

IEEE802.11 DCF 中基于能耗最小的 RTS 门限自适应调整算法

严少虎 卓永宁 吴诗其 郭伟

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

摘要: 该文通过数学模型分析 IEEE 802.11 网络中, 终端采用分布式协调功能(DCF)方式发送一个数据包消耗的平均能量。研究发现, 存在一个使终端发送的平均能耗最小的最佳 RTS 门限, 它与终端的平均重传次数直接相关。在此基础上, 该文提出了一个 RTS 门限调整算法。计算机仿真结果证明该算法能使终端根据网络环境自适应地调整 RTS 门限到最佳值, 从而减少发送过程中的能量消耗。

关键词: IEEE 802.11, 分布式协调功能, RTS 门限, 自适应调整算法, 能量消耗

中图分类号: TP393.17

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)12-1983-05

An Adaptive RTS Threshold Adjusting Algorithm Based on Minimum Energy Consumption in IEEE802.11 DCF

Yan Shao-Hu Zhuo Yong-Ning Wu Shi-Qi Guo Wei

(National Key Laboratory of Communication, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract In IEEE 802.11 WLAN, the average energy consumption in transmission per frame through DCF mechanism is analyzed by mathematical model. Further analysis shows there is an optimum RTS threshold that can minimize the average energy consumption per frame. An algorithm of RTS threshold adjustment is developed based on the relationship of average retransmission times and optimum RTS threshold. With this algorithm a station can adaptively adjust its RTS threshold according to network environment in order to reduce energy consumption in transmission. All theoretical analysis and algorithm are validated by computer simulation.

Key words IEEE 802.11, Distributed Coordination Function (DCF), RTS threshold, Adaptive adjust algorithm, Energy consumption

1 引言

IEEE 802.11^[1]为无线局域网(WLAN)提供了具体的媒质访问控制(MAC)和物理层(PHY)规范, 其中规定了两种MAC机制, 一种是点协调功能(Point Coordination Function, PCF), 它是一种集中式的MAC协议; 另一种被称为分布协调功能(Distributed Coordination Function, DCF)。DCF是一种基于带冲突避免的载波侦听多重访问(CSMA/CA)机制, 它为数据发送提供了两种模式, 缺省模式为基本访问模式, 另一种是可选的RTS/CTS(Request-To-Send/Clear-To-Send)模式。一个终端可以工作在“混合”模式下, 当数据包载荷长度大于RTS门限时, 采用RTS/CTS方式传送, 反之则采用基本方式传送。

在无线局域网中, 能量问题是一个关键性问题。终端由于移动性需要, 基本上都采用电池供电。电池有限的电能使得移动终端不可能像固定网络的终端那样长时间有效地工

作, 如何减小电能消耗, 延长移动终端的有效工作时间, 成为人们研究的一个热点。IEEE 802.11 定义了节能模式, 但它需要一个中心控制点(如Access point)的支持。在分布式的环境下, 最直接的思路是采用功率控制, 如物理层上的分布式或自适应的功率控制^[2,3], 与功率控制相结合的MAC技术^[4]。如果用它组成Ad hoc网络, 在路由层上还可采用节约能量的路由协议^[5]。

事实上, 减少数据发送过程中的开销, 或者减少碰撞后重传的代价也可以节约能量。本文的研究正是基于这样的思路。当信道饱和时, 文献[6,7]在碰撞概率恒定独立的假设下, 用解析方法对 802.11 DCF 的性能作了定量的分析。文献[8,9]在文献[6,7]的基础上, 从 DCF 的机制建立数学模型, 分析数

据包长在特定区间上服从一定分布时, 终端发送一个数据包平均所需消耗的能量。文献[8,9]给出了 RTS 门限和平均发送

能耗之间的解析关系式,发现存在一个最佳的 RTS 门限,使得终端发送的平均能耗最小。然而,文献[8,9]的分析以及文献[8]中提出的算法仍然是基于网络饱和的前提条件,其结果有相当的局限性。本文通过进一步的分析,找到一般情况下

最佳 RTS 门限和终端平均重传次数之间的关系,并以此为基础设计出分布式算法,使得各终端能够根据网络环境自适应地调整 RTS 门限到最佳值,从而减少发送过程中的能量消耗。该算法采用的是优化特定网络参数的途径,因而能比较方便地在现有网络中实现。计算机仿真的结果验证了本文的理论分析和算法。

