包时, 立刻传输数据包, 接收方收到数据包后回复一个确认信息 (ACK)^[6]. RTS/CTS 机制是一种四次握手机制, 发送方准备发送数据前, 先发送一个请求发送帧 (RTS); 接收方收到该帧后回复一个允许发送帧 (CTS); 发送

方收到该帧后会发送数据包; 接收方收到数据包后回复确认信息(ACK). 采用这种机制是考虑到数据包很大时在传输过程中一旦发生碰撞, 会给系统性能带来巨大影响. 该机制还可以避免隐藏终端的存在^[7-8].

二进制指数退避算法用在多用户同时准备发送数据包时. 当 N 个用户同时准备发送数据包时, 协议规定他们需要在当前的退避窗中随即选择一个退避数存入退避定时器中, 当退避定时器超时后才可以发送数据. 如果在等待发送的过程中发现信道繁忙, 则要停止退避定时器, 直到信道空闲后继续计数. 对于在一次发送竞争失败的用户, 他的退避窗将自动扩大一倍, 直到成功发送一次数据包后才能恢复到原始退避窗大小^[9-10].

根据 802.11DCF 提出的情况设计一个饱和吞吐量的场景. 假设在一个拥有 N 个认知用户的通信场景中(N 为偶数), 每个用户都要连续地发送数据包, 即 N 个用户组成 $N/2$ 条饱和数据流, 每个用户具有 $(n+1)$ 个信道. 在数据包发送的竞争阶段, 认知用户采用 802.11 的接入机制首先在 0 信道上进行竞争, 当 0 信道竞争窗达到最大值时, 自动进入下一条信道重新发起竞争, 每条信道的竞争窗最多可增加 $(m+1)$ 次. 当认知用户在最后一条信道的最后一次增加竞争窗仍无法成功发送数据包后, 竞争窗将不再增加, 一旦某个用户成功的传输了数据包那么他的状态自动回到初始状态. 该过程如图 1 所示.

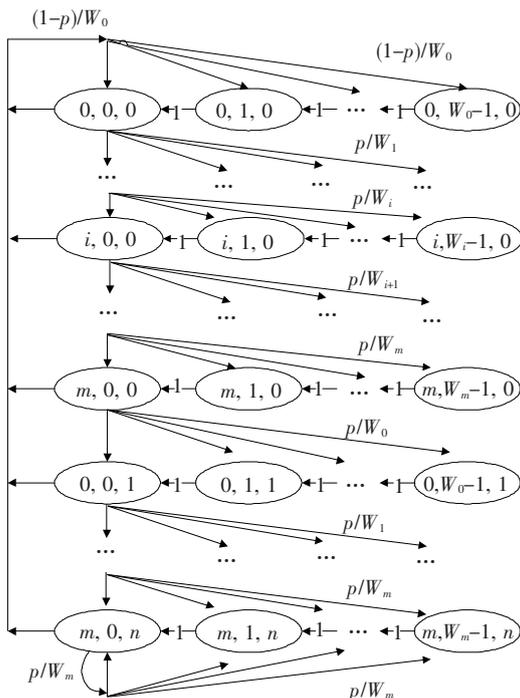


图 1 多信道单节点状态模型

令 W 代表最小竞争窗宽度, m 代表竞争窗增

加的最大次数, 则有 $W_{\max} = 2^m W$. 令 p 代表当用户竞争过程中数据包发生碰撞的概率^[3]. 图 1 描述出整个网络中单个源节点的状态变化情况. 若将其描述为一个时间离散的三维马尔科夫链 $\{s(t), b(t), q(t)\}$ 过程, 同时可以得到 5 个一步转移概率状态方程, 如公式(1) 所示. 方程(1a) 表示在每次等待竞争的过程中, 退避定时器都会自动减少; 方程(1b) 表示在每次成功地发送一个数据包后用户会转移到不同初始状态的概率; 其他方程都是描述竞争失败后的状态变化的概率.

$$\begin{aligned}
 p\{i, k, l | i, k+1, l\} &= 1, & k \in (0, W_i - 2), l \in (0, n), i \in (0, m); & \quad (1a) \\
 p\{0, k, 0 | i, 0, l\} &= (1-p)/W_0, & k \in (0, W_0 - 1), l \in (0, n), i \in (0, m); & \quad (1b) \\
 p\{i, k, l | i-1, 0, l\} &= p/W_i, & k \in (0, W_i - 1), l \in (0, n), i \in (1, m); & \quad (1c) \\
 p\{0, k, l | m, 0, l-1\} &= p/W_0, & k \in (0, W_0 - 1), l \in (1, n); & \quad (1d) \\
 p\{m, k, n | m, 0, n\} &= p/W_m, & k \in (0, W_i - 2). & \quad (1e)
 \end{aligned}$$

