

## 一种新的增加 Ad hoc 网络吞吐量的 MAC 协议设计

彭玉旭 张力军

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

**摘要:** 该文提出一种新的 MAC 协议, 其目的是增加 802.11b 的网络容量。虽然 IEEE 的 802.11b 协议提供了较高的原始速率, 但是物理层和 MAC 层随速率提高而引入的额外开销也不断增大。此外, 物理层规范定义了两种物理层数据单元格式, 但是研究者没有研究如何利用开销小的物理层数据单元来提高 802.11b 的容量。该文提出一种物理层自适应的算法, 它能自适应地选择 802.11b 物理层规范中的两种不同物理层数据单元格式进行传输, 并计算相应的网络分配向量。通过 NS 仿真证明, 该协议能够提高网络的性能, 如端到端的时延, 有效吞吐量和传包率, 特别是在高负载, 高速率情况下。

**关键词:** MAC; 802.11b; Ad hoc 网络; 有效吞吐量

**中图分类号:** TN915

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2007)02-0328-05

## A Novel Throughput Enhancement MAC Protocol for Ad hoc Networks

Peng Yu-xu Zhang Li-jun

(College of Communications and Information Engineering, Nanjing Univ. of Posts and Telecommunications,  
Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The paper proposes a new MAC protocol to improve the capacity of 802.11b. IEEE 802.11b provides very high raw bandwidth. However, the overheads introduced by the physical and MAC layers are also increasingly substantial. Moreover, there are two kinds of PLCP (physical layer convergence protocol) PPDU (PLCP protocol data unit), but many researchers did not take full advantage of short PLCP PPDU to improve the capacity of 802.11b. A new physical-adaptation algorithm is proposed, which is able to adaptively choose long or short PLCP PPDU and compute network allocation vector (NAV). The proposed MAC protocol and 802.11b were evaluated by NS. Performance results reveal that the proposed MAC protocol performs better than the 802.11b in term of average end-to-end delay, goodput and average successful delivered rate, specially for high load and high raw bandwidth.

**Key words:** MAC; 802.11b; Ad hoc Networks; Goodput

### 1 引言

由于 Ad hoc 网络不需要基础设施, 没有集中控制中心, 节点间同步困难, 因此基于载波侦听/冲突避免(CSMA/CD)的接入方式成了主流。802.11a/b/g 是在 Ad hoc 网络中被广泛使用的基于竞争的 MAC 层协议, 并且成了商用无线网卡所支持的 MAC 协议<sup>[1,2]</sup>。但是由于共享无线信道, 在负载较高或竞争节点增加时, 其性能下降很大。为了提高 802.11b 的系统容量, 许多学者提出了不同的方法, 如 Cali 等提出一种自适应的退避方法提高 MAC 协议容量<sup>[3]</sup>; Kim 和 Hou 利用帧调度算法来提高 802.11 协议的容量<sup>[4]</sup>; Kwon 等提出利用调整退避算法避免冲突的方法来提高协议容量<sup>[5]</sup>; Yang Xiao 提出用汇聚帧和捎带确认消息的方法来提高 802.11 的性能<sup>[6]</sup>, 其中汇聚帧是指当信道竞争成功后, 把 MAC 层队列内的多个帧, 一个接一个地传输, 而不需要重新竞争信道, 从而节约控制开销; Heuvel 等提出用功率控制的方法来提高 802.11 的性

能<sup>[7]</sup>; Jungmin So、Asis Nasipuri 和 Priyank Porwal 等提出基于多信道的 MAC 协议<sup>[8-13]</sup>, 其主要思想是 802.11 物理层规范定义了几个正交的信道, 而使用正交信道可以同时传输而不相互干扰, MAC 协议根据信道环境动态的选择正交信道中的一个信道进行数据传输。但是, 上述的改进仅限于对 MAC 协议的改进。

