

IEEE802.11 DCF 发送过程的能耗分析¹

严少虎 卓永宁 吴诗其 郭伟

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

摘要: 该文通过数学模型分析网络处于饱和状态时, 终端采用 DCF 的基本方式和 RTS/CTS 方式发送一个固定长度的数据包所需要消耗的能量. 进而, 得到数据包载荷长度在给定的区间上服从一定的分布条件下, RTS 门限和终端发送一个数据包所需消耗能量的平均值之间的关系. 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, 给出了最佳 RTS 门限的求解方法. 计算机仿真结果很好地验证了理论分析的正确性.

关键词: 分布式协调功能, RTS 门限, 能量消耗, IEEE 802.11

中图分类号: TN913.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)07-1107-07

Analysis on Energy Consumption in Transmission of IEEE802.11 DCF

Yan Shao-hu Zhuo Yong-ning Wu Shi-ji Guo Wei

(*Institute of Comm. and Infor. Eng., UEST of China, Chengdu 610054, China*)

Abstract In saturated IEEE 802.11 WLAN, the energy consumption in transmission per frame through basic mode and RTS/CTS mode is analyzed through mathematical model. The relation of RTS threshold and average energy consumption per frame is produced in the assumption that the frame payload's length is distributed in a given interval. Further analysis shows there is an optimum RTS threshold that can minimize the average energy consumption. The method of calculating optimum RTS threshold is also presented. All theoretical analysis is validated through computer simulation.

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

1 引言

IEEE 802.11^[1] 是 IEEE 802.11 研究组为无线局域网 (WLAN) 制定的一个标准文档, 它提供了 WLAN 中具体的媒质访问控制 (MAC) 和物理层 (PHY) 规范. 其中规定了两种媒质访问机制, 一种是点协调功能 (Point Coordination Function, PCF), 它是一种集中式的 MAC 协议, 支持无冲突和时延受限业务; 另一种被称为分布式协调功能 (Distributed Coordination Function, DCF), 是一种完全分布式的 MAC 协议, 适用于分布式环境.

在无线局域网中, 终端由于移动和便捷的需要, 基本上都采用电池供电, 因而能量消耗成了一个突出的问题. 为了减小终端的电能消耗, 延长终端的有效工作时间, IEEE 802.11 定义了节能模式, 但它通常需要一个中心控制点 (如 AP, 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, 在路由层上还可以采用节约电能的路由协议^[5].

¹ 2003-01-23 收到, 2003-06-18 改回

国家 863 项目资助课题 (项目编号: 2001AA120303)

当信道饱和时, 文献 [6,7] 在碰撞概率恒定独立的假设下, 用解析方式对 802.11 DCF 的性能作了定量分析. 基于这些研究成果, 本文从另外的角度——发送一个数据包平均所需消耗的能量——对 802.11 DCF 的性能进行理论分析和仿真验证. 分析显示, 在饱和状态下, 对于定长的数据包采用基本方式或 RTS/CTS(Request-To-Send/Clear-To-Send) 方式传送, 其消耗的能量并不相等. 究竟采用何种方式, 取决于终端的 RTS 门限. 我们建立数学模型来分析 RTS 门限和平均发送能耗之间的关系, 发现存在一个最佳的 RTS 门限, 使得终端发送数据包的平均能耗最小, 同时给出求解最佳 RTS 门限的解析方法. 计算机仿真的结果很好地验证了我们的理论分析.

2 IEEE 802.11 的分布式协调功能 (DCF)

IEEE 802.11 DCF 采用了随机访问机制. 当终端有新的数据需要发送时, 它首先监测信道, 当信道空闲的时间等于 DIFS(Distributed InterFrame Space) 时, 终端在发送数据包之前会选择—个随机延迟时间. 为了避免一个终端长时间占用信道, 在两次连续的发送之间必须进行随机延迟. DCF 的随机延迟采用以时隙 δ 为单位的离散时间刻度和二进制指数退避策略. 在发送数据包时, 延迟时间在 $[0, W - 1]$ 之间均匀选取 (W 被称为竞争窗口), 并将之赋给延时计数器. 对于第一次发送, $W = CW_{\min}$, CW_{\min} 被称为最小竞争窗口, 在每次发送失败之后, W 乘 2, 直到 $W = CW_{\max} = 2^m \cdot CW_{\min}$. 当终端监测到信道空闲每超过一个 δ , 延时计数器减 1; 当监测到信道忙时, 延时计数器保持, 并在信道空闲时间等于 DIFS 时重新激活. 当延迟计数器值等于 0 时, 终端发送数据包. δ , CW_{\min} 和 CW_{\max} 的值跟具体的物理媒质有关, 具体可参见文献 [1].