令 $b(t)$ 代表任意一个用户的退避定时器, $b_{i,k,l}$ 表示该用户现在所处的状态. 其中 i 表示在当前信道退避的次数; k 表示在该退避状态下随即选择的退避数; l 表示当前竞争的信道号. 为了求解方程(1), 需要将各状态都由 $b_{0,0,0}$ 表示出来, 令 $b_{i,k,l} = \lim_{t \rightarrow \infty} p\{s(t) = i, b(t) = k, q(t) = l\}$, $i \in (0, m), k \in (0, W_i - 1), l \in (0, n)$, 则有

$$\begin{cases}
 b_{i,k,l} = (W_i - k) \cdot W_i^{-1} p^{(ml+i)} b_{0,0,0}, \\
 b_{m,0,n} = p \cdot (1-p)^{-1} b_{m-1,0,n} = \\
 p \cdot (1-p)^{-1} p^{(mn+m-1)} b_{0,0,0}.
 \end{cases}$$

各发送节点状态都已由 $b_{0,0,0}$ 表示, 再结合式(2) 可以求出 $b_{0,0,0}$ 的值, 如式(3) 所示.

$$\sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} \sum_{l=0}^n b_{i,k,l} = 1, \quad (2)$$

$$b_{0,0,0} = 2 \cdot \left(\sum_{l=0}^{n-1} p^{ml} + \frac{p^{mn+1}}{1-p} \right)^{-1} \left[W \frac{\sum_{i=0}^m (2p)^i}{1-2p} + \frac{p^{m+1}-1}{p-1} \right]^{-1}. \quad (3)$$

令 τ 表示一个发送节点在全部信道上可能发送的概率总和, 其表达式为

$$\tau = \sum_{i=0}^m \sum_{l=0}^n b_{i,0,l} = b_{0,0,0} \frac{1-p^{m+1}}{1-p} \left(\frac{1-p^{mn}}{1-p^m} + \frac{p^{mn+1}}{1-p} \right). \quad (4)$$

同时 τ 与 p 还具有如下的关系:

$$p = 1 - (1-\tau)^{n-1}. \quad (5)$$

即发生碰撞的概率 p 为至少有两个用户准备发送数据包的概率. 由式(4) 和式(5) 就可求出

参数 p 和 $\tau^{[4]}$.

1.2 吞吐量计算

令 S 表示系统归一化吞吐量的值,其含义为成功发送数据包所花费的时间与总通信时间的比值.为了具体表示系统归一化吞吐量,用变量 P_{tr} 代表在传输过程中至少一个用户可以发送的概率, P_s 表示至少一个用户处于发送状态同时发送成功的概率,二者表达式如下:

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^N,$$

$$P_s = n\tau(1 - \tau)^N \cdot P_{tr}^{-1}.$$

吞吐量表达式可以进一步表示为

$$S = \frac{P_s P_{tr} E[P]}{(1 - P_{tr})\delta + P_{tr} P_s T_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c} \quad (6)$$

其中: $E[P]$ 表示负载的数据包平均长度,则在单位时间内成功发送数据包的长度为 $P_{tr} P_s E[P]$; $1 - P_{tr}$ 表示单位时间内空闲的时间长度; δ 表示发送或接收延迟时间; T_s 表示单位时间内信道中成功发送数据包的平均时间; T_c 表示单位时间内信道中发生碰撞的平均时间.

下面将根据 802.11DCF 提供的两种接入机制具体分析系统的吞吐量.首先分析基本接入机制成功接入的情况,如图 2 所示.

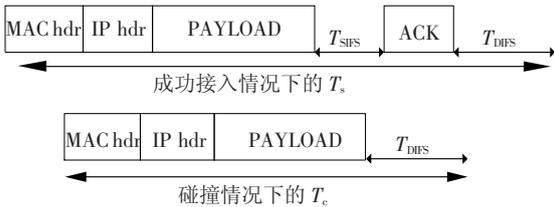


图 2 基本接入机制下的 T_s 和 T_c 情况

令 $H = H_{IP} + H_{MAC}$ 代表数据包的头, $E[P^*]$ 代表发生碰撞时最长的数据包的平均长度,但在分析或仿真中,采用相同长度的负载数据包,即 $E[P^*] = E[P] = P$; T_{SIFS} 表示由 802.11 协议规定在传输一些连续数据包间隙的等待时间; T_{DIFS} 表示连续数据包传输结束后的等待时间;