2 DCF方式下终端发送过程的能耗分析

在分布式环境下,由于没有中心控制点的支持,很难实现一些节能技术,如休眠模式。为了保证网络通信,通常需要各个终端随时监听信道。文献[10,11]研究显示,典型的 IEEE 802.11 网卡,在空闲、退避、发送和接收状态时其功率的比率近似为 1:1.1:1.4:1.05。虽然发送状态的功耗与其它状态相比并不是高出很多(主要与网卡的技术、工艺等有关),但可近似地认为网卡在工作状态下消耗一定的功率,而在发送时将消耗额外的功率。显然,除开休眠模式,网络协议所能控制的只有网卡的发送状态和发送状态的额外功率。本文只考虑 MAC 协议对终端发送能耗的影响,而不考虑网卡工作的稳定能耗,因为后者的统计规律相对简单得多。

本文的分析基于如下的假定:(1)终端在每一次发送尝试中,发生碰撞的概率 p 恒定且互不相关;(2)网络中不存在隐藏终端和暴露终端。文献[6,7]中给出了网络饱和时(终端的发送队列总是非空)计算碰撞概率 p 的解析式,此时碰撞概率仅仅取决于 3 个参数:网络的终端数,最大退避等级和最小退避窗口。而网络不饱和时,碰撞概率的计算就比较困难。但本文并不需要对之精确的计算,引入它只是为了便于分析。另外,假定理想信道,不考虑比特错误,亦即所有发送的失败都是由于碰撞而引起的,而且,只有当两个或者更多个终端在同一时刻开始发送才会发生碰撞。

发送过程的能耗应该等于终端发射功率与发射时间的乘积,同时假定所有的终端使用相同的发射功率,且没有采用任何功率控制技术。由于碰撞的原因,一个数据包可能需要多次重传才能成功(允许无限次重传)¹⁾,那么,发送它需要的能耗可表示如下:

$$\text{能耗} = \sum_{i=0}^{\infty} p^i (1-p) (i \times \text{不成功发送占用时间} + \text{成功发送占}$$

用时间) $\times$ 发射功率

表 1 给出了各类型帧的长度,作一个近似,将目的终端发送 CTS 帧和 ACK 帧的能耗计入发送终端。假定信道的速为 R ,终端的发射功率为 P_{tx} ,可以分别得基本方式和 RTS/CTS 方式下发送一个载荷长度为 l Byte 数据包的能耗。

表 1 各类型帧的长度

帧类型	帧长 (bit)
RTS (L_{rts})	160 + PHY
CTS (L_{cts})	112 + PHY
数据帧 (L_{data})	载荷 + MAC + PHY
ACK (L_{ack})	112 + PHY
MAC 帧头	224
PHY 帧头 ²⁾	192

RTS/CTS 方式:

$$f_{rts}(l, p) = \sum_{i=0}^{\infty} p^i (1-p) \left(i \times \frac{352}{R} + \frac{8l + 1376}{R} \right) \times P_{tx} \quad (1)$$

基本方式:

$$f_{bas}(l, p) = \sum_{i=0}^{\infty} p^i (1-p) \left(i \times \frac{8l + 416}{R} + \frac{8l + 720}{R} \right) \times P_{tx} \quad (2)$$

RTS/CTS 方式下,碰撞只发生在 RTS 帧上,而基本方式下碰撞后就需要重传整个数据帧。两种方式下发送的平均能耗不一样,主要是因为发送的开销和碰撞后重传的代价有所差别。如果数据包载荷长度 l 在区间 (a, b) (a, b 均为正整数)上服从一定的分布,其概率分布函数为 $F(i) = P\{l=i\}$ 。应用式(1)和式(3),当 RTS 门限为 L 时,终端发送的平均能耗为

$$g(L, p) = \sum_{i=a+1}^L [f_{bas}(i, p) \cdot F(i)] + \sum_{j=L+1}^b [f_{rts}(j, p) \cdot F(j)] \quad (3)$$

设下式的解为 L_0 , 则使得式(3)取得最小值的最佳 RTS 门限 $L^* = \lfloor L_0 \rfloor$ (详见文献[9])。

$$f_{bas}(L, p) = f_{rts}(L, p) \quad (4)$$

最佳的 RTS 门限 L^* 只和网络的参数有关,而与数据包载荷长度的分布无关。

另外,如果 $L_0 \leq a$ (对应于碰撞概率 p 比较大的情况),为了减少发送的平均能耗,所有的数据包都要以 RTS/CTS 方式发送;如果 $L_0 > b$, 这时碰撞概率比较小,只有以基本方式发送,才能达到同样的目标。

3 自适应 RTS 门限调整算法

通过对终端发送平均能耗的分析,可以发现对于给定的网络和不同的 RTS 门限,各终端存在一个发送平均能耗的最

1) 在 IEEE 802.11 中,定义了基本方式和 RTS/CTS 方式下的最大重传次数,文献[9]分析了不考虑最大重传次数并不会对分析结果产生太大的影响的原因。

