

基于 IEEE 802.11 高速无线局域网的速率自适应 MAC 协议研究

习 勇 黄清艳 魏急波 吴 宇
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要: 目前的 IEEE 802.11 标准在物理层提供了对多种发送速率的支持,然而在 MAC 层却没有规定速率自适应的方法。该文研究了高速 IEEE 802.11 无线局域网中的速率自适应方案。首先,提出了 EACK 协议,EACK 使用基本速率发送 MAC 头,并在 ACK 帧中携带信道信息,因而能够较快速地响应信道的变化,同时具有少的开销;其次,在 EACK 基础上,提出了一种恒定发送时间(CEACK)的策略,CEACK 能够克服传统 IEEE 802.11 DCF MAC 协议的理论吞吐量上限,并且具有更好的时间公平性能,能够应用于高速的无线局域网。

关键词: IEEE 802.11 DCF; MAC 协议; 速率自适应

中图分类号: TN925+.93

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1281-05

Rate Adaptation MAC Protocol for High Rate IEEE 802.11 WLANs

Xi Yong Huang Qing-yan Wei Ji-bo Wu Yu

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The current IEEE 802.11 PHYs provide multiple transmission rates, but in MAC layer, the rate adaptation algorithm is not specified. This paper studies rate adaptation schemes for high rate IEEE 802.11 WLANs MAC protocol. Firstly, an Enhanced ACKnowledgement (EACK) rate adaptation protocol is presented. In EACK, the MAC header is transmitted at basic rate and the channel state information is carried by ACK frame. EACK reacts to channel variations quickly while has fewer overheads. Then, a constant transmission duration scheme with EACK (CEACK) is proposed for high rate wireless LANs which can overcome the throughput upper limit of legacy IEEE 802.11 DCF MAC and has better temporal fairness performance in hybrid rates networks.

Key words: IEEE 802.11 DCF; MAC protocol; Rate adaptation

1 引言

IEEE 802.11a/b/g 在物理层通过改变调制与编码方式提供了对多速率的支持,然而,在 MAC 层,目前的 802.11 协议只规定了何种帧类型使用何种的速率,却没有规定如何在各个速率之间进行自适应地切换,链路自适应的速率切换算法还是一个公开的研究内容。

由于最近在无线通信、智能天线、数字信号处理等方面的技术进展,物理层能够提供非常高的速率,例如目前正在制定的 802.11n 标准其目标是达到 100Mbps 以上的用户速度。然而,最近的研究^[1, 2]表明,目前的 802.11 DCF MAC 协议存在吞吐量的理论极限,对于高速无线局域网来说,仅仅增加物理层的发送速率是不够的,还需要能够减少 MAC 层的协议开销。

目前主要有两类针对 IEEE 802.11 的速率自适应算法。一类是基于 ACK 帧的统计信息^[3, 4]。在文献[3]提出的 ARF 协议中,如果连续两个 ACK 帧没有收到,那么接下来的数据帧以更低的速率发送并且启动一个定时器;如果连续成功地收到 10 个 ACK 帧或者定时器时间到,那么提高发送速率。由于 ARF 协议每 10 次成功的发送才尝试增加发送速率,因而

不能及时地响应信道的快速变化。

另一类协议是基于 RTS/CTS 握手信号^[5, 6]。在文献[5]提出的 RBAR 协议中,如果接收方接收到 RTS 帧,那么根据接收到的 RTS 帧的 SNR(信噪比)来判断接下来的数据帧能够传输的速率,并且通过 CTS 帧告诉发送方。与 ARF 协议相比, RBAR 协议能够更快地响应信道,但存在新的缺点:由于 RBAR 必须使用 RTS/CTS 握手信号,在没有隐藏终端的情况下, RTS/CTS 的开销会影响吞吐量性能。

本文针对 IEEE 802.11 无线局域网提出了两个新颖的速率自适应协议(EACK 和 CEACK)。在 EACK(Enhanced ACK)协议中,MAC 头以基本速率发送,速率的选择基于上一个数据帧的 SNR,信道信息的交换通过 ACK 帧来完成。如果以高速率传输的数据帧由于速率过高引起传输错误而不能正确解帧,与传统的 802.11 MAC 协议直接丢弃帧不同,在 EACK 中,接收方发送一个修改的 ACK 帧给发送方,告知发送方下一次数据发送应该使用的速率。EACK 能够较 ARF 更快地响应信道变化,同时较 RBAR 协议有更少的协议开销,因为 EACK 不需要 RTS/CTS 握手。