表 1 仿真实验参数表

仿真参数	字节长度/B				信道速率/			$\delta/\mu s$	$T_{SIFS}/\mu s$	$T_{DIFS}/\mu s$
	负载包	IP 头	MAC 头	ACK 帧	RTS 帧	CTS 帧	($Mbit \cdot s^{-1}$)			
基本接入参数值	920	20	52	38			1	1	10	50
RTS/CTS 参数值	920	20	52	38	44	44	1	1	10	50

图 4 为使用 MATLAB 和 NS2 仿真软件针对 $N = 6, m = 3, W = 1, n = 3$ 时进行的基本接入方式和 RTS/CTS 方式的仿真.由图可知,负载量是随着时间的增加而增加的,由于每个节点具有 3 条信道,因此在 150 s 之前 6 个节点可以充分利用 3 条信道进行通信,此时 3 条信道达到饱和,但当负载量继续增加,数据包就会出现碰撞、丢弃等情况,系统吞吐量趋于平缓,如果这种碰撞进一步加剧还会降

T_{ACK} 指传输 ACK 应答数据包所需要的时间.所以基本接入机制下的 T_s 和 T_c 可用下式表示:

$$\begin{cases} T_s = H + E[P] + T_{SIFS} + \delta + T_{ACK} + T_{DIFS} + \delta, \\ T_c = H + E[P^*] + T_{DIFS} + \delta. \end{cases} \quad (7)$$

分析系统采用 RTS/CTS 接入机制下的网络吞吐量,在这种情况下碰撞只会出现在 RTS 帧上,如图 3 所示.

从图 3 中可以得到此时系统的 T_s 和 T_c ,即

$$\begin{cases} T_s = T_{RTS} + T_{SIFS} + \delta + T_{CTS} + T_{SIFS} + \delta + \\ H + E[P] + T_{SIFS} + \delta + T_{ACK} + T_{DIFS} + \delta, \\ T_c = T_{RTS} + T_{DIFS} + \delta. \end{cases} \quad (8)$$

其中: T_{RTS} 表示传输 RTS 数据包所需要的时间; T_{CTS} 表示传输 CTS 数据包所需要的时间.结合式 (8) 和式 (6) 即可计算出此时系统的吞吐量.



图 3 RTS/CTS 接入机制下的 T_s 和 T_c 情况

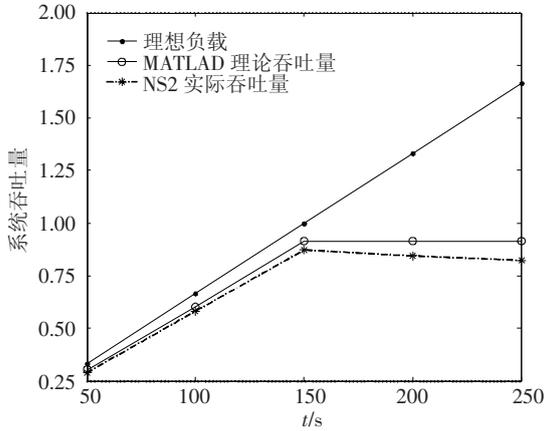
2 实验验证

本文采用 MATLAB R2008a 和 NS2 2.29 对模型的理论 and 实际吞吐量进行计算,设场景中认知用户的个数为 N ,在 1000×600 的范围内组成 $N/2$ 条饱和和数据流.在使用 MATLAB 仿真时,采用与文献[4]中相同的仿真参数,而由于 NS2 仿真软件的一些局限性(默认每次最大发包长度为 1000 B),本文在设计饱和吞吐量时将负载包长度设定为 920 B,再加上 IP 头和 MAC 头后近似为 1000 B,最后调节 NS2 网络层 1 s 发送 131 个数据包,以达到文献[4]中提到的仿真场景的参数标准,表 1 为实验中使用的参数列表.