IEEE 802.11 DCF 为包的发送提供了两种模式, 其缺省模式为基本访问模式, 另一种是 RTS/CTS 模式. 对于两次握手的基本方式, 接收方在收到数据包后, 向发送方发送 ACK(Acknowledgment) 帧, 对收到的数据包进行确认. 而在 RTS/CTS 方式下, 发送方在发送数据之前应先发控制帧 RTS, 接收方收到 RTS 后用控制帧 CTS 回应, 发送方在收到确认的 CTS 后发数据包, 接收方如果正确接收即用 ACK 帧确认. RTS/CTS 模式能有效解决隐藏终端 (hidden terminal) 问题, 减少碰撞的持续时间, 改善系统性能. 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.

3 DCF 方式下终端发送的能耗分析

在分布式环境下, 没有中心节点的支持, 因而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, 这势必增大终端的能耗. 文献 [8, 9] 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 1:1:1.4:1.05. 虽然发送的功耗与其它状态的功耗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. 本文重在研究 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.

这一节首先分析在任意一个时隙, 一个终端发起一次发送和该发送发生碰撞的概率, 并根据碰撞概率, 分析终端在基本方式和 RTS/CTS 方式下, 发送一个固定长度数据包的平均能耗. 然后, 分析当载荷长度服从给定区间内的特定分布时, RTS 门限对发包平均能耗的影响.

3.1 任一时隙终端发送而碰撞的概率

文献 [6] 基于假设: (1) n 个终端竞争同一无线信道, 不存在隐藏终端和暴露终端, 且各终端总有数据包等待发送; (2) 在每一次发送尝试中, 各包发生碰撞的概率 p 恒定且互不相关的条件下, 得到 802.11 DCF 的性能模型为二维离散时间马尔可夫链.

分析这个二维离散时间马尔可夫链的稳态分布, 利用概率归一化条件, 可以求得一个终端在任意选择的时隙发送的概率为

$$\tau = \frac{2(1 - 2p)}{(1 - 2p)(W + 1) + pW(1 - (2p)^m)} \quad (1)$$

其中 m 为最大退避等级, W 是最小退避窗口。

考虑 n 个终端共享同一无线信道时, 某终端的一次发送发生碰撞的概率 p 应等于在剩下的 $n - 1$ 个终端中至少有一个终端在同一时隙发送的概率, 因此有

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (2)$$

式 (1) 和式 (2) 构成含两个未知数 τ 和 p 的非线性方程组, 可以通过计算机数值解法求得其近似解。文献 [6] 证明由式 (1), (2) 构成的方程组有唯一解。另一方面该方程组也显示当网络处于饱和状态时, p 仅仅取决于网络的 3 个参数: 终端数, 最大退避等级和最小退避窗口²。

3.2 基本方式和 RTS/CTS 方式下终端发送固定长度数据包的能耗

下面我们分析一个终端为了发送一个载荷长度为 l (byte) 的数据包所需要消耗的能量。

首先, 在发送时, 发送的能耗应该等于终端发射功率与发射时间的乘积。这里, 我们假定所有的终端使用相同的发射功率, 而没有采用任何的功率控制技术。其次, 由于碰撞的原因, 使得一个数据包可能需要多次重传才能成功, 如图 1 所示。其中, p 是终端在任意一个时隙发送而碰撞的概率。不难得到, 一个包经过 i 次重传后成功发送的概率为 $p^i(1 - p)$ (i 可以是 0 或任意自然数)。