2) 这里的物理帧头即 PLCP 头,其长度为 192bit,发送速率为恒定的 1Mbps,且不会因为后面的数据速率变化而变化。后面公式为了表述方便而做了近似,即没有反应这一特点。

小值。IEEE 802.11 中并没有指出 RTS 门限如何设定, 本文主要贡献在于提出了一个分布式算法, 使得各终端能够自适应地调整 RTS 门限到与最小平均能耗对应的最佳值。

3.1 对终端发送平均能耗的进一步分析

考虑终端发送一个数据包的平均重传次数 $N_r = \sum_{i=0}^{\infty} ip^i \cdot (1-p)$ 以及 $\sum_{i=0}^{\infty} p^i (1-p) = 1$, 式(1)和式(2)可以直接改写如下:

$$f_{\text{rts}}(l, p) \Rightarrow f_{\text{rts}}(l, N_r) = N_r \times \frac{352}{R} \times P_{\text{tx}} + \frac{8l + 1376}{R} \times P_{\text{tx}} \quad (5)$$

$$f_{\text{bas}}(l, p) \Rightarrow f_{\text{bas}}(l, N_r) = N_r \times \frac{8l + 416}{R} \times P_{\text{tx}} + \frac{8l + 720}{R} \times P_{\text{tx}} \quad (6)$$

如果把式(5)和式(6)代入式(3), 就可以把终端发送的平均能耗表示成RTS门限 L 和平均重传次数 N_r 的函数。更重要的是, 将式(5)和式(6)代入式(4), 可把式(4)的解 l_0 表示成 N_r 的函数, 从而最佳RTS门限 L^* 为

$$L^* = \lfloor l_0 \rfloor = \left\lfloor \frac{82}{N_r} - 8 \right\rfloor \quad (7)$$

式(7)反应了最佳RTS门限 L^* 与终端的平均重传次数之间的关系。这是后面RTS门限自适应调整算法的理论基础, 它给出了利用终端的平均重传次数来计算最佳RTS门限的方法。

3.2 自适应 RTS 门限调整算法描述

实际上, 如果知道了终端的平均重传次数, 利用式(7)就可以得到最佳RTS门限 L^* 。对终端来说, 要获取平均重传次数非常容易, 只需在网络接口上收集有关发送的一些统计信息即可。一般说来, 网络接口会自动提供数据收发统计信息, 即使没有提供, 也可以方便地添加统计计数器。

根据算法需要, 设置两个计数器 N_{suc} 和 N_{tx} , N_{suc} 记录成功发送的数据包数目, N_{tx} 记录终端的发送次数。需要注意的是, 对于基本方式来说, 每发一个数据帧是一次新的发送, N_{tx} 需要增1, 而对RTS/CTS方式来说, 每发一个RTS帧就是一次新的发送。由于碰撞的原因, 一个数据包可能要经过多次重传才能成功到达目的终端, 它可能对应了多次发送。

该算法的具体步骤如下:

在终端初始化阶段, 初始化 N_{suc} 和 N_{tx} 为0, RTS门限为预设值。

- (1) 如果MAC层的队列非空, 取一个数据包准备发送, 令 N_{suc} 增1;
- (2) 如果 N_{suc} 小于100, 则直接到第0步;
- (3) 计算平均重传次数: $N_r = (N_{\text{tx}} - N_{\text{suc}} - 1) / (N_{\text{suc}} - 1)$, 并利用式(7)得到更新的RTS门限值;
- (4) 确定数据包的发送方式: 如果数据包载荷长度大于当前的RTS门限, 则采用RTS/CTS方式, 否则采用基本方式, 并开始发送, 同时令 N_{tx} 增1;
- (5) 如果发送不成功, 则返回到第4步, 否则发送过程结束, 返回到第1步。

关于自适应RTS门限调整算法, 有两点说明: 其一是当 N_{suc} 小于100时, 才开始RTS门限的更新。这是因为在开始阶段, 网络还没有到达稳态, 终端发送的数据包数目比较少, 计算所得到的平均重传次数 N_r 可能出现大范围的波动, 从而导致RTS门限剧烈变化。其二是在利用式(7)求解RTS门限时, 如果统计所得的平均重传次数太大或者太小, 得到的RTS门限值将有可能超出数据包载荷长度的分布区间, 这时可直接设定RTS门限为分布区间的下限或者上限。

