

一种应用于 WLAN 的混合双工 MAC 协议

吴皓威^{*①②} 邹玉涛^② 孙 晨^② 欧静兰^②

^①(重庆大学飞行器测控与通信教育部重点实验室 重庆 400044)

^②(重庆大学通信工程学院 重庆 400044)

摘 要: 全双工通信技术可以提高链路容量和频谱利用率, 会给现有无线局域网(WLAN)带来极大的变革。该文针对传统半双工 WLAN 向全双工 WLAN 发展的过程中多种双工站点共存的问题, 提出一种混合双工媒体接入控制(MAC)协议(HYD-MAC)。该协议合理设计了请求发送/清除发送(RTS/CTS)帧, 并根据网络隐藏节点状况和站点全双工能力, 自适应地选择最佳的传输模式, 包括同步全双工、异步全双工、条件半双工以及半双工等 4 种模式。给出了 HYD-MAC 协议在 4 种传输模式下的链路建立与数据传输流程, 分析了 HYD-MAC 的饱和吞吐量和介质访问时延等网络性能。仿真结果表明, 所提的 HYD-MAC 的性能优于传统半双工 DCF 协议, 特别在帧长较长、站点数较少、数据传输速率较低时, HYD-MAC 的性能提升效果更加明显; 与经典的全双工协议相比, HYD-MAC 协议通过牺牲极少的吞吐量和时延性能, 可以同时满足全双工、半双工以及混合双工网络的通信需求。

关键词: 无线局域网; 媒体接入控制; 全双工; 半双工; 混合双工

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)04-0840-07

DOI: 10.11999/JEIT160539

A Hybrid-duplex MAC Protocol for WLAN

WU Haowei^{*①②} ZOU Yutao^② SUN Chen^② OU Jinglan^②

^①(Key Laboratory of Aircraft Tracking Telemetry & Command and Communication, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

^②(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Full duplex communication technology can improve the link capacity and spectrum utilization, which brings great changes to the existing Wireless Local Area Network (WLAN). To Solve the compatibility issues in the process of half-duplex WLAN evolution to full-duplex WLAN, a Hybrid-Duplex MAC protocol (HYD-MAC) is proposed. According to the application scenarios and the full-duplex capability of the stations, the Request To Send/Clear To Send (RTS/CTS) frames are expanded and HYD-MAC can adaptively choose one from the four duplex modes, which are the synchronous full duplex, the asynchronous full duplex, the conditional half-duplex and half-duplex. The link establishment process of HYD-MAC protocol in four transmission modes are presented, and the network performance such as the network saturation throughput and medium access delay of the proposed protocol are analyzed. The results show that the HYD-MAC protocol can satisfy the communication requirements of the full-duplex network, half-duplex network and hybrid-duplex network at the same time by sacrificing little throughput and delay performance.

Key words: WLAN; MAC; Full-duplex; Half-duplex; Hybrid-duplex

1 引言

全双工通信技术可以实现同时同频发送和接收信号, 从而提高链路容量和频谱利用率, 是 5G 和未来无线通信系统的关键技术之一^[1,2]。近几年, 全

双工通信技术是无线局域网技术的研究热点, 研究的内容涉及物理层自干扰消除技术^[3-5]、全双工 MAC 协议^[6-8]、全双工中继^[9,10]等。目前全双工器件的价格较高, 体积也较大^[3], 但随着全双工自干扰抵消技术的进一步研究, 将给现有无线局域网(WLAN)带来极大的变革。WLAN 走向全双工是必然的趋势, 届时传统的半双工 MAC 协议已无法适应全双工 WLAN, 因此为了进一步提高 WLAN 的网络容量和频谱效率, 需要研究全双工 MAC 协议^[7]。

目前, 已有许多全双工 MAC 协议的研究成果。

收稿日期: 2016-05-26; 改回日期: 2016-09-23; 网络出版: 2016-12-02

*通信作者: 吴皓威 wuhaowei@cqu.edu.cn

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA7072014C), 重庆市院士基金项目(cstc2014yykfy90001)

Foundation Items: The National High-tech R&D Program (2015AA7072014C), The Chongqing Academician Fund Project (cstc2014yykfy90001)