在 EACK 的基础上,本文提出一个针对高速无线局域网的恒定发送时间策略 CEACK(Constant transmission

duration for EACK)。考虑慢时变的无线信道，信道的相关时间典型大于一个数据帧以低速率发送时的持续时间，因而以高速率发送的时候可以发送更多的数据而保持发送的时间近似不变。分析表明 CEACK 的吞吐量能够克服传统 802.11 MAC 协议的理论限制，进一步的仿真表明 CEACK 比 EACK 吞吐量提高了 30%到 50%。此外，与传统 802.11 协议比较，CEACK 还提供了每个节点访问信道的时间公平性，因而在混合速率的网络中有着更好的性能。

2 EACK 协议描述以及性能评估

2.1 协议描述

在 IEEE 802.11 协议中，以 802.11a 为例，数据帧的物理层协议数据单元(Phy Protocol Data Unit, PPDU) 帧格式如图 1 所示，包括 PLCP 前导、PLCP 头、MAC 层协议数据单元(MAC Protocol Data Unit, MPDU)以及尾比特和填充比特。MPDU 包括 MAC 头、MAC 层服务数据单元(MAC Service Data Unit, MSDU)以及帧校验序列(Frame Check Sequence, FCS)。其中，MAC 头中包含了源地址和目的地址。目前 802.11 协议规定对于数据帧的发送，PLCP 头(不包括服务域, Service field)应该以基本速率发送，而 MPDU 可以以可变的高速率发送，另外所有的控制帧都应该以基本速率发送。

由于低速率的发送有着更远的发送范围，如果一个远离发送方的节点不能够对高速的 MPDU 解码，却有可能对低速的 PLCP 头解码。在传统的 802.11 MAC 中，如果 MPDU 不能解码，接收者必须丢弃帧。因此，源节点不能接收到 ACK 帧，源节点错误地认为发送的数据包由于碰撞丢失了，因而错误地增加避退窗口。

在 EACK 中，我们提议让 MPDU 的 MAC 头以基本速率发送，而 MSDU 以高速率发送，这样远端的节点(或者信道较差的节点)可能解码低速 MAC 头，从而获得源地址和目的地址。如果接收节点发现目的地址正是自己，即使接收节点不能对高速的 MSDU 解码，也可以发送一个修正的 ACK 帧给源节点。而且，类似于 RBAR 协议，接收节点可以基于收到的数据帧的 SNR 计算合适的发送速率，并利用 ACK 帧告知发送方。如果源节点接收到 ACK 帧，获知 MSDU 不能被解码，那么可以以合适的速率重新发送数据帧，而不必增加竞争窗口。如果接收节点连 PLCP 头和 MAC 头也不能解码，则假设数据由于碰撞遭到损坏，与传统的 802.11 协议

一样，只需丢弃帧即可。在本文提议的策略中，ACK 帧的功能增强了，所以本文称其为 EACK(Enhanced ACK, 增强型 ACK)。

在 EACK 中，我们有个暗含的假设：碰撞仅仅发生在 PLCP 前导和 PLCP 头。如果 PLCP 前导和 PLCP 头可以被成功地解码，而 MSDU 不能被解码，则认为是传输错误，并且忽略碰撞的可能。该假设在单跳的网络中是合理的，那里所有的节点能够互相侦听，能够感知其他节点的发送。为了提高吞吐量，在多速率的单跳网络中，不建议使用 RTS/CTS^[7]。

综上所述，在 EACK 中，帧格式修改如下：

(1) 以基本速率发送 PLCP 头(包括服务域)和 MAC 头。

(2) 在 ACK 中增加一个字节表示两个新的域：一个为解码标志域(decode_flag)，使用一个比特，‘1’表示 MSDU 可以解码，‘0’表示不能；另一个为速率索引域(rate_index)，使用 7 个比特，表示适合的速率编号。

通过上面的修改，新的 MAC 协议描述如下：(a)每个节点维持一个邻居节点的速率索引表，表中的速率索引初始化为基本速率；(b)源节点以速率索引表指示的速率发送数据帧至目的节点；