在这个RTS门限调整算法中, 各个终端所依赖的完全是自己网络接口的统计信息, 它不需要其它终端的协助, 更不需要终端相互之间的信息交换, 而且简单易于实现, 因而能更好地适用于分布式的环境。

4 仿真结果与分析

下面将采用仿真的方法, 对自适应RTS门限调整算法进行分析。仿真平台为UC Berkeley大学的NS2^[12], 采用DSSS的物理层, 相关参数如表2所示。

仿真中, 在每个终端的MAC模块加入了自适应RTS门限调整算法, 并记录终端每发送一个数据包所消耗的能量, 在仿真结束时对全网发送的所有数据包做平均, 可得到平均每个数据包消耗能量。同时, 在仿真中也记录各个终端每次调整后的RTS门限, 这样, 仿真结束时, 可以得到各个终端

表2 基本 DSSS 物理层的仿真参数

参数名	参数值	参数名	参数值
信道速率(Mbit/s)	1	载荷分布区间(均匀分布)	(32,1000]
传播时延(μs)	1	终端发射功率	50mW(17dBm)
时隙大小(μs)	20	最小冲突窗口 $CW_{\min}$	32
SIFS(μs)	10	最大冲突窗口 $CW_{\max}$	1024
DIFS(μs)	50	预设 RTS 门限(Byte)	550
网络终端总数(个)	10	仿真时间(s)	900

的平均RTS门限, 以及各个终端统计所得到的每个数据包的平均能耗。仿真时间为900s, 且各终端数据包产生的时间间

服从负指数分布。

图1给出了网络饱和时,按式(3)绘制的数据包发送平均能耗的理论曲线,碰撞概率 p 是按文献[6,7]给出的计算方法得到的。理论曲线显示了对应于平均能耗最小的最佳RTS门限的存在。同时,图1中也给出了各个终端自适应调整后RTS门限的平均值及其对应的每个数据包平均能耗,在图中以离散点表示。图2与图1类似,给出了网络不饱和时的理论曲线与仿真结果的对比。不同的是,此处的理论曲线是根据网络统计的平均重传次数而绘制的³⁾。可以清楚地看到,不管网络是否饱和,仿真所得的数据点都在理论曲线的最小值附近,从而充分表明了两点:其一是终端调整后的RST门限的平均值逼近理论最佳RST门限,其二是通过调整RST门限,终端发送数据包的平均能耗接近最小值。

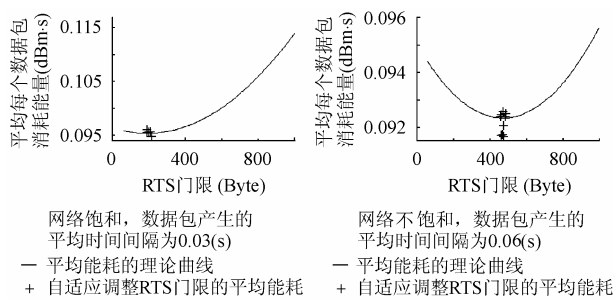


图1 RTS门限调整效果

图2 RTS门限调整效果

与理论值对比(网络不饱和)

与理论值对比(网络饱和)

图3是网络不饱和时,网络5个终端的RTS门限更新情况(另外5个终端与之相似)。图中显示,大约100s后,各个终端的RTS门限值趋于稳定。从式(7)可知,RTS门限更新值取决于各个终端统计的平均重传次数,只有当终端发送相当多的数据包后,平均重传次数才能比较稳定。当网络饱和时,由于各个终端能以较快的速度发送数据包,RTS门限会更快地稳定在最佳值附近。但是,各个终端仅仅使用自身的统计数据,更新的RTS门限也就不可避免在一个中心值附近波动。这个中心值也与理论最佳值有较小的差别也属正常。即使时间足够长,各个终端统计的平均重传次数也不可能完全一样,因而各个终端的RTS门限将分别收敛到各自的稳定值,但它们的均值将收敛到全网的最佳RTS门限。

图4是不同数据包产生平均时间间隔条件下,自适应调整RTS门限所得到的一个数据包平均能耗,与之对比的是恒定RTS门限(550Byte)时的平均能耗。显然,自适应调整RTS门限算法可以根据网络的碰撞情况,选择一个合适的RTS门