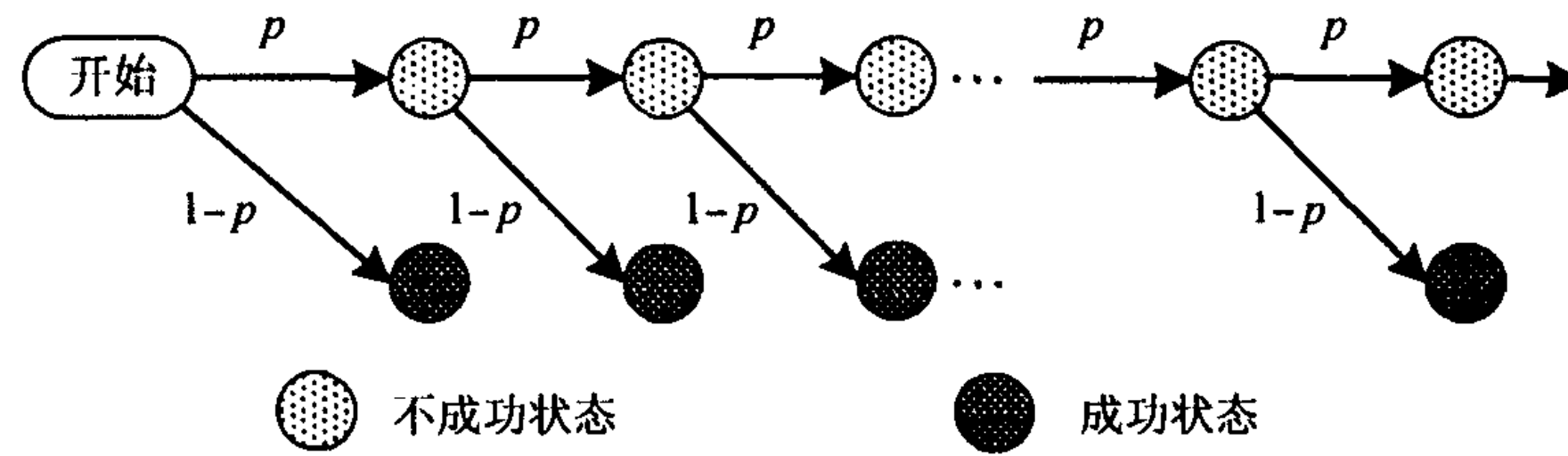


图 1 终端发送过程状态转移图

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。由于分布式网络中各个终端随机选择目的终端, 收发对称, 这个近似是合理的。

根据表 1 的数据, 一次发送过程中, 终端发送的数据总量归纳如表 2(不考虑分段的情况)。

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
Data(L_{data})	Payload+MAC+PHY
ACK(L_{ack})	112+PHY
MAC 帧头	224
PHY 帧头	192

² 文献 [7] 从平均回退的时隙数入手, 分析终端发送的包发生碰撞的概率 p , 最终是通过求解一个非线性方程而得到。在这个方程中, 碰撞概率也仅仅与 n, m, W 有关。而且, 它与文献 [6] 得到的结果非常接近。

表 2 一次发送的数据总量 (bit)

	基本方式	RTS/CTS 方式
不成功发送	$8l + 416 (L_{data})$	$352 (L_{rts})$
成功的发送	$8l + 720 (L_{data} + L_{ack})$	$8l + 1376 (L_{rts} + L_{cts} + L_{data} + L_{ack})$

进一步, 假定信道的速率为 R (为简化分析, 不区分发送过程中物理帧头的速率与数据部分的速率, 事实上可能是不一样的, 参见文献 [1]), 终端的发射功率为 P_{tx} (此处只考虑射频功率), 我们可以分别得到两种方式下发送这个包的能耗:

RTS/CTS 方式:

$$f_{rts}(l, p) = \sum_{i=0}^{\text{shortRT}} p^i (1-p) \left(i \times \frac{352}{R} + \frac{8l + 1376}{R} \right) \times P_{tx} \quad (3)$$

基本方式:

$$f_{bas}(l, p) = \sum_{i=0}^{\text{LongRT}} p^i (1-p) \left(i \times \frac{8l + 416}{R} + \frac{8l + 720}{R} \right) \times P_{tx} \quad (4)$$

式 (3) 和式 (4) 中的 ShortRT 和 LongRT 分别对应于 IEEE 802.11 中定义的短帧最大重传次数和长帧最大重传次数. 为简化起见, 我们认为这两个变量为无穷大, 亦即一个包可以经历无穷多次重传, 直到成功为止. 通过分析可知, 在实际的网络中, 即使碰撞概率为 0.6, 经过 7 次重传, 发送成功的概率仍可达 0.98 以上. 因而这种近似不会对分析结果产生太大的影响³.

3.3 RTS 门限对终端发送平均能耗的影响

IEEE 802.11 中的规定, 当数据包载荷长度大于 RTS 门限时, 以 RTS/CTS 方式发送, 否则以基本方式发送. 假定数据包载荷长度在给定区间上服从一定的分布, 我们讨论 RTS 门限对终端发送一个数据包的平均能耗的影响.