(3) 如果接收节点不能解码 PLCP 头以及 MAC 头，或者能够解码 PLCP 头和 MAC 头，但发现目的地址不是它自己，则丢弃接收到的帧；

(4) 如果接收节点能够解码 PLCP 头以及 MAC 头，并且发现目的地址为自己，但是不能解码 MSDU，那么根据接收到的数据帧的 SNR 计算合适的速率，设置相应的速率索引域，并且将解码标志域设置为‘0’，然后以基本速率发送 ACK 帧给源节点；

(5) 如果接收节点能够解码整个数据帧，并且发现目的地址为自己，那么根据接收到的数据帧的 SNR 计算合适的速率，设置相应的速率索引域，并且将解码标志域设置为‘1’，然后以基本速率发送 ACK 帧给源节点；

(6) 源节点等待接收 ACK 帧，如果超时，则增加避退窗口并进入避退，等待下一次的重传；如果收到 ACK 帧，则根据 ACK 中的速率索引域设置速率索引表，并且判断是否需要重新发送，然后直接进入避退而不需要增加竞争窗口。

2.2 性能评估

下面通过仿真对 EACK, ARF 和 RBAR 协议进行性能比较。

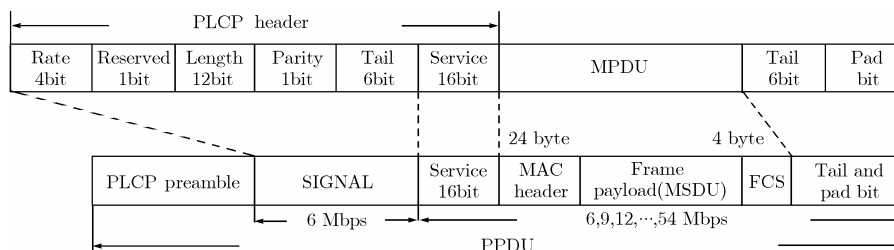


图 1 802.11a 数据帧的帧格式

为了分析方便,我们选择 BPSK、QPSK、16-QAM、64-QAM 和 256-QAM 作为多速率的调制方式,并且假设不使用前向纠错(FEC)。信道带宽设置为 6MHz,因此这些调制方式可以分别提供 6Mbps、12Mbps、24Mbps、36Mbps 和 48Mbps 的数据率。不同调制方式通过 SNR 来选择,其选择的标准是满足 BER(误码率)为 $1e-5$,具体为:当 $SNR < 12.6\text{dB}$,选择 BPSK;当 $12.6\text{dB} < SNR \leq 19.5\text{dB}$,选择 QPSK;当 $19.5\text{dB} < SNR \leq 25.5\text{dB}$,选择为 16-QAM;当 $25.5\text{dB} < SNR \leq 31.5\text{dB}$,选择为 64-QAM;当 $SNR > 31.5\text{dB}$,选择 256-QAM。

网络由收发两个节点组成,发送方始终有数据发送,也就是网络处于饱和状态。在应用层,假设 CBR 恒定数据流,数据帧长为 1000byte。

仿真时设置两个场景。一是节点移动场景,该场景主要考察 3 个协议对于缓慢变化的信道的自适应性能,这里信道的变化主要由收发节点距离的变化引起。节点的初始距离为 1m,从仿真开始,接收节点以 2m/s 的速度远离发送节点,仿真时间持续 100s,因而在第 100s,收发两节点的距离为 201m。该场景中只考虑信号的自由空间损耗而不考虑衰落。二是节点静止场景,但是假设由于周围环境的干扰而存在衰落,并进一步假设具有 Jake 频谱特性^[8]的平衰落的瑞利信道,最大的多普勒频移为 50Hz,平均的接收信噪比设置为 26dB,该场景主要评估 3 个协议对于快速变化的信道的自适应性能。

仿真使用 GloMoSim^[9]网络仿真软件实现。表 1 中总结了仿真中的一些重要参数,这些参数例如 DIFS, SIFS 等与 IEEE 802.11a 定义的相同。

