

IEEE 802.11 无线局域网的 TCP 性能分析和改进

赵力强 张海林

(西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室 西安 710071)

摘 要 在分析 IEEE 802.11 无线局域网媒体接入控制(MAC)协议和传输控制协议(TCP)性能的基础上,提出了改进的 MAC 协议;BDCF. IEEE 802.11 分布式协调功能(DCF)只支持前向数据传输,即数据帧只能由发送方传送到接收方. BDCF 利用 IEEE 802.11 点协调功能(PCF)提供的数据帧格式,可以实现信息的双向传输,即收发双方相互交换数据帧. 因此 BDCF 更适合传输面向连接的 TCP 业务. BDCF 与 IEEE 802.11 完全兼容. 仿真结果表明: BDCF 可以提高网络吞吐量和降低数据帧的时延,理论分析结果基本准确.

关键词 无线局域网;媒体接入控制;传输控制协议;分布式协调功能;点协调功能

中图法分类号 TP393

TCP Performance Analysis and Enhancement of IEEE 802.11 WLAN

ZHAO Li-Qiang ZHANG Hai-Lin

(State Key Laboratory of Integrate Services Network, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract Based on media access control (MAC) protocol and transport control protocol (TCP) performance analysis of IEEE 802.11 WLAN, a novel MAC protocol, BDCF, is proposed in this paper. IEEE 802.11 distributed coordination function (DCF) only supports transmission in the forward direction from senders to receivers. In BDCF, data frames are transmitted in bi-direction, from senders to receivers and from receivers to senders, by means of a data frame type defined in IEEE 802.11 point coordination function (PCF). Hence, BDCF is more suitable than DCF to transmit TCP traffic over WLAN. BDCF is fully compatible with IEEE 802.11. Simulation results show that BDCF can improve the network throughput and decrease delay of data frames. Moreover, the proposed analytical model is accurate.

Keywords WLAN; Medium Access Control (MAC); Transmission Control Protocol (TCP); Distributed Coordination Function (DCF); Point Coordination Function (PCF)

1 引 言

IEEE 802.11 协议是目前最具影响力的无线局域网(WLAN)标准^[1]. IEEE 802.11 只考虑物理层(PHY)和媒体接入控制层(MAC),未考虑上层协议的影响. MAC 协议主要包括基本的分布式协调

功能(DCF)和可选的点协调功能(PCF). 对 WLAN 的 TCP 性能研究是目前的一个热点^[2~7]. TCP 层的应答机制要求各站点接收数据包后返回确认报文(ACK 包). 后向传输的 ACK 包(从接收方到发送方)与前向传输的数据包(从发送方到接收方)竞争信道,可能造成信道拥塞. 某些增强型协议可以改善 TCP 性能,但只有在满足某些假设条件下才能实

现^[7]。因此,本文提出改进型 MAC 协议: BDCF。BDCF 协议可以利用 PCF 提供的数据帧格式,实现信息的双向传输,即收发双方相互交换数据帧。BDCF 更适合传输面向连接的 TCP 业务,而且 BDCF 与 IEEE 802.11 完全兼容。

2 IEEE 802.11 协议

DCF 主要基于带碰撞退避的载波检测多址接入协议(CSMA/CA)和时隙制退避策略^[1]。为了解决隐蔽终端问题,DCF 采用 RTS/CTS 握手机制,如图 1 所示。发送方首先发送 RTS 控制帧,在时间间隔 SIFS 后收到接收方返回的 CTS 控制帧;然后发送方发送数据帧,接收方正确接收数据帧后,返回 ACK 控制帧。各相邻站点监听 RTS/CTS 帧帧头的 Duration 字段。如果监听到的值大于自己当前的网络分配矢量(NAV)值,就用该信息更新各自的 NAV(NAV 是一个倒计时的计数器),只有当 NAV 的值为零时,各站点才能竞争信道。这样,各站点可以实现虚拟载波检测功能。