文献[11]参考 IEEE802.11 标准设计和实现了全双工物理层与 MAC 层, MAC 层通过共同退避、帧头监听、虚拟退避等机制,将网络吞吐量提高 70%。文献[12]也提出一种基于 IEEE802.11 标准的全双工 MAC 协议,通过 RTS/CTS 机制在双向传输前进行信道预约,预约成功后进行同时同频双向传输,不仅提高了网络吞吐量,还能够有效兼容传统 RTS/CTS(Request To Send/Clear To Send)。文献[13]提出了一种基于 CSMA/CA 的分布式全双工 MAC 协议,通过所有的用户在发送数据的同时仍然保持感知和监听信道状态,这样降低了冲突和碰撞概率从而提高了信道利用率。但该协议中要求所有用户都工作在全双工模式。文献[14]提出一种非对称双工 MAC 协议,利用基于包对齐捕获效应机制和虚拟赤字轮询算法来建立全双工链路,提高网络的公平性和吞吐量,但该协议仅针对全双工接入点与半双工站点的应用场景。文献[15]提出的 ContraFlow 协议是一个经典的单信道全双工 MAC 协议,通过限制发送、忙音信号、权重列表等策略解决了双向链路建立过程中的隐藏终端和暴露终端问题,提高了协议的公平性和整体效率,但其只支持全双工的接入点和终端。

上述全双工 MAC 协议都能够提升 WLAN 的性能,但由于目前所有 WLAN 终端都工作在半双工模式,因此在传统半双工 WLAN 向全双工 WLAN 发展的过程中,全双工的接入点(Access Point, AP)需要能够兼容半双工终端和全双工终端。例如,如果网络中的 AP 使用全双工方式,而部分终端仍使用传统半双工方式,若此时强制使用全双工 MAC 协议将大大降低网络的效率。如果全双工 AP 在通信过程中能根据不同终端的双工能力,主动开闭相应的接收或发送通道来切换双工模式,这样在不增加设备成本、不降低网络性能的情况下,就能很好地解决多种双工站点共存的问题。

本文针对传统半双工 WLAN 向全双工 WLAN 发展的过程中多种双工站点共存的问题,提出一种混合双工 MAC 协议(HYD-MAC)。该协议根据网络隐藏节点状况和各站点的全双工能力,从同步全双

工、异步全双工、条件半双工以及半双工等4种模式中自适应地选择最佳的传输模式,以提高系统的吞吐量。并给出了HYD-MAC协议在4种传输模式下的链路建立与数据传输流程,分析了HYD-MAC的饱和吞吐量和介质访问时延等网络性能,进行了仿真验证和对比。仿真结果表明,所提的HYD-MAC的性能优于传统半双工DCF协议,特别在帧长较长、站点数较少、数据传输速率较低时,HYD-MAC的吞吐量与介质访问时延的提升效果更加明显;与经典的全双工协议ContraFlow协议相比,HYD-MAC协议通过牺牲极少的吞吐量和时延性能,可以同时满足全双工、半双工以及混合双工网络的通信需求。

2 HYD-MAC 协议

2.1 HRTS/HCTS 帧格式

为了适应不同的双工网络场景,实现全双工与半双工的有效兼容,同时尽可能地提高系统吞吐量性能,HYD-MAC 必须充分考虑网络条件、站点的全双工能力,尽可能地采用全双工模式进行通信。因此,HYD-MAC 协议以传统请求发送/清除发送(RTS/CTS)协议为基础,为了更好地发挥全双工的优势,对 IEEE802.11 定义的 RTS 帧与 CTS 帧进行了合理的扩充,形成了新的帧,分别称为 HRTS 帧与 HCTS 帧。

HRTS 与 HCTS 的帧格式如图 1 所示, HRTS 是在传统 RTS 帧的基础上增加了用于全双工通信的字段(Full-Duplex Header, FDH), FDH 长度为 1 bit, 只有一个 MODE 字段,说明接下来的通信过程采用的双工模式,1 代表全双工通信模式,0 代表半双工模式。HCTS 帧的 FDH 长度为 49 bit,其中 MODE 字段为 1 bit,其余 48 bit 为 ADDR 字段。ADDR 字段用于存放长度为 48 bit 的 MAC 地址,说明发送该 HCTS 的站点有数据发送给 ADDR 中的地址所表示的站点。