表1 仿真中物理层和MAC层的主要参数

参数	值	说明
SLOT	9 μs	Slot 时间长度
SIFS	16 μs	SIFS 时间长度
DIFS	34 μs	DIFS 时间长度
CW	15	最小竞争窗口
m	6	避退级数
tSymobl	4 μs	OFDM符号长度
tPLCP	20 μs	PLCP长度(除服务域外)
DELAY	1 μs	传播时延

图 2 给出了第 1 个场景下的使用固定速率以及使用 EACK 与 ARF 和 RBAR 协议的吞吐量随着时间变化的比较。可以看出,对于固定速率的发送,不同的速率有着不同的有效范围,6Mbps, 12Mbps, 24Mbps, 36Mbps 和 48Mbps 的数据率的有效范围大约为 200m, 130m, 60m, 30m 和 15m,超过这个范围,吞吐量迅速降低至零,而 3 个速率自适应的协议都能够较好地对信道的变化进行自适应调整。

除非使用最高速率发送,否则 ARF 的吞吐量要低于

EACK。因为 ARF 每 10 次成功的发送便要尝试增加发送速率,导致发送失败,这说明 ARF 协议对于缓慢变化信道或者静止的信道来说,对信道的尝试过于频繁。而由于 RTS/CTS 的开销,特别是对于高速率来说,RBAR 的吞吐量也低于 EACK 的吞吐量。

图 3 给出了在第 2 个场景下 EACK 与 ARF 和 RBAR 的吞吐量性能随最大多普勒频率变化的比较结果。可以看出,ARF 的吞吐量随着最大多普勒频率的增加而急剧下降,这说明 ARF 不能有效地跟踪信道的快速变化,而 EACK 和 RBAR 都能够有效地抵抗信道的快速变化;另外,由于不需要 RTS/CTS 握手,以及减少了盲目的避退,EACK 的吞吐量比 RBAR 提高了大约 30%。

仿真结果表明,不论是对于缓慢变化的信道还是快变化的信道来说,EACK 的吞吐量性能比 ARF 和 RBAR 的要好。

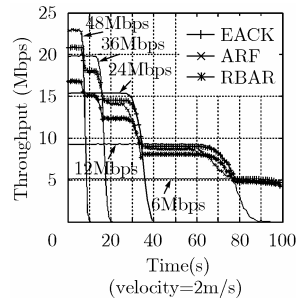


图2 不同的发送方案下吞吐量与时间的关系(移动速率2m/s)

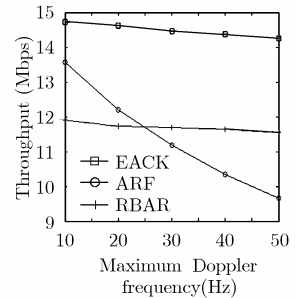


图3 EACK, ARF, RBAR 的吞吐量与最大多普勒频率关系

3 恒定发送时间策略(CEACK)

3.1 协议描述

现有的 IEEE 802.11 DCF MAC 由于其协议开销,对于高速物理层来说效率很低,文献[1, 2]指出现有的 802.11 DCF MAC 协议不管速率有多高,存在吞吐量的上限。

另外,还有文献指出 802.11 DCF 性能在混合速率的网络中性能下降^[10],因为 DCF 保证了每个节点访问信道大致相同的概率,低速率的节点会占用信道更多的时间,从而拉低了整个网络的吞吐量。

本文提出了一个恒定发送时间的策略(Constant transmission duration for EACK, CEACK),该策略类似于文献[1-6]的思想。CEACK 的核心思想是不管发送速率保持数据帧的发送时间大致恒定,因此高速率的节点能够发送更多的数据。通过恒定发送时间的机制,CEACK 还可以为每个节点提供访问信道时间上的公平性,因而在混合速率的网络将有着更好的性能。另外,与文献[6]提出的 OAR 协议比较,CEACK 不需要发送多个 ACK,因而开销更小。