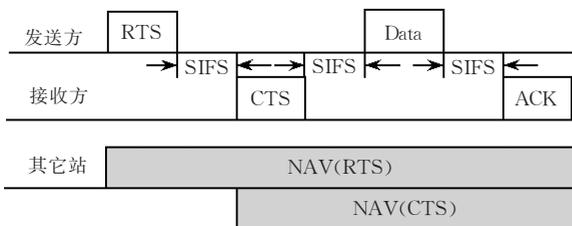


图 1 RTS/CTS 机制

PCF 主要基于轮询机制。接入点依次轮询参与无竞争业务的各站点同时发送下行数据帧 D,被轮询到的站点在 SIFS 后发送上行数据帧 U。为了提供 MAC 层确认业务,可使用 U 帧帧头的帧控制(frame control)字段对 D 帧进行确认。D 帧和 U 帧属于两种不同的帧类型:Data 和 Data+CF-ACK^[1]。

3 BDCF 协议

BDCF 协议描述如下:

TCP 向上层协议和应用程序提供面向连接的服务:接收方在正确接收发送方的数据包后,立即返回 ACK 包;如果发送方在规定时间内没有收到 ACK 包,则重传该数据包。后向传输的 ACK 包在 MAC 层被打包成数据帧,然后根据 DCF 协议与前向传输的数据帧竞争信道。ACK 包的出现使网络竞争加剧,在严重的情况下,会导致网络堵塞。

在 DCF 中,发送方竞争信道成功后发送自己的数据帧,而接收方只返回 ACK 帧并不发送自己的数据帧。也就是说,DCF 只支持有效信息(不包括控制帧)的前向传输。在实际使用中,收发双方都有数据需要发送,包括接收方的 ACK 包。因此,本文提出 BDCF 协议,以支持有效信息的双向传输,如图 2 所示。

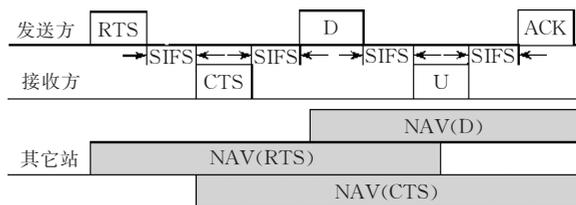


图 2 BDCF 的基本原理

发送方首先发送 RTS 帧,其 Duration 字段的值为 $RTS + SIFS + CTS + SIFS + D + SIFS + ACK$,D 是发送方的数据帧长度。其它站点根据该值设置各自的 NAV。接收方返回 CTS 帧,其 Duration 字段的值为 $CTS + SIFS + D + SIFS + U + SIFS + ACK$,U 是接收方的数据帧长度。其它站点发现 CTS 帧的 Duration 值大于自己当前的 NAV 值,就利用该值更新各自的 NAV。发送方收到 CTS 帧后发送数据帧 D。接收方正确接收 D 帧后发送 U 帧,U 帧包含对 D 帧的确认。发送方收到 U 帧后返回 ACK 帧。U 和 D 帧分别属于两种不同的数据帧类型,可以通过 MAC 帧头的帧控制(frame control)字段来区别。帧控制字段的子类型字段用于说明帧的功能:D 帧的子类型字段为 0000,其帧功能为 Data;U 帧的子类型字段为 0001,其帧功能为 Data+CF-ACK^[1]。在 IEEE 802.11 中,只有在 PCF 中才会出现后续数据帧对前一个数据帧进行确认。BDCF 协议将这种功能扩展到 DCF。

发送方的 RTS 帧的 Duration 字段不包含 U 帧的发送时间,但是发送方的 D 帧和接收方的 CTS 帧的 Duration 字段包含 U 帧的发送时间,因此,发送方周围的其它站点根据 D 帧和 CTS 帧更新各自的 NAV,不会干扰接收方发送 U 帧。即使其它站点未能及时更新自己的 NAV,在 NAV 值为 0 后,各站点首先检测信道是否空闲,信道空闲 DIFS 后竞争信道($DIFS > SIFS$)。此时,接收方正在发送 U 帧,各站点发现信道忙碌,进入退避状态,也不会干扰接收方的发送。总之,只要完成了 RTS/CTS 帧的交换,发送方和接收方就预约了信道,D 帧和 U 帧的发送都不会与其它站点发生冲突。