2.2 HYD-MAC 工作原理

2.2.1 自适应传输 HYD-MAC 将根据网络隐藏节点状况和各站点的全双工能力来自适应地选择合适的传输模式,包括同步全双工、异步全双工、条件

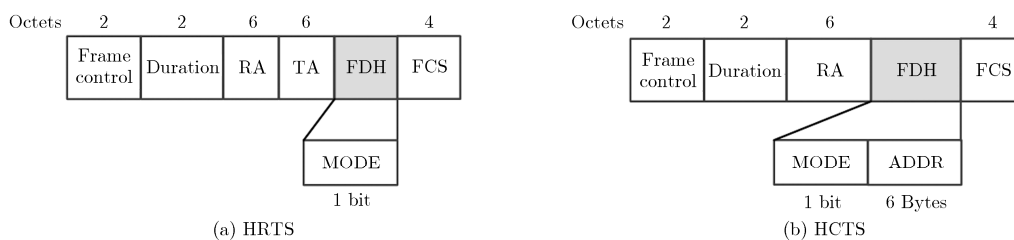


图 1 HRTS/HCTS 帧格式

半双工和半双工等 4 种模式,如图 2 所示。HYD-MAC 通过链路建立过程中的 HRTS/HCTS 帧,来判断网络中是否存在隐藏节点;通过 HRTS/HCTS 帧的 MODE 字段来判断各站点的双工能力。从而自适应地选择最佳的传输模式,以提高系统的吞吐量。因此, HYD-MAC 可以与 IEEE802.11 DCF 保持兼容,满足了全双工网络、半双工网络以及混合双工网络的通信需求。下面具体给出 4 种传输模式的适用条件。

(1)同步全双工传输模式: N_1 与 AP 同时具备全双工通信能力,且都在彼此的通信范围内,都有数据需要发送给对方,此时为了提高传输效率, HYD-MAC 将控制 N_1 与 AP 建立同步全双工传输链路,实现单信道同时收发。如图 2(a)所示。

(2)异步全双工传输模式: N_1 不具备全双工能力或 AP 没有数据需要发送给 N_1 ,因此没有必要建立同步全双工传输链路。为了充分发挥全双工通信的优势,提高系统的吞吐量,此时 AP 仍然可以发送数据给 N_2 , HYD-MAC 将控制 N_1, N_2, AP 建立如图 2(b)所示的异步传输模式。 N_1 将数据传输给 AP,同时 AP 发送数据给 N_2 ,其中 N_1, N_2 必须互为隐藏节点。

(3)条件半双工传输模式: N_1 不具备全双工能力或 AP 没有数据需要发送给 N_1 ,因此没有必要建立同步全双工传输链路。AP 有数据发送给 N_2 ,但 N_1, N_2, AP 都在彼此的通信范围内, N_1 发送给 AP 的数据与 AP 发送给 N_2 的数据将在 N_2 处产生碰撞,导致 N_2 接收失败。此时将不能建立异步全双工传输链路, HYD-MAC 将控制 N_1, N_2, AP 只建立 N_1 到 AP 的条件半双工链路,此时只能是 N_1 发送数据给 AP。如图 2(c)所示。

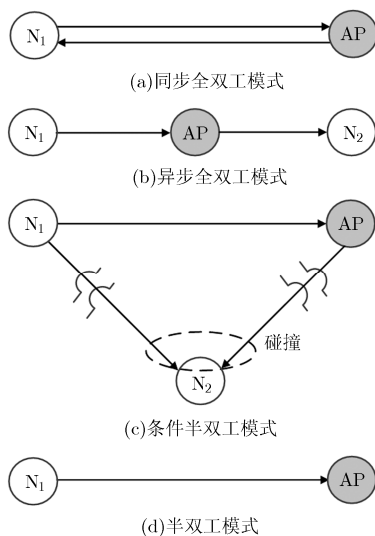


图 2 HYD-MAC 的传输模式

(4)半双工传输模式: N_1 不具备全双工能力或 AP 没有数据需要发送给 N_1 ,且 AP 也没有数据需要发送给其它站点时, HYD-MAC 将采用 IEEE 802.11 标准中的 RTS/CTS 机制进行通信,但传输的用于握手的帧为 HRTS/HCTS。如图 2(d)所示。

2.2.2 链路建立流程 图 3 给出了 4 种传输模式下网络的链路建立和数据传输流程。由于半双工传输模式是采用经典的 RTS/CTS 机制,因此只给出了余下 3 种传输模式的具体建链步骤。

(1)同步全双工传输模式链路建立的具体步骤:

步骤 1 N_1 向 AP 发送 HRTS 帧,并将 HRTS 帧的 MODE 字段设置为 1,请求全双工通信;

步骤 2 AP 接收到 N_1 发送的 HRTS,向 N_1 回复 HCTS 帧,并将 HCTS 帧的 MODE 字段设置为 1, ADDR 字段设置为 N_1 的 MAC 地址;

步骤 3 N_1 与 AP 同时向对方发送数据;

步骤 4 N_1 与 AP 同时向对方发送 ACK 对收到的数据进行确认。

(2)异步全双工传输模式链路建立的具体步骤:

步骤 1 N_1 向 AP 发送 HRTS 帧。 N_1 根据自身的全双工情况,将 HRTS 帧的 MODE 字段设置为 0 或者 1;