RTS/CTS 方式由于引入 RTS, CTS 帧而增大了开销, 其好处在于碰撞只发生在 RTS 帧上, 一旦发生碰撞, 也只需要重传 RTS 帧, 因而可以有效地减少碰撞的持续时间. 而基本方式

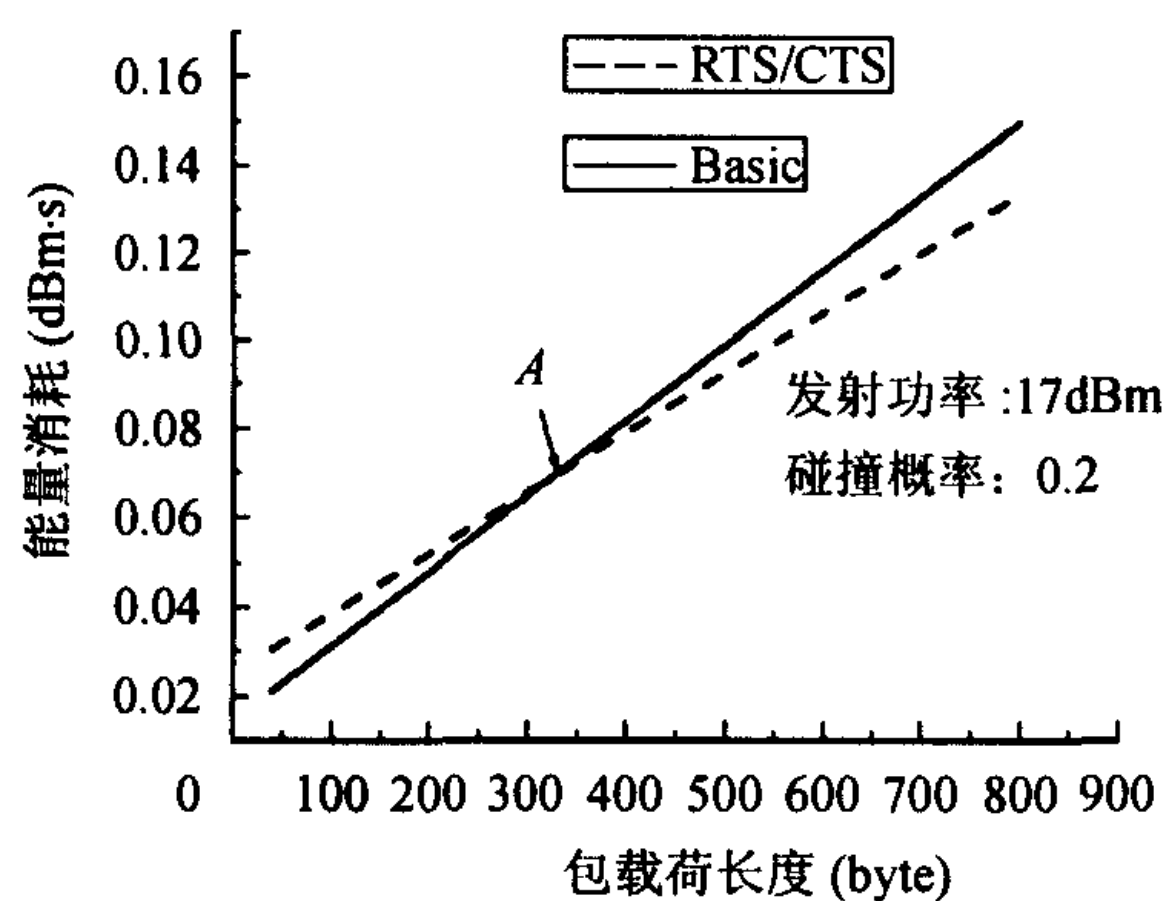


图 2 基本方式和 RTS/CTS 方式发送能耗比较

则不需要 RTS、CTS 帧来预留信道, 减少了开销, 同时也增加了碰撞后重传的代价. 直观而言, RTS/CTS 方式适合于较长的数据包, 而基本方式则适合于较短的数据包, 这也正是 IEEE 802.11 提供两种方式的原因. 如果考虑到发送过程的能量消耗, 也有同样的问题, 因为任何一次重传, 都会带来相应的能量消耗. 显然, 两种方式的能耗不太一样. 图 2 给出了一定碰撞概率、发射功率以及信道速率 (1Mb/s) 条件下, 两种方式的能耗随数据包载荷长度变化的情况.

³ 文献 [10] 在文献 [6] 的基础上分析了考虑最大重传次数时的二维离散时间马尔可夫链, 而文献 [6] 的作者 Bianchi 认为文中没有考虑最大重传次数, 并不是所建数学模型的错误, 而只是建模的假设条件不同. 本文沿用文献 [6] 的假设条件.