限,在发送开销与碰撞后重传的代价之间取一个合理的折衷,从而降低发送过程中的能量消耗。

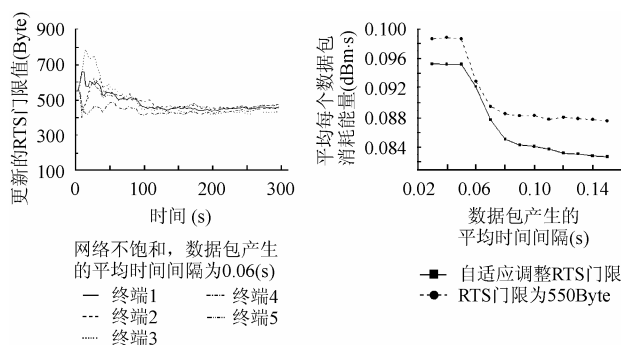


图3 RTS门限更新过程

图4 每个数据包平均能耗

(网络不饱和)

对比(不同数据包产生速率)

本文的自适应RTS门限调整算法完全依赖于各个终端的统计数据,在现有协议上容易实现,计算复杂度和空间复杂度都较低。然而,它的性能也是有限的,从前面的仿真数据中可以看到,它并不能大幅度地降低终端发送过程的平均能耗。若要大幅度地降低能耗,还是需要结合功率控制技术,但这样将大大增加系统的复杂度和成本。另外,如何将该算法扩展到多跳网络的环境下,还需要做进一步的分析。

5 结束语

分布式协调功能(DCF)是IEEE 802.11的一种最主要的媒体访问控制机制。本文分析了数据包载荷长度在给定区间服从某种分布时,终端以混合方式工作,发送一个数据包所需要消耗的平均能量。分析表明,对给定的网络环境,存在一个平均能耗的最小值,它对应于与数据包载荷长度分布无关的最佳RTS门限。本文给出了最佳RTS门限的求解方法,并找到最佳RTS门限与平均重传次数之间的关系,以此为理论基础设计了一个自适应RTS门限调整算法。终端可以通过该算法在不同的网络环境中,自动调整其RTS门限到最佳值,从而减少发送过程中的能量消耗,延长终端的有效工作时间。

参考文献

- [1] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Standard 802.11- 1999, IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, Ed., 1999.
- [2] Swetha Narayanaswamy, Vikas Kawadia, et al.. Power control in Ad hoc networks: theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocols. Proceedings of the European Wireless Conference--Next Generation Wireless Networks: Technologies, Protocols, Services and Applications,

3) 事实上,当网络不饱和时,分析求解终端发送数据包时发生碰撞的概率相当困难,但却不是本文的重点。因此,本文没有对之做具体分析,而直接采用统计的平均重传次数来得到理论曲线

- Florence, Italy, Feb. 25 – 28, 2002, 156 – 162.
- [3] Agarwal S, Katz R H, Krishnamurthy S V, *et al.*. Distributed power control in ad-hoc wireless networks. 2001 12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, vol.2, Sep/Oct 2001: 59 – 66.
- [4] Monks J P, Bharghavan V, *et al.*. A power controlled multiple access protocol for wireless packet networks. INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, Anchorage, USA, 2001 Vol.1: 219 – 228.
- [5] Chang Jae-Hwan, Tassiulas L. Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks. INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, 2000, Vol.18: 22 – 31.
- [6] Binachi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Commu.*, 2000, 18(3): 535 – 547.
- [7] Tay Y C, Chua K C. A capacity analysis for the IEEE 802.11 MAC protocol. *Wireless Networks*, 2001, 7(2): 159 – 171.
- [8] Yan Shaohu, Zhuo Yongning, Wu Shiqi. An adaptive RTS threshold adjust algorithm based on minimum energy consumption in IEEE 802.11 DCF. International Conference on Communication Technology, ICCT 2003, Beijing, China, Apr. 2003, Vol. 2: 1210 – 1214.
- [9] 严少虎, 卓永宁, 吴诗其等. IEEE 802.11 DCF 发送过程的能耗分析. 电子与信息学报, 2004, 26(7): 1107 – 1113.
- [10] Feeney L M, Nilsson M. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an Ad Hoc networking environment. INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, Anchorage, USA, 2001, Vol. 3: 1548 – 1557.
- [11] Fang Yue, McDonald A B. Cross-layer performance effects of path coupling in wireless Ad Hoc networks: power and throughput implications of IEEE 802.11 MAC. Performance Computing and Communications Conference, 2002. 21st IEEE International, Phoenix, AZ, 2002,: 281 – 290.
- [12] <http://www.isi.edu/nsnam/>.
- 严少虎: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为移动自组织网中的 MAC 和路由技术.
- 卓永宁: 男, 1970 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为移动自组织网和移动通信、卫星通信.
- 吴诗其: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向是移动通信和个人通信, 中国通信学会第三、四、五届理事, 国家“863”计划十五周年先进个人.
- 郭 伟: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究通信与信息系统, 中国电子学会和中国通信学会高级会员.