为了减少物理层的开销, 802.11b 的物理层规范定义了两种物理层数据单元格式, 一种是带有长导频和物理层头部的数据单元格式(long PLCP PPDU), 另外一种是有短导频和物理层头部的数据单元格式(short PLCP PPDU), 由于后者占用信道时间短, 能够提高网络的性能。因此, 本文从另外一个角度研究增加 802.11b 协议的性能, 其基本思想是利用 802.11b 协议的物理层规范中定义的带有短导频和物理层头部的数据格式来减少信道占用时间, 从而减少传输时延, 增加单位时间内能够传输包的数目。

目前, 大部分 MAC 协议的研究都是基于带有长导频和物

理层头部的数据格式, 本文第一次提出利用具有短导频和物理层头部的数据单元格式来提高802.11b协议性能, 并提出一个新的MAC协议, 它能够自适应地选择物理层的数据单元格式进行传输。为了方便, 本文把具有长导频和物理层头部的数据单元格式简称为长数据格式, 把具有短导频和物理层头部的数据单元格式简称为短数据格式。本文创新之处有两个方面, 一是提出用短数据格式增加吞吐量的思想, 另外一方面是设计了新的网络分配向量计算方法。本文第2节分析了不同物理层数据格式下的系统容量; 第3节描述了新的MAC协议的基本思想并提出一个自适应的算法来选择不同的物理层数据格式进行传输; 仿真结果和分析在第4节给出; 最后是结束语。

## 2 802.11b的接入机制和容量分析

分布式协调功能(Distributed Coordination Function, DCF)是以一种尽力而为的机制来支持突发的数据传送, 它是IEEE 802.11 MAC层的基本功能。802.11规定一个基本服务集(Basic Service Set, BSS)中的所有节点都必须支持DCF。DCF中分组的传送可以使用两种方法: 缺省的是2次握手机制(即基本接入方法), 目的节点接收到分组后, 发送一个MAC层的确认(Acknowledgment, ACK)包以确认分组的成功发送; 另一种可选方法是4次握手机制, 使用请求发送(Request To Send, RTS)/清除发送(Clear To Send, CTS)技术在数据发送之前预留信道。RTS/CTS方法用来减少由于隐藏终端带来的性能降低, 然而在802.11协议中, 为了减少物理层开销, 定义了两种物理层数据格式: 长数据格式和短数据格式, 其中长数据格式是必须实现的, 而短数据格式是可选的。

MAC层的RTS, CTS, ACK和DATA帧称为物理层服务数据单元(PLCP Service Data Unit, PSDU), 在传输之前都要加上一个物理层的导频(PLCP Preamble)和物理层头部(PLCP Header)。由于长数据格式中导频和PLCP头部需要占用信道192 μs<sup>[2]</sup>, 在基于RTS/CTS方式的数据交换方式中,

一次成功的数据交换, 导频和PLCP头部就占用了768μs; 而短数据格式中导频和PLCP头部需要占用信道96μs<sup>[2]</sup>, 如果使用RTS/CTS方式交换数据, 则导频和PLCP头部占用384 μs, 比长数据格式少384μs, 这样, 在单位时间内就可以传送更多的包, 从而提高系统的吞吐量; 同时也减少了包的传输时延。

MAC协议中的控制帧(如 RTS, CTS 和 ACK)、广播帧和多播帧只能按基本速率集(basic rate set)内的速率传输, DATA 帧则按数据速率(data rate)传输。

根据文献[1,14], 可以计算出基于 RTS/CTS 的 4 次握手的成功交换一次数据需要的平均时间。

$$T = T_{DIFS} + T_{RTS} + 3T_{SIFS} + T_{CTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + T_{slot} \times CW_{min} / 2 + 4T_{delay} \quad (1)$$

其中  $CW_{min}$  是最小竞争窗口的值;  $T_{delay}$  是传播时延, 一般为 2 μs;  $T_{RTS}$ 、 $T_{CTS}$ 、 $T_{DATA}$  和  $T_{ACK}$  代表相应物理层帧的传输时间。对于物理层帧的传输时间,  $T_{frame} = L_{frame} / R_{frame} + T_{PHY_{hdr}}$ , 其中  $L_{frame}$  是 MAC 层帧长度,  $R_{frame}$  是 MAC 层选择的帧的传输速率,  $T_{PHY_{hdr}}$  是物理层导频和头部占用时间, 对于长数据格式  $T_{PHY_{hdr}} = 192\mu s$ ; 对于短数据格式,  $T_{PHY_{hdr}} = 96\mu s$ 。