要实现 CEACK,一个关键的问题是恒定的发送时间(T_c)应该设置为多大。本文设置 T_c 为 1000 个字节的数据帧以基本速率发送所需要的时间,当使用 802.11a 的参数, T_c 约为 1.4ms;此时,一个基本模式下的数据交换(DATA+ACK)所需要的平均时间(T_{as})大约为 1.6ms;

$$T_c = tPLCP + \left\lceil \frac{(16 + 6) + (24 + 4 + 1000) \times 8}{tSymbol \cdot BasicRate} \right\rceil \cdot tSymbol$$

$$= tPLCP + \left\lceil \frac{22 + (28 + 1000) \times 8}{tSymbol \cdot BasicRate} \right\rceil \cdot tSymbol \quad (1)$$

$$T_{as} = DIFS + T_c + DELAY + SIFS + ACK$$

$$+ DELAY + CW \cdot SLOT / 2 \quad (2)$$

式中符号 $\lceil \cdot \rceil$ 表示上取整, $tPLCP$ 为 $20\mu s$, $tSymbol$ 为 $4\mu s$. ACK , $DIFS$, $SIFS$, $SLOT$, CW 是与 802.11a 兼容的时间参数, $DELAY$ 为 $1\mu s$, $BasicRate$ 为 $6Mbps$.

之所以选择上述的 T_c 值, 考虑的一个重要因素是让信道的变化在时间 T_{as} 内尽可能的小, 即信号应该在 T_{as} 内高度相关. 给定最大多普勒频率 $50Hz$, 根据文献[8], 接收信号的相关性可以表达为

$$\rho = \langle x(t)x(t + T_{as}) \rangle = J_0(2\pi f_d T_{as}) = 0.94 \quad (3)$$

这里 $\langle x(t) \rangle$ 为接收信号的复包络, f_d 为最大多普勒频率, J_0 为零阶 Bessel 函数的第 1 项. 从式(3)可以得出信道在 T_{as} 内是高度相关的, 因而可以使用上一个数据帧的信道状况作为下一个数据帧的信道估计.

一旦确定了 T_c , 如果选择高速率(HighRate)发送数据帧, 数据帧的字节数目(n)应该满足如下的等式:

$$\left\lceil \frac{16 + 28 \times 8}{tSymbol \cdot BasicRate} \right\rceil + \left\lceil \frac{6 + n \times 8}{tSymbol \cdot HighRate} \right\rceil$$

$$\cdot tSymbol + tPLCP \approx T_c \quad (4)$$

因此, n 大约为 $1000HighRate / BasicRate$. 例如, 如果基本速率为 $6Mbps$, 而选择 $48Mbps$ 的高速率, 在 MAC 层可以发送大约 8000 个字节的数据帧.

3.2 CEACK 吞吐量性能分析

当以高速率发送长度为 1000 字节的数据帧时, 传统的 802.11MAC 协议可以获得的理论吞吐量为

$$T_{802c} = tPLCP + \left\lceil \frac{22 + (28 + 1000) \times 8}{tSymbol \cdot HighRate} \right\rceil \cdot tSymbol \quad (5)$$

$$T_{802as} = DIFS + T_{802c} + DELAY + SIFS + ACK$$

$$+ DELAY + CW \cdot SLOT / 2 \quad (6)$$

$$S_{802} = 1000 \times 8 / T_{802as} \quad (7)$$

而 CEACK 可以获得的理论吞吐量为

$$T_{CEACKc} \approx T_c = tPLCP + \left\lceil \frac{22 + (28 + 1000) \times 8}{tSymbol \cdot BasicRate} \right\rceil \cdot tSymbol \quad (8)$$

$$T_{CEACKas} = DIFS + T_{CEACKc} + DELAY + SIFS + ACK$$

$$+ DELAY + CW \cdot SLOT / 2 \quad (9)$$

$$S_{CEACK} = (HighRate / BasicRate) \cdot 1000 \cdot 8 / T_{CEACKas} \quad (10)$$

图 4 给出了 CEACK 和传统 802.11 MAC 随发送速率变化的理论吞吐量曲线. 可以看到, CEACK 的吞吐量与发送速率几乎是线性关系, 而现有的 802.11 MAC 协议不管发送速率其吞吐量受限为 $40Mbps$ 左右. 因此, CEACK 对于高

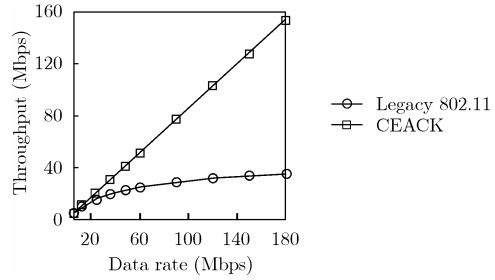


图 4 传统 802.11 与 CEACK 随发送速率变化的理论吞吐量速物理层来说效率更高.