步骤 2 AP 接收到 N_1 发送的 HRTS 后向 N_1 回复 HCTS 帧,并将 HCTS 帧的 MODE 字段设置为 0, ADDR 的值设为 N_2 的 MAC 地址;

步骤 3 N_1 接收到 AP 发送的 HCTS 后,得知 AP 还有数据发送给其它站点,则等待 1 个 HCTS 时长;

步骤 4 N_2 接收到 AP 发送的 HCTS 后,回复 1 个 HCTS,并将 MODE 字段设置为 0, ADDR 字段设置为 AP 的 MAC 地址;

步骤 5 N_1 发送数据给 AP,同时 AP 发送数据给 N_2 ;

步骤 6 AP, N_2 同时发送 ACK,对收到的数据进行确认。

(3)条件半双工传输模式的链路建立具体步骤:

步骤 1 N_1 向 AP 发送 HRTS 帧。 N_1 根据自身的全双工情况,将 HRTS 帧的 MODE 字段设置为 0 或者 1;

步骤 2 AP 接收到 N_1 发送的 HRTS,等待 SIFS 后向 N_1 回复 HCTS 帧,并将 HCTS 帧的 MODE 字段设置为 0, ADDR 字段设置为 N_2 的 MAC 地址;

步骤 3 N_1 接收到 AP 发送的 HCTS 后,得知 AP 还有数据发送给其它站点;

步骤 4 由于 N_2 可以同时收到 N_1 发送的 HRTS 和 AP 发送的 HCTS 帧,知道无法建立异步传输链路, N_2 不发送任何帧;

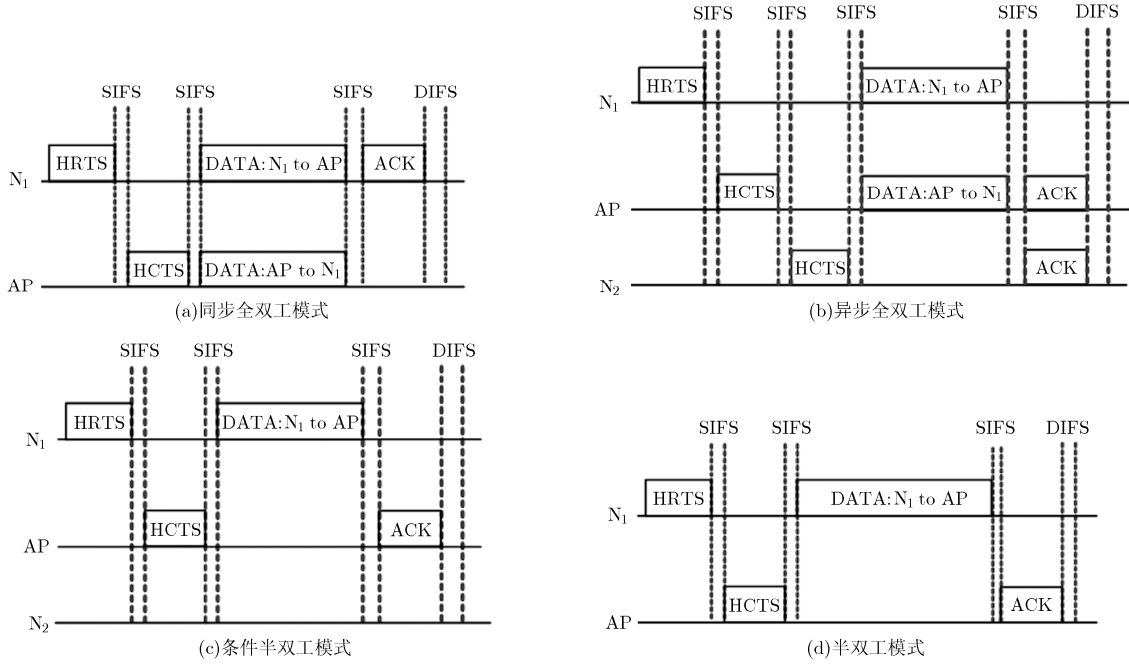


图3 HYD-MAC 链路建立流程

步骤5 等待1个HCTS的时长后,AP没有收到N₂发送的HCTS帧,得知无法建立异步传输链路;

步骤6 N₁向AP发送数据;