根据式(1)和表 1 中 802.11b 的参数, 可以计算出在数据速率为 11Mbps 和基本速率为 2Mbps 下, 利用 RTS/CTS 成功传输一个包所占信道的时间, 见表 2。

在表 2 中, 长导频是指所有的物理层数据都采用长数据格式传输; 2 长 2 短是指 RTS/CTS 帧采用长数据格式, 而 DATA 和 ACK 帧采用短数据格式传输; 短导频是指所有物理层数据都采用短数据格式传输。

表 3 是根据表 2 计算的链路容量, 该容量假设两个节点在没有干扰的情况的平均传输能力, 包大小是指应用层的包大小。通过表 3 的理论分析可以看出, 使用短数据格式能够提高网络的有效吞吐量, 随着数据包大小的增加, 容量增加也更明显。例如, 2 长 2 短与长导频相比, 在包大小为 64Byte 时, 容量增加 53.1kbps; 而在包大小为 1024Byte 时, 容量增加 370.8kbps。

表 1 802.11b 的典型参数

SIFS( $T_{SIFS}$ )	10μs	DIFS( $T_{DIFS}$ )	50 μs	Slot Time( $T_{slot}$ )	20μs
Date rate	1,2,5.5,11Mbps	Basic rate	1,2Mbps	PHY Header	192(96)μs
ACK	14Byte	RTS	20Bytes	CTS	14Byte
MAC header	34Byte(数据帧)	$CW_{min}$	31	$T_{delay}$	2μs

表 2 802.11b 在 11/2 Mbps\* 下传输一个 UDP 包所占用的时间(μs)

包大小(Byte)	64	128	256	512	1024
长导频	1459.6	1506.2	1599.3	1785.5	2157.8
2 长 2 短	1267.6	1314.2	1407.3	1593.5	1965.8
短导频	1075.6	1122.2	1215.3	1401.5	1773.8

\*a/b Mbps 表示数据速率是 a Mbps, 基本速率是 b Mbps。

表 3 802.11b 在 11/2 Mbps 速率下传送 UDP 类型包的链路容量 (kbps)

包大小(Byte)	64	128	256	512	1024
长导频	350.8	679.8	1280.6	2294.1	3796.4
2长2短	403.9	779.2	1455.3	2570.5	4167.2
短导频	475.99	912.5	1685.2	2922.66	4618.32

### 3 新 MAC 协议的基本思想和网络分配向量 NAV (Network Allocation Vector) 的计算

虽然短数据格式能够提高网络的性能,但不是每个节点都支持短数据格式,而且节点只知道自己是否支持短数据格式,因此本文提出一种自适应的方法来解决使用哪种数据格式传输的问题。

本文假设:(1)物理层能够提供是否支持短数据格式的信息,供 MAC 做出决策;(2)物理层能够根据 MAC 的信息选择长或短数据格式进行传输;(3)物理层能够识别长或短数据格式,但是可能不支持短数据格式的解码。

#### 3.1 新 MAC 协议的基本思想

根据对 802.11b 的容量分析,本文认为在传输单播包时尽量采用短数据格式,来减少信道占用时间,从而提高网络的性能,如时延、传包率和吞吐量等。由于发送节点和接收节点不知道邻居节点是否支持短数据格式,因此,本文采用长数据格式来发送用来预留信道的控制帧(如 RTS/CTS),而对于 DATA 帧和 ACK 帧,则根据发送节点和接收节点是否支持短数据的实际情况来确定使用长数据格式还是短数据格式。由于只有发送节点和接收节点同时支持短数据格式时才能使用短数据格式发送 DATA 帧和 ACK 帧,因此新 MAC 协议的基本思想是如果需要通信的两个节点都支持短数据格式,则使用 2 长 2 短方式传输,否则采用长导频方式传输。