图 5 通过仿真给出了 CEACK 和 EACK 的吞吐量性能比较. 仿真参数和场景的设置与前文 EACK 的仿真场景二相同. 可以看出, 通过让高速率节点发送更多的数据, CEACK 较 EACK 的吞吐量提高了 30% 到 50%.

从图 5 也可以看到 CEACK 的性能随着多普勒频率的增加而下降. 在 EACK 和 CEACK 中, 我们使用前一个数据帧的信道状况作为下一个数据帧的信道估计, 当信道变化较快的时候, 信道的估计可能是过时的, 特别是对于 CEACK. 如果选择高速率发送的时候, CEACK 将发送更多的数据, 因而发送错误的概率也会增加. 为了改善 CEACK 在时变信道的性能, 一个方法是在长帧中使用多个帧校验(FCS), 只有校验错误的帧片段才需要重传. 另一个可能的办法是通过信道预测来提高信道估计的准确度.

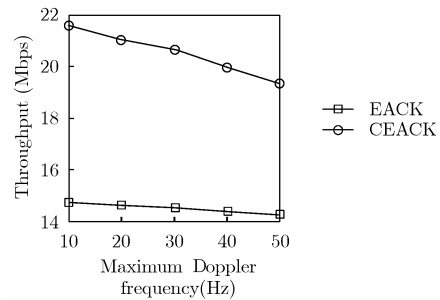


图 5 EACK 与 CEACK 的吞吐量性能比较

3.3 CEACK 在混合速率网络中的性能分析

为了简化分析, 假设一个存在两种发送速率的混合速率网络, 其中 k_1 个节点使用低速率发送数据, 低速率节点的吞吐量为 a , k_2 个节点使用高速率发送数据, 高速率节点的吞吐量为 na .

对于传统的 802.11 DCF 协议来说, 由于每个节点访问信道的概率相同, 那么网络的平均吞吐量可近似为

$$\frac{\frac{k_1 + k_2}{\frac{k_1}{a} + \frac{k_2}{na}} = \frac{k_1 + k_2}{k_1 n + k_2} na \quad (11)$$

当 n 趋于无穷大的时候, 最大的吞吐量为 $((k_1 + k_2) / k_1) a$, 也就是网络的平均吞吐量由低速率节点吞吐量以及低速率节点数目的比例决定. 特别地, 如果高速率和低速率的节点数目比例为 1:1, 那么不管高速率节点的吞吐量多高, 网络的平均吞吐量限制为 $2a$.

而对于 CEACK 方案, 由于高速率的节点能够发送更多

的数据,忽略协议开销,那么发送的数据量大约为低速率节点的 n 倍,网络的平均吞吐量近似为

$$\frac{k_1 + k_2 n}{k_1/a + (k_2 n)/(na)} = \frac{k_1 + k_2 n}{k_1 + k_2} a \quad (12)$$

网络的平均吞吐量与低速率节点的吞吐量、高速率节点的吞吐量以及低速率节点数目的比例有关。特别地,在高低速率节点数目为 1:1 的情况下,能够达到的平均吞吐量为 $((1+n)/2)a$,网络的平均吞吐量与最高吞吐量为线形关系,平均吞吐量随着高速率节点吞吐量的增加而增加。

图 6 给出了混合速率网络下传统 802.11 协议和 CEACK 协议的平均吞吐量仿真结果。仿真中设置 6 个发送节点向 AP 节点发送数据。不考虑衰落的影响,设置高速率节点与 AP 距离为 10m 以内,高速率节点能够以 48Mbps 发送;低速率节点与 AP 距离大约 180m,低速率节点能够以 6Mbps 速率发送。图中横坐标表示高速率节点与低速率节点的数目。忽略碰撞的影响,当使用传统的 802.11 协议的时候,最高速率与最低速率的吞吐量大约分别为 18.6Mbps 和 4.3Mbps,而 CEACK 的最高速率与最低速率的吞吐量分别为 34.8Mbps 和 4.3Mbps。从图 6 中可以看出,传统的 802.11 协议的平均吞吐量随着低速率节点数目的增多迅速地下降,而 CEACK 的平均吞吐量与低速节点数目近似为线形关系。特别地,对于高速率节点数目和低速率节点数目为 3:3 情况,对于传统 802.11 协议,吞吐量为 7.0Mbps,小于 2×4.3 Mbps;对于 CEACK 协议, n 大约为 8,吞吐量为 20.1Mbps,和 $(1+8)/2 \times 4.3$ 近似;仿真结果与理论分析吻合。