步骤7 AP向N₁发送ACK,对收到的数据进行确认。

3 性能分析

3.1 饱和吞吐量

文中使用归一化饱和吞吐量来描述网络的性能。HYD-MAC的归一化饱和吞吐量C表示为

$$C = \frac{E[Q](1-p_b)^{E[Q]}}{E[T] \cdot R_{DATA}} \quad (1)$$

其中, E[Q]为1次数据传输的有效长度; p_b接收端的误比特率,与接收端信噪比有关^[16]; R_{DATA}为IEEE802.11中定义的物理层数据传输速率, T为1次数据传输所消耗的时长。定义E[T]为1个系统时隙,即1次成功的数据传输消耗的平均时长,则有

$$E[T] = T_c p_e + T_s p_s + T_c p_c \quad (2)$$

其中, E[T]包括3个部分:(1)信道处于空闲状态,即没有站点在发送数据,其概率为 p_e = (1-τ)ⁿ,空闲的时长为 T_c,一般为1个时隙长度;(2)数据传输成功,即有且仅有1个站点发送数据,概率为 p_s = nτ(1-τ)ⁿ⁻¹,设成功传输1个数据帧导致信道繁忙的平均时长为 T_s; (3)网络中有数据传输发送冲突,概率为 p_c = 1 - p_e - p_s,设冲突使信道繁忙的平均时长为 T_c。其中τ为CSMA/CA网络中各站点

发送数据的概率^[17], n为网络中的站点数量。

结合式(1),式(2)得到HYD-MAC在残余自干扰情况下的全双工模式的归一化吞吐量为

$$C_{HYD-MAC} = \frac{E[Q](1-p_b)^{E[Q]}}{(T_c p_e + T_s p_s + T_c p_c) R_{DATA}} \quad (3)$$

针对不同的传输模式,式(3)中的T_s和T_c有不同的表达式,在不考虑传播时延的情况下,在同步全双工传输模式时有

$$\left. \begin{aligned} T_s^{syn} &= T_{DIFS} + T_{HRTS} + T_{HCTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + 3T_{SIFS} \\ T_c^{syn} &= T_{DIFS} + T_{HRTS} + T_{HCTS} + T_{SIFS} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

在异步全双工传输模式时有

$$\left. \begin{aligned} T_s^{asy} &= T_{DIFS} + T_{HRTS} + 2T_{HCTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + 4T_{SIFS} \\ T_c^{asy} &= T_{DIFS} + T_{HRTS} + 2T_{HCTS} + 2T_{SIFS} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

在条件半双工传输模式时有

$$\left. \begin{aligned} T_s^{con} &= T_{DIFS} + T_{HRTS} + 2T_{HCTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + 4T_{SIFS} \\ T_c^{con} &= T_{DIFS} + T_{HRTS} + 2T_{HCTS} + 2T_{SIFS} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

在半双工传输模式时有

$$\left. \begin{aligned} T_s^{hd} &= T_{DIFS} + T_{HRTS} + T_{HCTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + 3T_{SIFS} \\ T_c^{hd} &= T_{DIFS} + T_{HRTS} + 2T_{HCTS} + T_{SIFS} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中, T_{HRTS}, T_{HCTS}, T_{ACK}分别为HRTS帧、HCTS

帧和 ACK 帧的传输时长; $T_{\text{DIFS}}, T_{\text{SIFS}}$ 分别是 DCF 帧间间隔以及短帧间间隔的时长; T_{DATA} 为数据帧的传输时长, 且有

$$T_{\text{DATA}} = T_{\text{PREAMBLE}} + T_{\text{SIGNAL}} + \frac{E[Q]}{R_{\text{DATA}}} \quad (8)$$

其中, T_{PREAMBLE} 和 T_{SIGNAL} 分别 IEEE802.11 标准定义的物理层 PLCP 前导码和 SIGNAL 域的固定传输时长。

3.2 介质访问时延

介质访问时延是网络的重要指标之一, 对于实时多媒体业务来说尤为重要。HYD-MAC 介质访问时延是指需要发送数据帧的站点, 从竞争信道开始到目的站点接收到该数据帧所用去的时间总和。假设每个节点总是有数据需要发送, 即网络处于饱和状态, 且不考虑时延抖动等情况, 此时介质访问时延可以表示为站点连续两次成功发送数据帧的时间间隔, 即

$$D_{\text{HYD-MAC}} = E[M] \cdot E[T] \quad (9)$$

其中, $E[M]$ 表示同一站点两次成功发送数据帧之间需要等待的平均系统时隙数:

$$E[M] = \sum_{i=0}^m \frac{W_i - 1}{2(1-p)} \cdot \frac{p^i - p^{m+1}}{1 - p^{m+1}} \quad (10)$$

其中, m 是 IEEE802.11 定义的数据重传的最大次数, W_i 为第 i 次重传的随机退避窗口大小, p 为在退避过程中因碰撞而扩大退避窗口的概率, 即为其余 $n-1$ 个站点中至少有一个站点在发送数据的概率。