如果发送方不支持 BDCF, 当接收方发送的 U 帧到达发送方后, 发送方也可以根据 PCF 正确识别出 U 帧的帧格式为 Data+CF-ACK, 返回 ACK 帧. 因此, 不论发送方是否支持 BDCF, 只要接收方支持 BDCF, 接收方就可以引导发送方在一次 RTS/CTS 会话中完成信息的双向传输. 当然, 如果接收方不支持 BDCF, 自然无法实现信息的双向传输.

4 BDCF 性能分析

当各站点的业务负载较轻时, DCF 可以满足系统要求. 但是当各站点的业务负载较重时, ACK 包的出现使网络竞争加剧, 可能导致网络堵塞. 因此, 本文分析系统饱和(即各站点始终有数据发送)时 BDCF 的性能. 考虑 n 个站点, 假设各站点每次发送数据帧时, 数据帧的碰撞概率 p 与过去的碰撞次数无关, 即碰撞概率恒定且相互独立. 本文采用二维 Markov 链 $\{s(t), b(t)\}$ 以描述某个站点的竞争过程, 如图 3 所示^[8]. $s(t)$ 和 $b(t)$ 分别表示该站点在时刻 t 的退避级数和退避时隙计数器的取值. $s(t) \in [0, m], m$ 代表最大退避级数; $b(t) \in [0, W_j - 1], W_j = 2^j W_0, j \in [0, m]$.

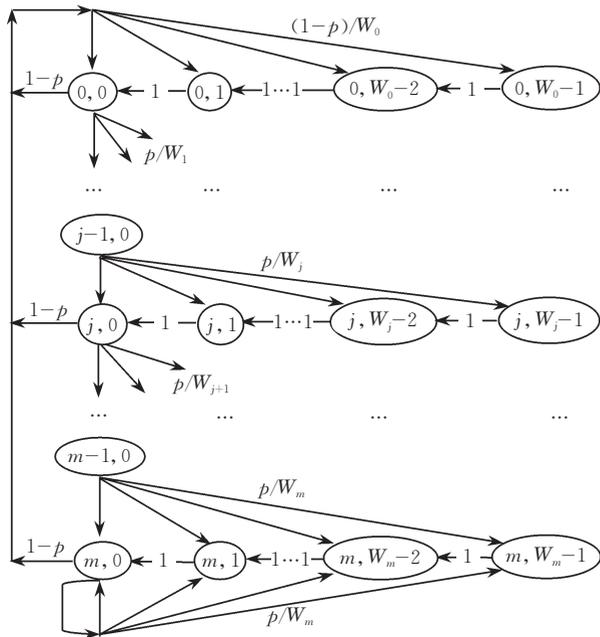


图 3 BDCF 竞争模型

令 $b_{j,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = j, b(t) = k\}, 0 \leq j \leq m, 0 \leq k \leq W_j - 1$. 由图 3 可得

$$b_{j-1,0} \cdot p = b_{j,0} \Rightarrow b_{j,0} = p^j b_{0,0}, \quad 1 \leq j \leq m-1 \quad (1)$$

$$b_{m-1,0} \cdot p = (1-p)b_{m,0} \Rightarrow b_{m,0} = \frac{p^m}{1-p} b_{0,0} \quad (2)$$

$$b_{j,k} = \frac{W_j - k}{W_j} b_{j,0}, \quad 0 \leq j \leq m, 0 \leq k \leq W_j - 1 \quad (3)$$

所有的 $b_{j,k}$ 都可以用 $b_{0,0}$ 和 p 表示, 而且

$$\sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{W_j-1} b_{j,k} = 1, \text{ 因此可以求出 } b_{0,0}.$$

不论退避级数是多少, 只要退避计时器为零, 该站点就发送数据. 因此, 该站点在任意时隙的发送概率为

$$\tau = \sum_{j=0}^m b_{j,0} = \frac{1-2p}{(1-2p)(W_0+1) + pW_0(1-(2p)^m)} \quad (4)$$

在该站点发送数据帧的时候, 如果剩余 $n-1$ 个站点中至少有一个站点也发送数据, 则该数据帧将发生碰撞. 所以数据帧的碰撞概率为

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

求解式(4), (5) 构成的二维非线性方程组, 可以得到 τ 和 p .

