

# 无线局域网物理层协议仿真建模

陈海明,舒炎泰,鲍彦如

(天津大学电子信息工程学院,天津 300072)

**摘要:**在仿真环境下评价和改进网络性能的主要工作是设计和实现网络协议的模型。由于现在的网络仿真器大都基于离散事件驱动模型和 TCP/IP 协议栈体系结构,所以物理层协议仿真模型的建立成为评价上层协议性能的前提。但是现有网络仿真器提供的物理层协议模型主要针对有线网络,所以没有考虑无线信道的特性。基于无线信号传播模型和有限状态自动机理论,提出了无线局域网物理层协议仿真模型的设计思路和在具体的网络仿真器中实现 IEEE 802.11b 协议的方法。建立的模型能够比较真实地模拟无线局域网物理层所具有的发送信号、接收信号和载波侦听的功能。

**关键词:**物理层;有限状态自动机;信号接收模型;位误码率

**中图分类号:**TP391.9 **文献标识码:**A

## Modeling of Physical Layer Protocol of WLAN for Simulation

CHEN Hai-ming, SHU Yan-tai, BAO Yan-ru

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**ABSTRACT:** To estimate and improve the performance of networks in the simulation environments, the main task is designing and implementing the model of network protocols. Since most of current network simulators are based on discrete event driven model and are built on the architecture of TCP/IP protocol stacks, design and implementation of the simulation model of physical layer protocol are the prerequisites for estimating the performance of upper layer protocols. However, physical layer models in current simulators are specifically for wired networks and rarely take characteristics of wireless channel into consideration. Based on the Radio Propagation Model and Finite State Machine, this article proposes the route to establish the simulation model of physical layer protocol of WLAN, and the approach to implement the IEEE 802.11b protocol in a specific network simulator. The established model can vividly simulate the basic functions of physical layer of WLAN such as signal transmitting, signal receiving and carrier sensing.

**KEYWORDS:** Physical layer; Finite state machine; Signal reception model; Bit error rate

### 1 引言

目前,无线局域网尤其是无线自组网(Ad-hoc)已经成为研究的热点,但是要在理想环境下搭建一个较大规模的网络实验床存在一定的困难,所以越来越多的科研人员采用仿真实验来评价和分析网络各层协议的性能。进行网络仿真实验的首要前提就是获得一个性能可靠的仿真软件。目前普遍采用的网络仿真软件有 NS2, OPNET 和 Qualnet,它们都是基于离散事件驱动模型,并包含了网络各层协议的模型实现,如应用层的 CBR 和 FTP 协议,传输层的 TCP 和 UDP 协议,网络层的 AODV 和 DSR 协议,以及 MAC 层的 802.11 和 802.3 协议。由于以上各层协议都是建立在物理层之上,所以物理层协议仿真模型的真实性和可靠性将直接影响上层协议性能

评价结果的可信性。Mineo<sup>[1]</sup>等人对以上三种仿真软件中实现的物理层模型进行了比较,并分析了物理层模型中影响上层协议性能的几个重要参数,如信号的接收模式、路径衰减模式、噪声和干扰的计算方法,以及物理层协议数据单元(PPDU)头部字段的长度等。由于物理层是网络协议模型中的最底层,直接面向传输介质,所以在网络仿真器中建立一个比较真实的物理层协议模型具有一定的难度。本文将系统阐述无线局域网物理层仿真模型的设计思路,并分析在 Qualnet 中实现 IEEE 802.11b 协议仿真模型的方法。

### 2 无线局域网物理层原理与协议

#### 2.1 功能和结构模型

在国际标准组织(ISO)制定的开放系统互联(OSI)模型中,物理层负责为二进制数据的传输建立可靠的物理链路。由于无线信道具有误码率高和传输容量受限等特性,所以要在无线节点之间建立可靠的物理链路,无线局域网的物理层

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60472048);Cisco 公司大学研究基金资助项目(20029303)