结合式(2), 式(9), 式(10)得到 HYD-MAC 介质访问时延为

$$D_{\text{HYD-MAC}} = \sum_{i=0}^m \frac{W_i - 1}{2(1-p)} \cdot \frac{p^i - p^{m+1}}{1 - p^{m+1}} \cdot (T_c p_c + T_s p_s + T_c p_c) \quad (11)$$

4 仿真分析

下文将 HYD-MAC 协议的各项性能指标分别与传统 RTS/CTS 协议、ContraFlow 协议^[15]等进行对比。其中, 传统 RTS/CTS 协议是半双工协议; ContraFlow 协议是基于 DCF 基本访问的全双工 MAC 协议, 发送数据前无需发送 RTS/CTS 帧, 因此无法解决隐藏终端带来的碰撞问题, 同时该协议只能应用于全双工网络, 无法适应混合双工网络。仿真中如无特殊说明, 均不考虑全双工系统的自干扰对网络的影响, 仿真参数见表 1。

4.1 饱和吞吐量

图 4 为 HYD-MAC 归一化饱和吞吐量随站点数变化的曲线图, 其中物理层数据传输速率 $R_{\text{DATA}} =$

表 1 仿真参数

参数名称	符号	参数值
PLCP 前导码持续时间	T_{PREAMBLE}	16 μs
SIGNAL 域持续时间	T_{SIGNAL}	4 μs
HRTS, HCTS, ACK 传输速率	R_{BAS}	24 Mbps
时隙长度	aSlotTime	9 μs
SIFS 持续时间	T_{SIFS}	16 μs
DIFS 持续时间	T_{DIFS}	34 μs
数据帧有效长度(MSDU)	L	0~7955 Byte
最大重传次数	m	9

150 Mbps, 帧长为 4096 Byte。从图中可以看出: 所提的 HYD-MAC 的归一化饱和吞吐量随着站点数 n 的增大而不断降低; 同时其在同步全双工模式或异步全双工下的归一化吞吐量性能都优于传统半双工 RTS/CTS。但所提的 HYD-MAC 的性能略低于 ContraFlow 协议, 这是因为 ContraFlow 协议没有兼容混合双工网络, 没有用于握手的 RTS/CTS 帧交换开销, 仅通过基本访问方式来接入信道。

图 5 为 HYD-MAC 的归一化饱和吞吐量随帧长 L 变化的曲线图, 其中数据传输速率为 150 Mbps, 站点数固定为 40。当站点数固定时, HYD-MAC 协议的归一化吞吐量随帧长 L 的增大而增大。当帧长超过 6000 Byte 时, 全双工协议的归一化吞吐量都在 1 以上。因为站点数固定后, 各站点在随机的时隙内发送数据的概率将不再发生变化, 而随着帧长的增大, 提高了发送有效数据与传输开销的比值, 因此归一化吞吐量也增大。

图 6 为 HYD-MAC 归一化吞吐量在不同数据传输速率下的变化曲线。其中站点数 $n = 20$, 帧长固定为 4096 Byte。HYD-MAC 吞吐量是随传输速率 R_{DATA} 的增大而提高, 但归一化吞吐量却随传输速率增大而降低, 因为归一化吞吐量表示实际吞吐量与数据传输速率的比值, 在帧长固定的情况下, 当传输速率增大时, 每一次传输过程中, 有效数据的传输时间与其它传输开销的比值减低, 因此归一化吞吐量降低。

图 7 为 HYD-MAC 在存在全双工收发自干扰情况下的归一化饱和吞吐量曲线。仿真中全双工系统发射功率为 $P_{\text{tx}} = 20$ dBm, 接收功率为 $P_{\text{rx}} = -50$ dBm, $R_{\text{DATA}} = 150$ Mbps, 站点数 $n = 20$, 帧长 $L = 512$ Byte, 物理层采用 64QAM, 仿真忽略接收端信道噪声的影响。从图 7 可知, HYD-MAC 归一化饱和吞吐量随自干扰消除能力的提高而提高。当自干扰消除能力较低时, 接收端信干噪比比较低,