在稳态下, 各站点的发送概率都为 τ . 所以, 在一个时隙中至少有一个站点发送数据的概率为

$$P_{tr} = 1 - (1-\tau)^n \quad (6)$$

在有数据帧发送的条件下, 有且仅有一个数据帧发送的概率为

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1 - (1-\tau)^n} \quad (7)$$

因此, 一个时隙可能包括三种状态: 信道空闲(概率为 $1 - P_{tr}$, 时间为 σ); 成功传输数据帧(概率为 $P_{tr}P_s$, 平均传输时间为 T_s); 数据帧碰撞(概率为 $P_{tr}(1 - P_s)$, 平均时间长度为 T_c). 由图 2 可得

$$\begin{cases} T_s = RTS + SIFS + CTS + SIFS + D + \\ \quad SIFS + U + SIFS + ACK \\ T_c = RTS \end{cases} \quad (8)$$

数据帧包括帧头和有效载荷, 假设发送方和接收方数据帧的平均有效载荷分别为 E_U 和 E_D . 则归一化的网络吞吐量定义为

$$S = \frac{\text{一个时隙内有效载荷的平均传输时间}}{\text{时隙的平均长度}} = \frac{P_{tr}P_s(E_U + E_D)}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c} \quad (9)$$

由于帧碰撞、控制帧和帧头带来的附加网络开销, 吞吐量与每次帧交换传输的有效信息紧密相关. 每次帧交换传输的有效信息越大, 吞吐量越大. DCF 只支持有效信息的前向传输, 每次帧交换传输的有效信息只包括发送方数据帧的有效载荷; BDCF 支持有效信息的双向传输, 每次帧交换传输的有效信息包括发送方和接收方数据帧的有效载荷. 显然, BDCF 的吞吐量优于 DCF.

5 仿真结果和分析

本文采用计算机仿真 BDCF 的性能,仿真中未考虑信道误码与传播时延. TCP 和 IP 适配头都为 20Byte,其余参数服从 IEEE 802.11b 协议,如表 1 所示. 站点数从 10 个增加到 100 个,各站点始终有数据发送. 假设发送方和接收方数据帧的有效载荷(E)大小相同. 在不同有效载荷条件下,网络吞吐量和数据帧的平均时延与站点数的关系如图 4~图 9 所示.

表 1 仿真参数

信道速率	σ	SIFS	DIFS	W_0	m	RTS	CTS	ACK
11Mb/s	$20\mu\text{s}$	$10\mu\text{s}$	$50\mu\text{s}$	16	6	20Byte	14Byte	14Byte

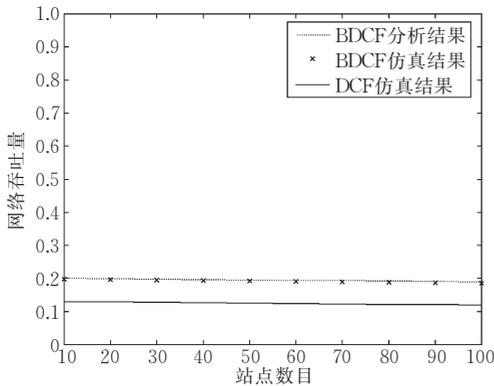


图 4 网络吞吐量($E=127\text{Byte}$)