收稿日期:2006-02-19 修回日期:2006-03-02

不仅要提供调制解调等功能,还要通过扩频、编码等技术来提高无线信道的可靠性和传输容量。从功能结构来看,无线局域网的物理层可分为两个实体,如图 1 所示。

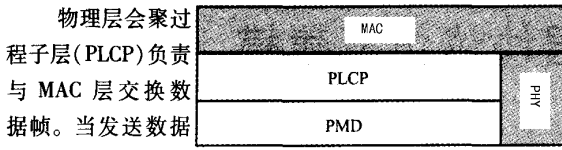


图 1 无线局域网物理层结构模型

物理层会聚过

程子层(PLCP)负责与 MAC 层交换数据帧。当发送数据时,PLCP 子层将 MAC 层协议数据单元(MPDU)封装成 PLCP 协议数据单元(PPDU),即在 MPDU 的头部附加上 PLCP 字段;当接受数据时,PLCP 子层完成差错校验后把 PPDU 头部的 PLCP 字段卸载,将 PPDU 还原为 MPDU。PLCP 字段由 PLCP 前导码(Preamble)和 PLCP 头(Header)组成。PLCP 前导码包含帧同步字段和帧起始定界符。PLCP 头包含指示数据传输速率和帧长度的字段,以及 CRC 校验码。PLCP 前导码和头部各字段的长度与含义因 PMD 子层的不同而不同。

物理介质依赖子层(PMD)负责通过无线信道收发数据帧。PMD 将 PPDU 进行扩频处理和调制后发送到无线信道,同时 PMD 检测无线信道上的信号,并将检测到的信号进行解扩处理和解调后传递给 PLCP 子层。PMD 直接面向的物理信道可以为 2.4 GHz ISM 频段的射频(RF)或红外线(IR)。在基于射频信道的无线局域网中,PDM 可以采用直接序列扩频(DSSS)方式或跳频扩频(HFSS)方式来提高通信的抗干扰能力,并通过二进制差分移相键控(DBPSK)或四相相对键控(DQPSK)等调制技术来提供一定的信道速率。根据所采用的不同物理信道,IEEE 802.11[2]定义了三种类型的 PMD:DSSS PMD、HFSS PMD 和 IR PMD。

由于无线局域网中的节点一般采用随机接入的方式共享无线信道,所以物理层除了提供基本的收发功能外,还需提供侦听无线信道的功能,即 PLCP 基于 PMD 检测到的信号强度估计当前信道的忙闲状态。因此,无线局域网物理层要实现三种操作:发送、接收和侦听。

## 2.2 IEEE 802.11 b 物理层分析

IEEE802.11b 是对 IEEE 802.11 DSSS 系统在 2.4 GHz 频段上的高速扩展(HR/DSSS),不仅可以提供 802.11 协议中规定的 1Mbps 和 2Mbps 这两种传输速率,还通过补码键控(CCK)或分组二进制卷积编码(PBCC)调制方式,使传输速率达到 5.5Mbps 和 11Mbps。下面将根据上文介绍的无线局域网物理层结构模型,对 802.11b 协议进行分析。

### 2.2.1 802.11b PLCP 子层

802.11b PPDU 的格式如图 2 所示。

PLCP 前导码由同步字段(SYNC)和帧起始定界符(SFD)组成,PLCP 头包括信号(SIGNAL)、服务(SERVICE)、长度(LENGTH)和 CRC 校验码(CRC)四个字段。信号字段指示用于发送或接收 MPDU 的调制方式,数据速率等于该字