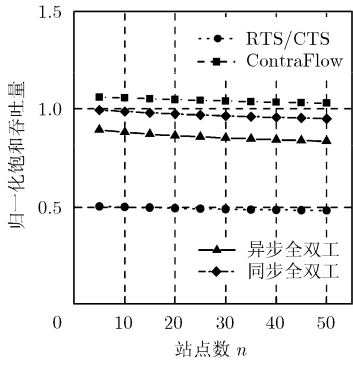


图4 不同站点数下的 HYD-MAC 归一化饱和吞吐量曲线

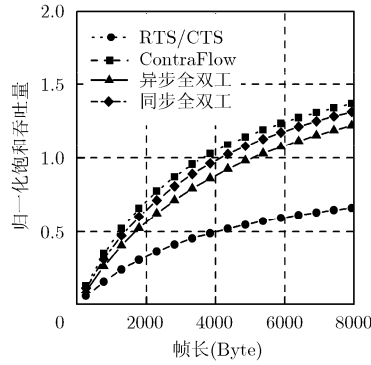


图5 不同帧长下的 HYD-MAC 归一化饱和吞吐量曲线

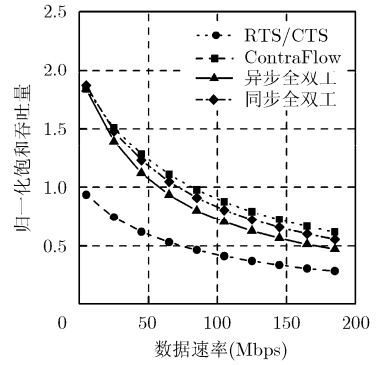


图6 不同数据传输速率下 归一化饱和吞吐量曲线

对 64QAM 进行解调时误码率很高，因此有效吞吐量很低。当自干扰消除能力超过 90 dB 时，接收端对 64QAM 的误码率接近理论误码率，归一化饱和吞吐量将趋于稳定，不再继续升高。

4.2 介质访问时延

图 8 为 HYD-MAC 在不同站点数下的介质访问时延曲线。其中 $R_{DATA} = 150$ Mbps，帧长 L 为 4096 Byte。由图可知，随着站点数 n 的增大，HYD-MAC 的介质访问时延呈线性增长。在相同条件下，介质访问时延从小到大依次是 ContraFlow、同步全双工模式、异步全双工模式和传统 RTS/CTS。HYD-MAC 的时延性能比 ContraFlow 稍差，因为 HYD-MAC 通过牺牲一定的时延增益以适应不同双工网络的通信需求。

图 9 为 HYD-MAC 介质访问时延随数据帧长度 L 变化的曲线图。其中 $R_{DATA} = 150$ Mbps，站点数 $n = 40$ 。从图 9 可知，随着帧长的增长，介质访问时延也呈线性增长，时延从小到大依次是 Contra

Flow、同步全双工模式、异步全双工模式、RTS/CTS 模式，但 HYD-MAC 的性能与 ContraFlow 相比差距不大。

5 结束语

针对传统半双工 DCF 不适用于全双工 WLAN 的问题以及全双工 WLAN 需要兼容半双工终端的情况，本文提出了一种 HYD-MAC 协议。该协议设计了 HCTS/HRTS 帧，结合不同的网络场景和站点的全双工能力，自适应地选择不同的传输模式，以提高网络的吞吐量。从网络吞吐量和介质访问时延等性能来看，HYD-MAC 的性能优于传统半双工 DCF 协议，考虑单一网络因素对协议性能的影响时，在帧长较长、站点数较少、数据传输速率较低的条件条件下，HYD-MAC 的性能提升效果更加明显；与全双工 ContraFlow 协议相比，HYD-MAC 协议通过牺牲极少的吞吐量和时延性能，以适应全双工、半双工以及混合双工网络的通信需求。

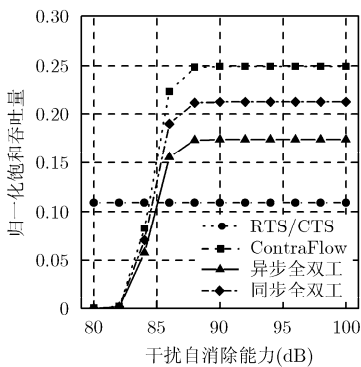


图7 不同自干扰消除能力下的 归一化饱和吞吐量曲线

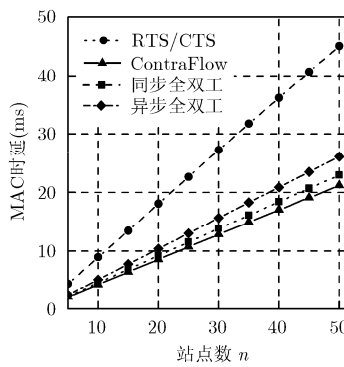


图8 不同站点数下的 HYD-MAC 介质访问时延曲线

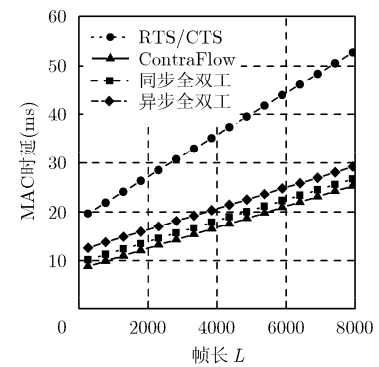


图9 不同帧长下的 HYD-MAC 介质访问时延曲线

参考文献

[1] ZHANG X, CHENG W, and ZHANG H. Full-duplex

transmission in PHY and MAC layers for 5G mobile wireless networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(5): 112-121. doi: 10.1109/MWC.2015.7306545.