#### 3.2 802.11b MAC 协议和新的 MAC 协议的 NAV 计算方法

3.2.1 802.11b MAC 协议的 NAV 计算方法  $DT_{RTS} = T_{SIFS} + T_{CTS} + T_{SIFS} + T_{DATA} + T_{SIFS} + T_{ACK}$ ;  $DT_{CTS} = DT_{RTS} - T_{CTS} - T_{SIFS}$ ;  $DT_{DATA} = T_{ACK} + T_{SIFS}$ ;  $DT_{ACK} = 0$ 。其中  $DT_{RTS}$ 、 $DT_{CTS}$ 、 $DT_{DATA}$  和  $DT_{ACK}$  分别表示 RTS, CTS, DATA 和 ACK 帧的 MAC 层头部中持续时间域(duration)的值。

3.2.2 新的 MAC 协议中 NAV 的计算方法 为了传递节点是否支持短数据格式的信息,本文对 802.11b 做以下修改:在帧控制域(frame control field)的类型(type)和子类型(subtype)字段增加两个类型 RTS-S 和 CTS-S,分别表示发送 RTS 的节点支持短数据格式和发送 CTS 的节点支持短数据格式。RTS-S 和 CTS-S 分别用 010001 和 010010 表示,是控制帧,它们与 RTS 和 CTS 的帧格式、大小一样,没有增加额外开销。发送节点以长数据格式发送 RTS 或 RTS-S 帧,接收节点根据发送节点和自己是否支持短数据格式,选择不同的方式计算网络分配向量(NAV),然后以长数据格式发送 CTS 或 CTS-S 帧,如果发送节点和接收节点都支持短

数据格式, DATA 和 ACK 帧用短数据格式发送。

(1)在发送节点,如果自己不支持短数据格式,则  $DT_{RTS} = T_{SIFS} + T_{CTS} + T_{SIFS} + T_{DATA} + T_{SIFS} + T_{ACK}$ ,用长数据格式发送 RTS 帧;否则  $DT_{RTS} = T_{SIFS} + T_{CTS} + T_{SIFS} + T_{DATA} + T_{SIFS} + T_{ACK} - 2 \times 96$ ,用长数据格式发送 RTS-S 帧。

由于短数据格式的一个物理层帧占用信道时间比长数据格式少  $96\mu\text{s}$ ,而 DATA 和 ACK 帧可能采用短数据格式传输,所以当发送节点支持短数据格式时,MAC 头部的持续时间域比长数据格式时少  $192\mu\text{s}$ 。

(2)接收节点如果收到 RTS-S 帧,则表示发送节点支持短数据格式;如果收到 RTS 帧,则表示发送节点不支持短数据格式。如果发送节点不支持短数据格式,则  $DT_{CTS} = DT_{RTS} - T_{CTS} - T_{SIFS}$ ,发送 CTS 帧;如果发送节点支持短数据格式,但接收节点自己不支持短数据格式,  $DT_{CTS} = DT_{RTS} - T_{CTS} - T_{SIFS} + 2 \times 96$ ,发送 CTS 帧;如果发送节点和接收节点都支持短数据格式  $DT_{CTS} = DT_{RTS} - T_{CTS} - T_{SIFS}$ ,发送 CTS-S 帧,并记录发送节点是否支持短数据格式的信息,以用来在发送 ACK 帧时做出正确的决定。当发送节点支持短数据格式但接收节点不支持短数据格式时,由于 RTS-S 帧中少计算了持续时间,因此在 CTS 帧中增加  $192\mu\text{s}$ 。

(3)发送节点如果收到 CTS 帧,则表示接收节点不支持短数据格式;如果收到 CTS-S 帧,则表示接收节点支持短数据格式。如果发送节点和接收节点都支持短数据格式,  $DT_{DATA} = T_{ACK} + T_{SIFS} - 96$ ,以短数据格式发送 DATA 帧,否则  $DT_{DATA} = T_{ACK} + T_{SIFS}$ ,以长数据格式发送 DATA 帧。