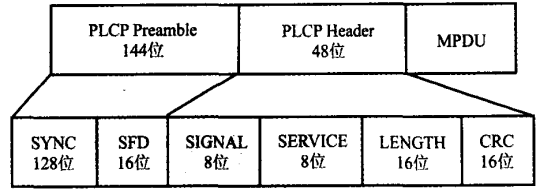


图 2 IEEE 802.11b PPDU 格式

段的值乘以 100(Kbps)。服务字段中的一个比特指示高速扩展(5.5Mbps 或 11Mbps)采用的调制方式是 CCK 还是 PBCC。表 1 给出了以 CCK 为高速扩展调制方式的情况下,SIGNAL 字段指示的不同传输速率所对应的调制方式。长度字段指示发送 MPDU 所需的微秒数。CRC 字段是对 PLCP 头前三个字段的循环冗余校验码,采用的生成多项式是  $G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ 。

表 1 SIGNAL 字段描述

SIGNAL 值	数据速率	调制方式
0AH	1 Mbps	DBPSK
14H	2 Mbps	DQPSK
37H	5.5 Mbps	CCK - 5.5
6EH	11 Mbps	CCK - 11

### 2.2.2 802.11b PMD 子层

802.11b PMD 以 2.4 ~ 2.483GHz(ISM) 频段上的射频作为无线传输介质,采用 DSSS 扩频技术,通过 DBPSK、DQPSK、CCK - 5.5 和 CCK - 11 调制方法提供 1Mbps、2Mbps、5.5Mbps 和 11Mbps 四种传输速率。802.11b PMD 的收发模块的构成如图 3 所示。

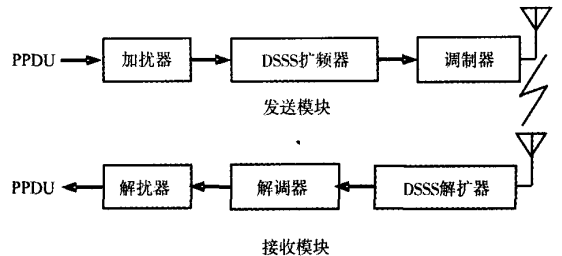


图 3 IEEE 802.11b PMD 模块

发送端首先对 PPDU 进行加扰,使二进制数据帧不具有连续的 1 或 0 序列,采用的加扰多项式为  $G(z) = z^{-7} + z^{-4} + 1$ ;接着采用 DSSS 对数据帧进行扩频处理,即用伪随机序列码(PN 码)与二进制数据帧中的每一位进行异或运算,采用的 PN 码为 11 位巴克码(+1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1);然后根据 SIGNAL 字段中的值选择相应的调制器将二进制数据调制成可以在 ISM 信道上传送的载波信号。

接收端检测到空中接口的信号,并采用与发送端相同的 PN 码对信号进行解扩处理后,根据 SIGNAL 字段中的值选择相应的解调器将信号解调成二进制数据,最后经解扰后就可以得到源端发送的二进制序列了。由于无线信号在传播过程中会受到衰减、噪声和干扰等影响,调制出来的二进制数据有可能存在差错,所以在将 PPDU 传递到 MAC 层之前,PLCP 子层会对 PPDU 的头部进行 CRC 校验。

### 3 无线局域网物理层协议的仿真模型

在基于离散事件驱动的网络仿真器中,协议模型实质上是一个有限状态自动机  $FSM = (Q, \sum, \delta, q_0, F)$ , 其中:

$Q$  为协议模型包含的状态集合;

$\sum$  为离散事件集合;

$\delta$  为  $Q \times \sum$  映射到  $Q$  的转移函数;

$q_0 \in Q$  为初始状态;

$F \subseteq Q$  为终止状态集。

虽然物理层是网络模型中直接面向物理介质的一个模块,但物理层仿真模型可以不考虑 PPDU 在物理信道中的传输形式,只要实现一个基于事件驱动的有限状态自动机就可以真实模拟物理层协议的功能。所以,设计物理层仿真模型时并不需要考虑 PMD 子层的功能,即在网络仿真器的物理层模型中不需包含加(解)扰模块、扩频(解扩)模块和调制(解调)模块,而采用射频传播(Radio Propagation)模块模拟信号在无线信道中的传播过程。图 4 给出了网络仿真器的底层协议之间的关系模型。