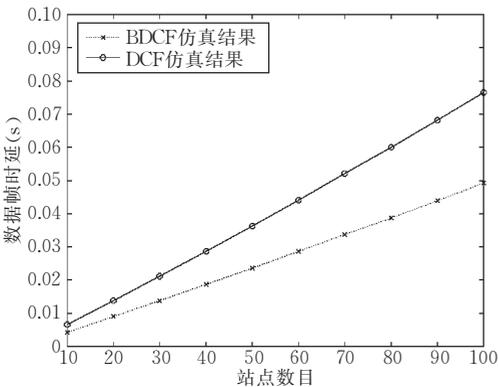


图 5 数据帧平均时延($E=127\text{Byte}$)

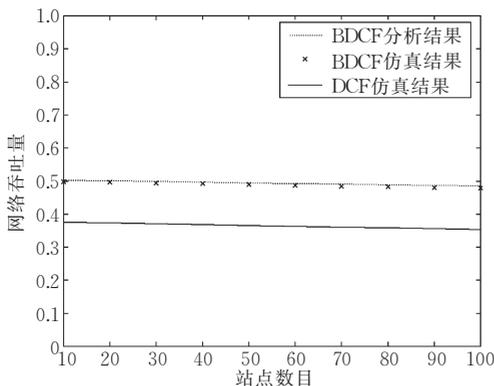


图 6 网络吞吐量($E=511\text{Byte}$)

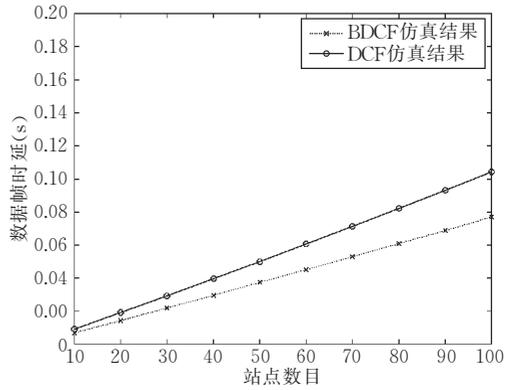


图 7 数据帧平均时延($E=511\text{Byte}$)

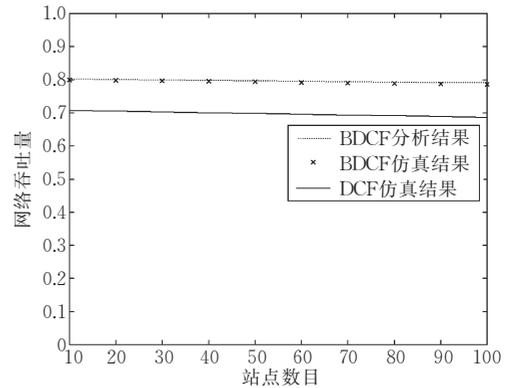


图 8 网络吞吐量($E=2047\text{Byte}$)

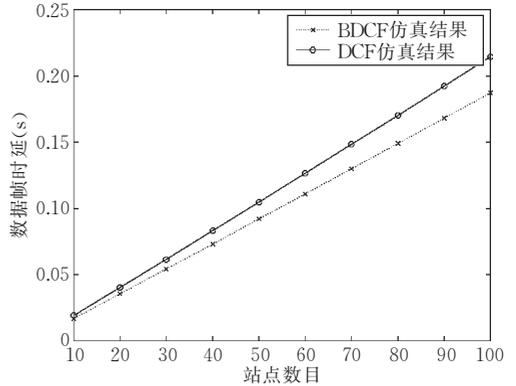


图 9 数据帧平均时延($E=2047\text{Byte}$)

可以看出,BDCF 的吞吐量和数据帧时延始终优于 DCF. 有效载荷越大,BDCF 的吞吐量优势越明显;站点数越多,BDCF 的数据帧时延优势越大. 此外,仿真结果与理论分析结果非常接近. 说明本文提出的理论分析模型是合理的.

有效载荷越大,吞吐量越大. 当有效载荷为 2047Byte(IEEE 802.11 规定的数据帧最大有效载荷)时,BDCF 的吞吐量可以达到 80%,而 DCF 的吞吐量只有 70%.