(4)接收节点收到 DATA 帧后,如果发送节点和接收节点都支持短数据格式,则以短数据格式发送 ACK;否则以长数据格式发送 ACK。不管发送节点和接收节点是否支持短数据格式  $DT_{ACK} = 0$ 。

(5)对于收到 RTS-S 的发送节点的邻居节点和收到 CTS-S 的接收节点的邻居节点,当收到一个由于短数据格式而本身不支持短数据格式产生的错误包时,MAC 的 NAV 不再延迟 EIFS 间隔。这样避免因发送短数据格式的 DATA 和 ACK 帧,对不支持短数据格式的邻居节点造成错误的 NAV 计算。

在步骤(1)中,假设如果发送节点支持短数据格式,则按接收节点也支持短数据格式计算 NAV,这样在接收节点不支持短数据格式的情况下会少预留信道时间,特别是对发送节点附近的邻居节点。但是这个情况会在 DATA 帧中得到修

正,因为 DATA 帧中存在正确的信道预留信息,并且 DATA 帧以长数据格式发送,故发送节点的邻居节点能够从 DATA 帧中正确预留信道。由于控制帧携带了节点是否支持短数据格式的信息,节点能够根据这些信息确定使用哪种物理层数据单元格式,因此,本文提出的 MAC 协议是一个自适应的 MAC 协议,它不需要知道邻居节点是否支持短数据格式。

### 4 实验仿真分析

为了验证本文提出的新的MAC协议的正确性和有效性,本文使用NS-2<sup>[15]</sup>进行了仿真分析和比较。仿真基本参数见表4。路由协议采用AODV<sup>[16]</sup>,MAC协议分别是802.11b MAC协议和新的MAC协议。

本文对单跳模式进行仿真,即任何两个节点都是经过一跳可达。为了研究不同负载和竞争节点数目对网络性能的影响,本文选择不同的节点总数和不同的数据达到率进行仿真。仿真中场景文件固定,对同一个场景文件生成20个不同的流量文件,然后对实验结果求平均。用户数据包大小分别为64和512Byte。

表4 仿真基本参数设置

节点数(n)	2,4,10,20	流量对数	1,2,5,10	缓存(包数)	50
传输范围	250m	路由协议	AODV	基本速率	2Mbps
流量类型	CBR	场景大小	150×150m	数据速率	11Mbps
仿真时间(s)	50,80,100				

对于仿真时间,由于NS有最大发包的限制,在高速发包情况下,很短的时间就能达到最大发包数,因此当每个流的发包速率高时选择小的仿真时间;在流的发包速率小的情况下选择长的仿真时间。

表5是802.11b在用户数据速率11Mbps和基本速率为2Mbps下,在链路没有干扰情况下,单个链路在单位时间内能传送的用户数据的平均包数。由于所有节点共享同一条无线链路,表5表示所有源节点产生包的数目之和的平均值。为了获得不同负载下的性能,本文选择网络中所有发送节点的总的包到达率为40,400,800和1000 packet/s。

表5 单位时间内802.11b在11/2 Mbps速率下传送UDP类型的用户数据的平均包数

包大小(Byte)	64	256	512	1024
长导频	685	663	625	560
2长2短	788	760	710	627
短导频	929	891	822	713

图1(a)到图3(d)分别是节点数目为2,4,10和20时的平均传递率、有效吞吐量和平均时延迟的对比。

通过图1到图3,可以看出,本文提出的MAC协议在轻负载下,性能提高较小,在中高负载下性能有较明显提高。对于传递率,本文提出的MAC能够平均提高5%到10%左右,甚至高达20%左右;在吞吐量方面,随着竞争节点数目

的增加,影响不大,但在中高负载下,本文提出的MAC还是比802.11b有所提高,且随着用户数据包的大小增加,吞吐量增加也更明显;在平均时延上,则有明显提高,它不仅在于减少了传输时延,而且减少了包的排队时延。在轻负载下,它主要是减少传输时延,在高负载下,则对排队时延影响更大。随着节点数目的增加,进行竞争的节点也增加了,导致时延的增加,但是本文提出的方法仍能取得较好的性能。在平均到达包数为800 packet/s并且包大小为64Byte时,平均时延减少明显,本文提出的MAC的时延是802.11b的 $\frac{1}{7} \sim \frac{1}{20}$ ;在平均到达包数为800 packet/s并且包大小为512Byte时,时延能减少10ms到200ms不等;在平均到达包数为1000 packet/s,时延仍能节约10~180ms左右。综上所述,本文提出的MAC是有效的,具有优越性。