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 (3) 和式 (4), 当 RTS 门限为 L 时, 终端发送的平均能耗为

$$g(L, p) = \sum_{i=a+1}^L [f_{\text{bas}}(i, p) \cdot F(i)] + \sum_{j=L+1}^b [f_{\text{rts}}(j, p) \cdot F(j)] \quad (5)$$

设使得 $g(L, p)$ 最小的最佳 RTS 门限为 L^* , 则应有 $g(L^*, p) \leq g(L^* - 1, p)$ 和 $g(L^*, p) \leq g(L^* + 1, p)$ 同时成立. 将式 (5) 代入这两个不等式, 考虑到 $F(i) \geq 0$, 可得到:

$$f_{\text{bas}}(L^*, p) \leq f_{\text{rts}}(L^*, p), \quad f_{\text{rts}}(L^* + 1, p) \leq f_{\text{bas}}(L^* + 1, p) \quad (6)$$

对于确定的碰撞概率 p , $f_{\text{bas}}(l, p)$ 和 $f_{\text{rts}}(l, p)$ 是关于 l 的线性函数, 再由式 (6), 可知它们在 $[L^*, L^* + 1]$ 上必有一个交点, 交点的坐标可由下面的方程得到, 设为 l_0 :

$$f_{\text{bas}}(l_0, p) = f_{\text{rts}}(l_0, p) \quad (7)$$

对 l_0 取整即可得到最佳 RTS 门限 L^* , 即 $L^* = \lfloor l_0 \rfloor$. 表面看来, 最佳 RTS 门限应该和数据包载荷长度的分布有关, 但事实上并非如此, 它只和网络的参数有关. 在图 2 中, 可以直观地看到式 (7) 的物理意义, 如将 RTS 门限设为 A 点对应的载荷长度, 则可以使终端发送的平均能耗最小.

当然, 有可能出现这样的情况, $f_{\text{bas}}(l, p)$ 和 $f_{\text{rts}}(l, p)$ 的交点 l_0 不在 $(a, b]$ 内. 如果 $l_0 \leq a$, 此时碰撞概率 p 比较大, 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 $l_0 > b$, 则碰撞概率比较小, 各终端只有以基本方式发送, 才能降低发送的平均能耗.

因为最佳 RTS 门限和数据包载荷长度的分布无关, 为方便分析, 我们假定数据包的长度 l 在区间 $(a, b]$ 上服从均匀分布, 则终端发送的平均能耗为

$$g(L, p) = \sum_{i=a+1}^L \frac{f_{\text{bas}}(i, p)}{b-a} + \sum_{j=L+1}^b \frac{f_{\text{rts}}(j, p)}{b-a} \quad (8)$$

此时, 对于一个确定的碰撞概率 p , $g(L, p)$ 具有形如二次函数的特性, 如图 3 所示 (假设数据包载荷长度分布区间为 $(32, 1000]$, 信道速率为 1Mb/s).

IEEE 802.11 中定义了 RTS 门限, 终端可根据这个门限值在基本方式和 RTS/CTS 方式之间切换, 但标准并没有指出 RTS 门限如何设定, 实际中一般是手工配置. 从式 (7) 可以得到一个以减小发送平均能耗为目标的最佳 RTS 门限, 从而对终端 RTS 门限的设置具有指导意义.

4 仿真结果与分析

下面, 我们将采用仿真的方法, 对 802.11 DCF 方式下终端发送数据包的平均能耗进行分析. 我们的仿真平台为 UC Berkeley 大学的 NS2, 采用 DSSS 的物理层, 相关参数如表 3 所示.