随着站点增多,碰撞加剧,数据帧的平均时延增加,网络吞吐量略有下降. DCF 只支持数据帧的前向传输,相互通信的双方需要分别竞争信道,发送各

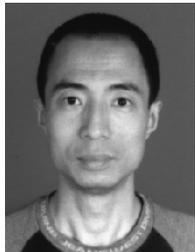
自的数据帧. BDCF 支持数据帧的双向传输,任何一方成功竞争信道后,另一方就可以在后向信道发送自己的数据帧,无需再竞争信道. 因此, BDCF 可以减少竞争,降低数据帧的平均时延.

6 结 论

本文在综合考虑 WLAN 的 MAC 协议和 TCP 协议的基础上,提出 BDCF 协议以支持数据帧的双向传输,而且 BDCF 与 DCF 完全兼容. 仿真结果表明: BDCF 可以提高系统吞吐量和降低数据时延,性能优于 DCF.

参 考 文 献

- 1 IEEE standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, ISO/IEC 8802-11; 1999(E), Aug. 1999
- 2 Gerla M., Bagrodia R., Zhang L., Tan K., Wang L.. TCP over wireless multi-hop protocols: Simulation and experiments. In: Proceedings of the ICC'99, Vancouver, 1999, 1089~1094
- 3 Xylomenos G., Polyzos G. C.. TCP and UDP performance over a wireless LAN. In: Proceedings of the IEEE INFOCOM'99, Piscataway, 1999
- 4 Barakat C., Altman E., Dabbous W.. TCP performance in a heterogeneous network: A survey. IEEE Communications Magazine, 2000, 38(1): 40~46
- 5 Xu S., Saadawi T.. Does the IEEE 802.11 MAC protocol work well in multihop wireless Ad Hoc network. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(6): 130~137
- 6 Wu Hai-Tao, Peng Yong, Long Ke-Ping, Cheng Shi-Duan, Ma Jian. Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: Analysis and enhancement. In: Proceedings of the IEEE GLOBECOM 2002, Taipei, 2002
- 7 Wu Hai-Tao, Peng Yong, Long Ke-Ping, Cheng Shi-Duan, Ma Jian. Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: Analysis and enhancement. In: Proceedings of the IEEE INFOCOM 2002, New York, USA, 2002, 599~607
- 8 Bianchi G.. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3): 535~547



ZHAO Li-Qiang, born in 1971, Ph. D., senior engineer. His research interests include wideband wireless communications, wireless LAN, etc.

ZHANG Hai-Lin, born in 1961, professor. His research interests include multimedia communications, wireless high data rate digital transmission, etc.

Background

The project is Research on Key Technologies of QoS over WLAN.

In recent years, Wireless Local Area Network (WLAN) has been widely used as one of the essential technologies to provide broadband wireless local access, and the performance analysis and improvement of WLAN has attracted a lot of research interests. IEEE 802.11 is one of the most influential standards of WLAN. Its fundamental Medium Access Control (MAC) mechanism——DCF, only supports best-effort service, and is unaware of Quality of Service (QoS). However, there is an increasing demand that multimedia services with different QoS requirements will be supported by the future WLAN. Different multimedia services have different QoS requirements on bandwidth, delay, jitter and packet loss rate etc. Hence, in order for a WLAN system to support multimedia applications, its MAC protocol must support

some degree of QoS differentiation. To meet this need, recently, IEEE 802.11e Task Group is specifying an Enhanced DCF (EDCF) to support QoS differentiation over WLAN. One possible solution is to provide a good priority scheme by differentiating the contention parameters, thereby achieving QoS differentiation. However, current works only consider QoS requirements on delay. Hence, authors' target is to provide integrated QoS differentiation, including bandwidth, delay, jitter and packet-loss-rate differentiation.

Authors have published over 10 papers in refereed journals and conferences. For example,

To provide integrated QoS differentiation in WLAN, authors studied TCP, IP and MAC performance of WLAN and proposed modified protocols to enhance QoS over different layers. This paper studies the TCP performance of WLAN.