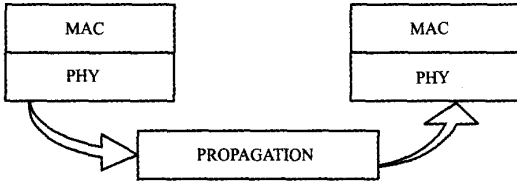


图 4 网络仿真器底层协议关系模型

#### 3.1 射频传播仿真模型

无线信号在传播过程中遭受的损害主要是路径损耗(Path Loss)和噪音(Noise)<sup>[3]</sup>,前者会造成信号的减性失真,而后者会造成加性失真。射频传播模型的主要功能就是计算信号受路径损耗影响而衰减的程度,以及信号叠加的噪声大小,并依据节点能够监测到的最小信号功率( $P_{lim}$ ),确定信号的传播范围。传播范围内的各节点监测到的无线信号功率大小可采用式(1)计算得到。

$$P_r = P_t + G_t - L_p + G_r \quad (1)$$

公式中的物理量都以 dBm 为单位。 $P_t$  和  $P_r$  分别为信号的发射功率和接收功率; $G_t$  和  $G_r$  分别表示发送天线和接收天线的增益(Gain); $L_p$  表示路径损耗。路径损耗的计算基于以下两种模型:自由空间(Free Space)模型和双线(Two Ray)模型。在自由空间模型下,路径损耗的大小与距离的平方成

正比,即路径损耗指数为 2,式(2)给出了其具体计算方法。

$$L_p = 10 \times \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2)$$

$d$  为发射天线和接收天线之间的距离; $\lambda$  为载波波长。

双线模型下,路径损耗指数为 4,即

$$L_p = 10 \times \log_{10} \left( \frac{d^2}{h_t h_r} \right)^2 \quad (3)$$

$h_t$  和  $h_r$  分别为发射天线和接收天线的高度。

噪声的计算基于加性高斯白噪声(AWGN)无线信道模型,即

$$N = k \cdot c \cdot T \cdot b \quad (4)$$

$k$  为 Boltzmann 常数( $1.379 \times 10^{-23}$ ); $c$  为噪声系数; $T$  为系统噪声温度(以 K 为单位); $b$  为瞬时带宽(以 Hz 为单位)。

#### 3.2 物理层协议仿真模型

从状态转化的角度来看,物理层包含三个状态:发送(T)、接收(R)和侦听(S),分别表示物理层进行发送、接收和侦听操作时的状态。其状态转化过程如图 5 所示。

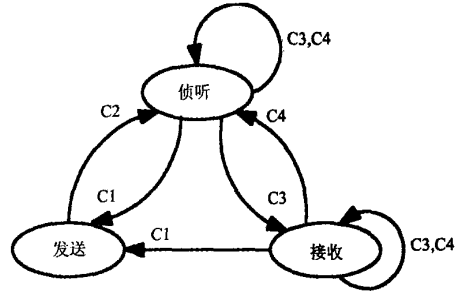


图 5 物理层协议仿真模型的状态转化图

其中: $C1 \sim C4$  为状态转化条件。所以基于 FSM 建立的物理层协议仿真模型可表示为  $M = \{ \{ T, R, S \}, \{ C1, C2, C3, C4 \}, \delta, T, \{ T, R, S \} \}$ 。图 5 即为转移函数  $\delta$  的图形表示。下面是对模型中的四个离散事件和状态转化过程的详细论述。

$C1$ :开始发送信号。当 MAC 层通过 PHY 层提供的接口将 MPDU 向下传递给物理层时,物理层将其封装成 PLDU 后通过射频传播模块开始发送到其它节点。此时,不管处于接收状态还是侦听状态,物理层都将在  $C1$  的驱动下转化为发送状态。若当前处于接收状态,则将正在接收的信号作为干扰信号。