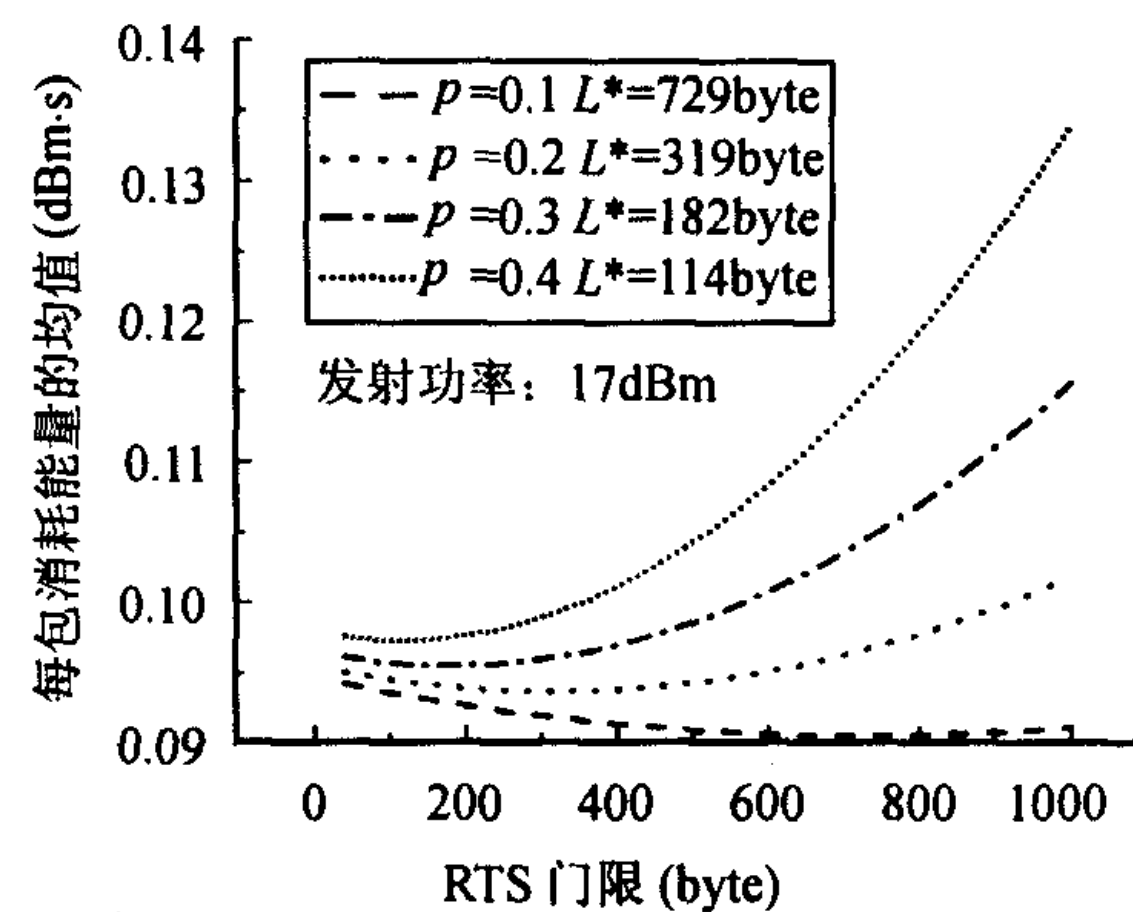


图 3 不同的碰撞概率对应的平均能耗曲线

表 3 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 (Mb/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	单次仿真时间 (s)	600

在仿真中, 任何一个终端, 只要发送数据, 都记录它的能量消耗, 同时记录成功发送的数据包的数目. 仿真一定时间后, 对全网进行平均, 可得到终端发送一个数据包所需要消耗的平均能量. 我们设置不同的 RTS 门限, 通过仿真来查看终端发包的平均能耗随 RTS 门限的变化情况. 对于同一个 RTS 门限, 采用不同的随机数种子, 分别做了 5 次仿真.

为了得到理论曲线, 我们首先利用计算机数值解法求解式 (1) 和式 (2) 得到碰撞概率 p , 然后用式 (8) 作出理论曲线, 用它与仿真的结果对比. 下面给出了终端数分别为 5 和 10 时, 仿真结果与理论曲线的比较图.