- [2] ZHANG Z, CHAI X, LONG K, *et al.* Full duplex techniques for 5G networks: Self-interference cancellation, protocol design, and relay selection[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(5): 128–137. doi: 10.1109/MCOM.2015.7105651.
- [3] EVERETT E, SAHAI A, SABHARWAL A, *et al.* Passive self-interference suppression for full-duplex infrastructure nodes[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(2): 680–694. doi: 10.1109/TWC.2013.010214.130226.
- [4] 徐强, 全欣, 潘文生, 等. 同时同频全双工 LTE 射频自干扰抑制能力分析 & 实验验证[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(3): 662–668. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00717.
XU Qiang, QUAN Xin, PAN Wenshen, *et al.* Analysis and experimental verification of RF self-interference cancellation for co-time co-frequency full-duplex LTE[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(3): 662–668. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00717.
- [5] HONG S, BRAND J, JUNG Il Choi, *et al.* Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 114–121. doi: 10.1109/MCOM.2014.6736751.
- [6] CHOI W, LIM H, and SABHARWAL A. Power-controlled medium access control protocol for full-duplex WiFi networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(7): 3601–3613. doi: 10.1109/TWC.2015.2408338.
- [7] THILINA K M, TABASSUM H, HOSSAIN E, *et al.* Medium access control design for full duplex wireless systems: Challenges and approaches[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(5): 112–120. doi: 10.1109/MCOM.2015.7105649.
- [8] LE T T and LE L B. Design and optimal configuration of full-duplex MAC protocol for cognitive radio networks considering self-interference[J]. *IEEE Access*, 2015, 3(1): 2715–2729. doi: 10.1109/ACCESS.2015.2509449.
- [9] QIAO Deli. Effective capacity of buffer-aided full-duplex relay systems with selection relaying[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(1): 117–129. doi: 10.1109/TCOMM.2015.2497688.
- [10] WANG Y, XU Y, and LI N. Relay selection of full-duplex decode-and-forward relaying over Nakagami-m fading channels[J]. *IET Communications*, 2016, 10(2): 170–179. doi: 10.1049/iet-com.2015.0524.
- [11] SAHAI A, PATEL G, and SABHARWAL A. Pushing the limits of full-duplex: design and real-time implementation [OL]. <http://arxiv.org/abs/1107.0607>, 2011.
- [12] KIM S and STARK W E. On the performance of full duplex wireless networks[C]. *Information Sciences and Systems (CISS)*, Baltimore, 2013: 1–6. doi: 10.1109/CISS.2013.6552332.
- [13] LIAO Y, BIAN K, SONG L, *et al.* Full-duplex MAC protocol design and analysis[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(7): 1185–1188. doi: 10.1109/LCOMM.2015.2424696.
- [14] TANG A and WANG X. A-duplex: Medium access control for efficient coexistence between full-duplex and half-duplex communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(10): 5871–5885. doi: 10.1109/TWC.2015.2443792.
- [15] SINGH N, GUNAWARDENA D, PROUTIERE A, *et al.* Efficient and fair MAC for wireless networks with self-interference cancellation[C]. *Proceedings of Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)*, Princeton, 2011: 94–101. doi: 10.1109/WIOPT.2011.5930070.
- [16] CHO K and YOON D. On the general BER expression of one- and two-dimensional amplitude modulations[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(7): 1074–1080. doi: 10.1109/TCOMM.2002.800818.
- [17] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE802.11 distributed coordination function[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(3): 535–547. doi: 10.1109/49.840210.
- 吴皓威: 男, 1981年生, 副研究员, 研究方向为无线局域网、宽带无线通信、飞行器测控等。
- 邹玉涛: 男, 1990年生, 硕士生, 研究方向为无线局域网、数据链等。
- 孙晨: 男, 1990年生, 硕士生, 研究方向为无线局域网、OFDM技术等。
- 欧静兰: 女, 1981年生, 副教授, 研究方向为宽带无线通信、中继通信等。