综上所述,理论分析与仿真均表明,在混合速率的网络中,由于 CEACK 提供了节点访问信道时间上的公平性,网络的平均吞吐量受低速率节点吞吐量以及低速率节点数目的影响较小,较传统的 802.11 协议性能更为优越。

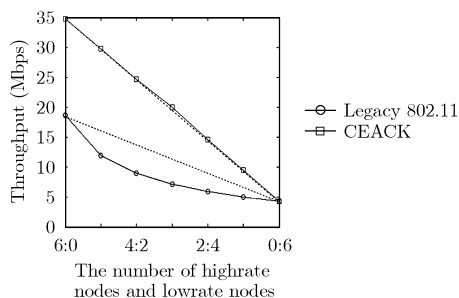


图 6 传统 802.11 与 CEACK 在混合速率网络的性能比较

4 结束语

本文研究了高速 IEEE 802.11 无线局域网的速率自适应 MAC 协议(EACK 和 CEACK)。在 EACK 中,速率的选择是通过信道状况来决定,信道信息的交换由 ACK 帧完成。EACK 能够快速响应信道变化,而且不需要 RTS/CTS 握手信号,因而开销很少。在 EACK 基础上,本文又提出了能

够应用于高速无线局域网的恒定发送时间的策略——CEACK。分析与仿真表明 CEACK 能够显著地提高吞吐量,并较传统 802.11 协议在混合速率的网络中有着更好的性能。然而,CEACK 在信道变化较快的时候性能有所下降,我们将进一步研究提高 CEACK 性能的方法。

参考文献

- [1] Xiao Y. Packing Mechanisms for the IEEE 802.11n Wireless LANs[A], IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM). Dallas, Texas USA, Dec.2004
- [2] Yuan Y, Gu D, and Arbaugh W, *et al.* High-performance MAC for high-capacity wireless LANs[A]. International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). Boston, USA, Oct. 2004: 167-172.
- [3] Kamenman A and Monteban L. WaveLAN II: A high performance wireless LAN for the unlicensed band[J]. *Bell Labs Technical Journal*, 1997, 2(3): 118-133.
- [4] Qiao D and Choi S. Fast-responsive link adaptation for IEEE 802.11 WLANs[A]. IEEE International Conference on Communications(ICC). Seoul, Korea, May 2005.
- [5] Holland G, Vaidya N, and P Bahl. A Rate-Adaptive MAC Protocol for Multi-Hop Wireless Networks[A]. International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM). Rome, Italy, July. 2001: 236-250.
- [6] Sadeghi B, Kanodia V, and Sabharwal A, *et al.* Opportunistic media access for multirate Ad hoc networks[A]. International Conference on Mobile Computing and Networking(MOBICOM). Atlanta, USA, Sep. 2002: 24-35.
- [7] Chatzimisios P, Boucouvalas A C, and Vitsas V. Effectiveness of RTS/CTS handshake in IEEE 802.11a wireless LANs[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(14): 915-916.
- [8] Jakes W C. Microwave Mobile Communications[M]: IEEE Press, Wiley Interscience, 1994.
- [9] Glomosim simulator, <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim>.
- [10] Heusse M, Rousseau F, and Sabbatel G B, *et al.* Performance anomaly of 802.11b[A]. IEEE International Conference on Computer and Communications(INFOCOM). San Francisco, USA, Mar. 2003: 836-843.

刁勇:男,1977年生,博士生,研究方向为无线局域网、交叉层设计.

黄清艳:女,1981年生,硕士生,研究方向为无线局域网.

魏急波:男,1967年生,教授,博士生导师,研究方向为通信信号处理与通信网络.

吴宇:男,1979年生,博士生,研究方向为无线局域网、无线 Ad hoc 网络.