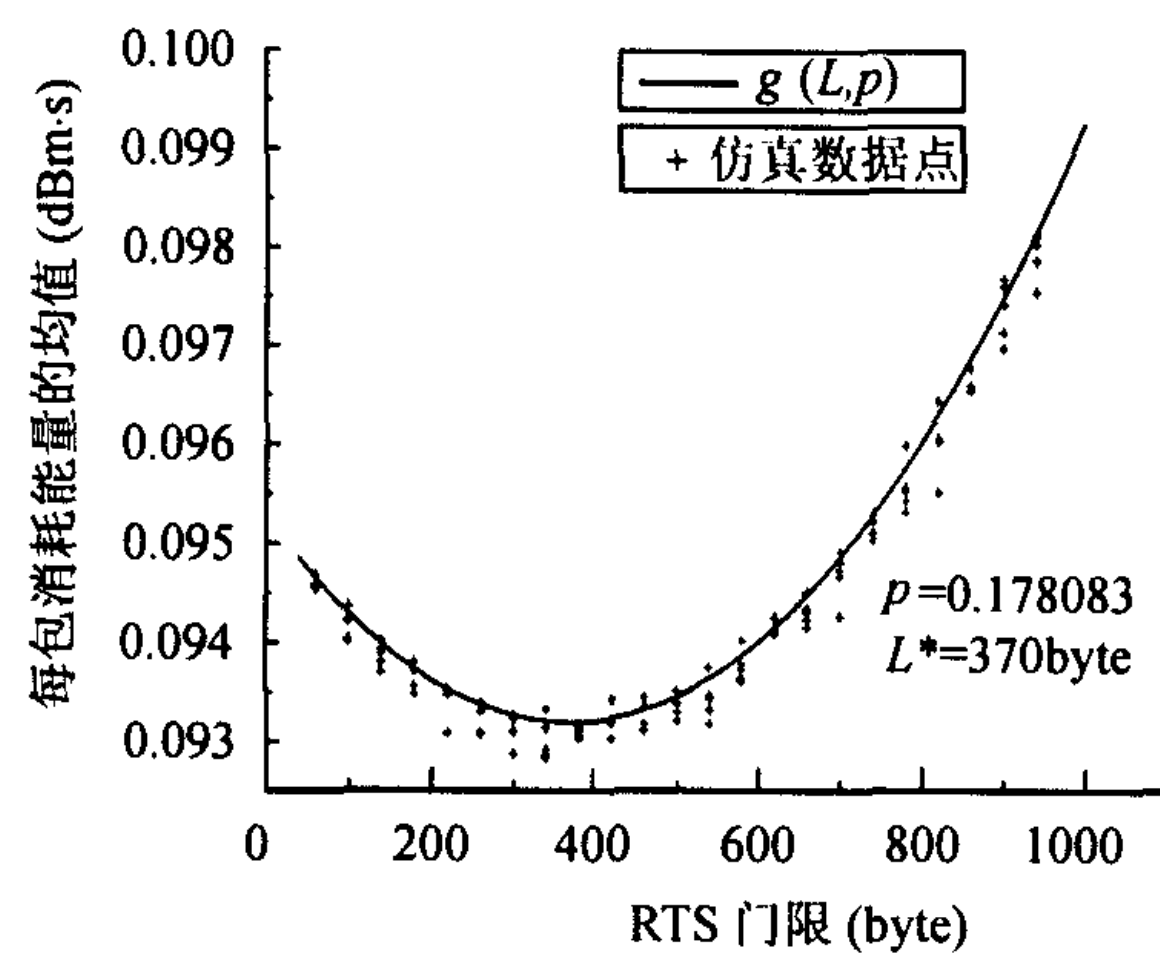


图 4 5 个终端网络仿真结果与理论值比较

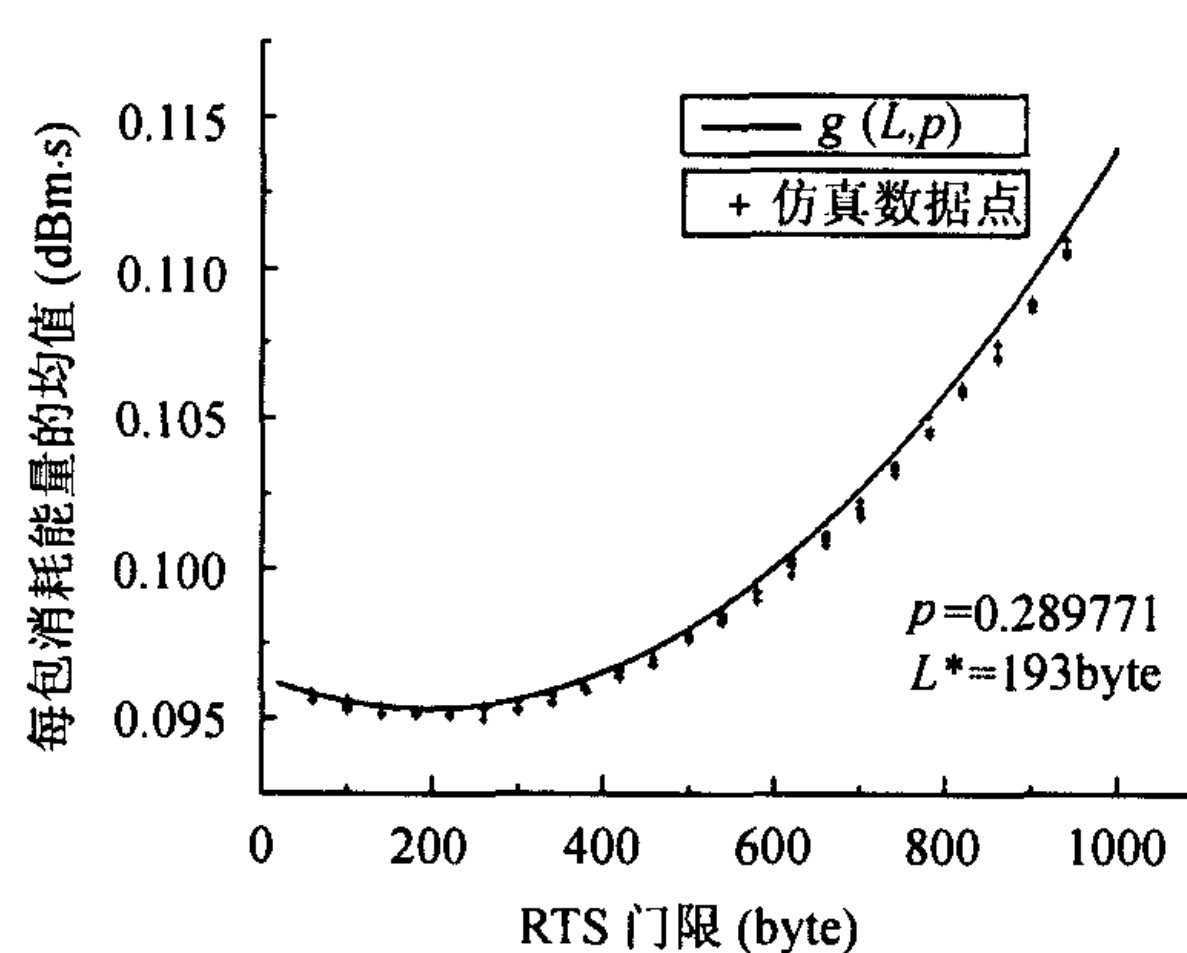


图 5 10 个终端网络仿真结果与理论值比较

在这组曲线中, 仿真所得到的数据点与理论曲线 $g(L, p)$ 非常接近, 证明了终端发送的平均能耗函数式的正确性. 值得注意的是, 仿真的数据点大多略低于理论曲线, 这是因为在理论计算中, 终端的发送可以无限次重传直到成功为止, 而在仿真中, 基本上不会出现无限次重传的情况.

5 结束语

分布式协调功能 (DCF) 是 IEEE 802.11 的一种主要的媒体访问控制机制. 本文从理论推导和仿真分析的角度, 分析了网络处于饱和状态时, 在 DCF 的基本方式和 RTS/CTS 方式下, 终端发送固定长度数据包所需要消耗的能量. 文中给出了数据包长度服从一定分布时, 终端发送一个数据包所需要消耗能量平均值的表达式. 分析表明, 对于给定的网络环境, 终端发送数据包的平均能耗存在一个最小值, 它对应于最佳的 RTS 门限. 我们给出了最佳的 RTS 门限的求解方法, 网络的终端按此值设置 RTS 门限, 可以使其发送一个包的平均能耗最小, 从而减少发送过程中的能量消耗, 延长终端的工作时间.

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] Narayanaswamy S, Kawadia V, *et al.*. Power control in Ad-hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol. Proceedings of the European Wireless Conference-Next Generation Wireless Networks: Technologies, Protocols, Services and Applications. Italy, Feb. 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, San Diego, CA, 2001, vol.2: 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] Jae-Hwan Chang, Leandros Tassiulas. Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks, INFOCOM 2000, Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Tel Aviv, Israel, Proceedings. IEEE, 2000, Vol.18: 22-31.
- [6] Binachi G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed coordination function. *IEEE J. on Selected Areas in Comm. Unications*, 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] 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.
- [9] Fang Y, 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.
- [10] Wu Haitao, Peng Yong, Long Keping, *et al.*. A simple model of IEEE 802.11 wireless LAN. International Conferences on Info-tech and Info-net, Beijing, 2001, Vol.2: 514-519.

严少虎: 男, 1976 年生, 博士生, 主要研究方向是移动自组织网中的 MAC 和路由技术.

卓永宁: 男, 1970 年生, 讲师, 博士生, 主要研究方向是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, 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, 主要研究方向是移动通信和个人通信.

郭伟: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会和中国通信学会高级会员, 主要研究通信与信息系统.