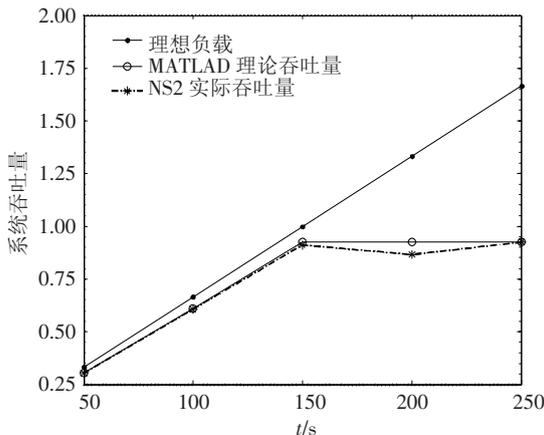
低系统的吞吐量,如图 4(a) 在 250 s 的情况.图 4(b) 为采用了 RTS/CTS 接入机制时系统吞吐量的变化情况,由图可见由于采用了 RTS/CTS 机制使得碰撞发生在短数据帧之间,因此系统饱和吞吐量略高于基本接入机制时的系统饱和吞吐量;仿真结果还显示,对于同一场景采用 MATLAB 计算出的理论值与 NS2 计算出的实际值之间误差不超过 0.1,可见该马尔科夫模型较准确地描述了多信道

认知用户间通信状态的变化情况.

图(5)为不同节点使用不同信道数目时的系统饱和吞吐量情况, 容易发现系统的饱和吞吐量是随着信道数目的增加近似成线性增长的, 但通信量一旦达到饱和状态, 除非增加节点的信道数量, 改变其他任何参数都不会大幅度提升系统吞吐量. 这一结果说明多信道在未来的认知无线电通信领域应用的重要性, 认知用户不但可以选择不同信道来避开对主用户的干扰, 同时可以利用多信道增加系统的吞吐量.



(a) 基本接入机制系统吞吐量变化曲线



(b) RTS/CTS 接入机制系统吞吐量变化曲线

图 4 系统吞吐量随理想负载增加的变化情况

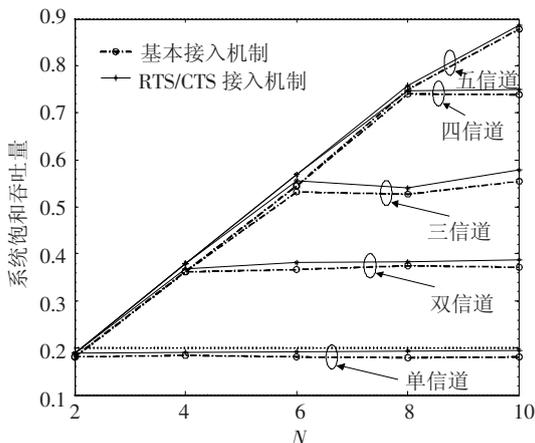


图 5 多信道系统的吞吐量变化情况

3 结 论

通过 MATLAB 和 NS2 仿真软件对同一场景的理论和实际饱和吞吐量计算的实验结果十分接近, 由此证明本文提出的马尔科夫模型能够较准确的反映多信道网络饱和吞吐量与认知用户数和网络负载之间的变化关系; 同时采用了多信道的认知无线电用户不但可以有效避免对主用户的干扰, 还可以增加认知网络的吞吐量.

参考文献:

[1] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: Making software radios more Personal [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4):13-18.

[2] DANESHGARAN F, LADDOMADA M, MESITI F. Saturation throughput analysis of IEEE 802.11 in the presence of non ideal transmission channel and capture effects [J]. IEEE Transactions on Communications, 2008, 56(7):1178-1188.

[3] VAGENAS E, PASCHOS G, KOTSPOULOS S. A Saturation throughput analysis for 802.11e MAC protocol incorporating the Arbitrary Interframe Spacing effect [J]. Latin America Transactions, 2007, 5(8):626-630.

[4] BIANCHI G. IEEE 802.11-saturation throughput analysis [J]. IEEE Communications Letters, 1998, 2(12):318-320.

[5] INAN I, KECELI F, AYANOGLU E. Saturation throughput analysis of the 802.11e enhanced distributed channel access function [C]//Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on. Glasgow, Scotland, UK: IEEE Communications Society, 2007:409-414.

[6] MEDEPALLI K, TOBAGI F A. Throughput analysis of IEEE 802.11 wireless LANs using an average cycle time approach [C]//Proceedings of the IEEE GLOBECOM. St. Louis, MO: [s. n.], 2005:3007-3011.

[7] 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.

[8] JI-HOON Y. Throughput analysis of IEEE 802.11 WLANs with Automatic Rate Fallback in a lossy channel [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(2):689-693.

[9] TAEJOON K, JONG-TAE L. Throughput analysis considering coupling effect in IEEE 802.11 networks with hidden stations [J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(3):175-177.

[10] SENTHILKUMAR T D, KRISHNAN A, KUMAR P. New approach for throughput analysis of IEEE 802.11 in AdHoc networks [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Control Communication and Automation (Indicon '08). IIT Kanpur, India: [s. n.], 2008:148-153.

(编辑 张 宏)