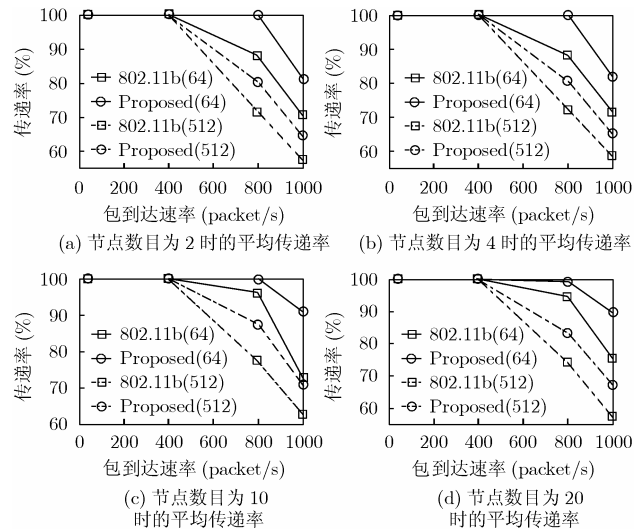


图1

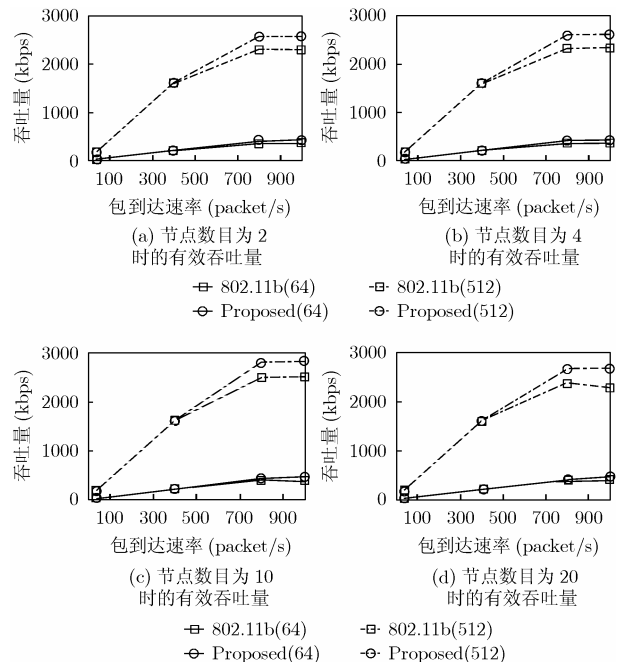


图2

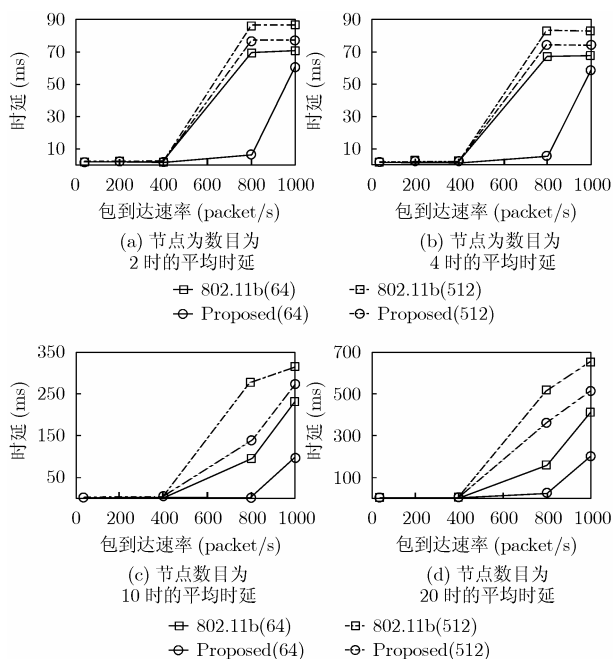


图 3

## 5 结束语

本文第一次提出通过物理层的短数据格式来提高系统性能的思想, 并提出了一个新的 MAC 协议, 它能自适应地选择不同的物理层数据格式进行传输。通过仿真证明该协议是有效的, 它能在端到端时延、传递率和有效吞吐量方面优于现有的 802.11b MAC 协议。本文还有些问题需要进一步研究, 例如如何使用短导频模式来增加网络容量、在多跳和移动环境下的性能等。

## 参考文献

- [1] 王竞, 李建东, 盛敏. Ad-Hoc 网络多址接入协议的研究与实现. 电子技术应用, 2005, (1): 40-42.
- [2] IEEE Standard 802.11. Wireless Lan Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specification. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-1999.pdf>, 2005-06.
- [3] Cali F, Conti M, and Gregori E. IEEE 802.11 protocol: design and performance evaluation of an adaptive back off mechanism. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(9):1774-1786.
- [4] Kim H and Hou J C. Improving protocol capacity with model-based frame scheduling in IEEE 802.11-operated WLANs. In Proc. of the 9<sup>th</sup> annual international conference on mobile computing and networking, San Diego CA, 2003:190-204.
- [5] Kwon Y, Fang Y, and Latchman H. A novel MAC protocol with fast collision resolution for wireless LANs. In Proc. of the twenty-second annual joint conference of the IEEE

computer and communications societies (INFOCOM 2003), San Francisco USA, 2003: 853-862.

- [6] Xiao Y. IEEE 802.11 performance enhancement via concatenation and piggyback mechanisms. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005, 4(5): 2182-2192.
- [7] Heuvel-Romaszko S V D and Blondia C. Enhancements of the IEEE 802.11: a MAC protocol for Ad hoc network with history of power adjustment. In Proc. of the International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, Hawaii USA, 2005, 1: 48-54.
- [8] So J and Vaidya N H. Multi-channel MAC for Ad hoc networks: handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver. In Proc. of the 5<sup>th</sup> ACM international symposium on mobile Ad hoc networking and computing, Tokyo Japan, 2004: 222-233.
- [9] Chang C Y, Sun H C, and Hsieh C C. MCDA: An efficient multi-channel MAC protocol for 802.11 wireless LAN with directional antenna. In Proc. of the 19<sup>th</sup> international conference on advanced information networking and applications(AINA'05), Taiwan, 2005: 64-67.
- [10] Nasipuri A and Mondhe J. Multi-channel MAC with dynamic channel selection for Ad hoc networks. <http://www.ece.uncc.edu/~anasipur/pubs/MC-04.pdf>, 2005-09.
- [11] Marsan M A and Neri F. A simulation study of delay in multichannel csma/cd protocols. *IEEE Trans. on Communications*, 1999, 39 (11):1590-1603.
- [12] Bahl P, Chandra R, and Dunagan J. Ssch: Slotted seeded channel hopping for capacity improvement in IEEE 802.11 Ad-Hoc wireless networks. In Proc. of the 5<sup>th</sup> ACM international symposium on mobile Ad hoc networking and computing, Tokyo Japan, 2004: 216-230.
- [13] Tsengt Y C, Wut S L, and Lint C Y. A multi-channel MAC protocol with power control for multi-hop mobile Ad hoc networks. *The Computer Journal*, 2002, 45(1):101-110.
- [14] Li Z, Das A, and Gupta A K, *et al.* Full auto rate MAC protocol for wireless Ad hoc networks. In Proc. of IEE on Communications, 2005, 152 (3): 311-319.
- [15] NS Simulator, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>, 2005-03.
- [16] Perkins C, Royer E B, Das S. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>, 2005-10.

彭玉旭: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为无线 Ad hoc 网络、移动 IP 和无线通信技术。

张力军: 男, 1942年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线数据、宽带无线 IP 接入技术与系统、移动无线网络、移动计算和移动多媒体信息网等。