$C2$ :信号发送完毕。由  $C1$  驱动物理层转入发送状态后,仿真模型根据数据帧的长度和发送速率计算出物理层发送信号所需的时间,即物理层处于发送状态的持续时间长度(duration),并由此决定信号发送完毕的仿真时间。在该仿真时间点,通过触发  $C2$  事件驱动物理层转入侦听状态。物理层处于发送状态的持续时间长度( $\mu s$ )为:

$$duration = \frac{1}{r_h} + \frac{L}{r_d} \quad (5)$$

式中: $l$  为 PPDU 头部(包括 PLCP 前导码和头部)的长度(bits); $L$  为 PPDU 包含的数据帧(MPDU)的长度(bits); $r_h$  为

发送 PPDU 头部的速率;  $r_d$  为发送 MPDU 的速率。由于 PPDU 头部包含同步等控制数据传输的字段, 所以采用协议约定的调制方式和速率来发送 PPDU 头部, 如 IEEE 802.11b 使用 DBPSK (1Mbps) 作为发送和接收 PPDU 前导码和头部各字段的约定调制方式, 后继的 MPDU 则用头部 SIGNAL 字段指定的调制方式来进行传输 (1Mbps、2Mbps、5.5Mbps 或 11Mbps)。

C3: 信号开始到达。当物理层处于侦听状态或是接收状态时, 具有监测到达空中接口的信号的功能。

如果物理层处于侦听状态并且监测到的信号功率 ( $rxPower$ ) 低于接收阈值 ( $rxPower_{threshold}$ ), 则将到达的信号作为干扰信号。干扰信号的到达不会引起物理层状态的转换, 但会改变物理层对当前信道是否空闲的估计结果。物理层通过  $\Sigma Interference$  记录节点当前遭受的干扰程度。当监测到干扰信号开始到达时, 物理层对  $\Sigma Interference$  进行一次累加操作, 即  $Interference + = rxPower$ 。根据该累加器中的值, 物理层估计当前信道是否空闲。如果  $\Sigma Interference + Noise \geq CS_{threshold}$ , 物理层就认为当前信道被其它节点占用; 否则认为信道处于空闲状态。

如果监测到的信号功率达到接收阈值, 即满足条件  $rxPower \geq rxPower_{threshold}$ , 则 C3 可驱动物理层转入接收状态。当物理层处于接收状态时, 到达接口的任何信号都将作为干扰信号, 即物理层只是对  $\Sigma Interference$  进行一次累加操作, 但不转化当前状态。

C4: 信号结束到达。

如果物理层处于侦听状态, 则此时应消除该信号对节点的干扰, 但不转化当前物理层所处状态, 即只将该信号的功率大小从  $\Sigma Interference$  中减去 ( $Interference - = rxPower$ ), 并根据更新以后的  $\Sigma Interference$  重新估计当前信道是否空闲。

如果物理层处于接收状态并且在信号到达时将该信号作为干扰信号, 此时应将该信号的功率从  $\Sigma Interference$  中减去, 但物理层还是保持接收状态。如果结束到达的信号为物理层正在接收的信号, 则此时结束接收操作, 转入侦听状态。考虑到接收的信号可能存在差错, 实际的物理层协议在将数据帧传递给 MAC 层之前会进行检验。由于信号的误码率与信噪比 (SNR) 有直接关系, 所以简单的物理层仿真模型可以通过判断接收信号的 SNR 是否达到阈值 ( $SNR_{threshold}$ ) 来决定是否将数据帧传递给 MAC 层。

### 3.3 射频传播模型和物理层协议模型之间的接口

物理层接收来自 MAC 层的数据帧, 并将其封装成 PPDU 后, 需要调用射频传播模块提供的接口来模拟信号经无线信道传输到其它节点的过程。该传输过程其实就是射频传播模块通过公式(1)(2)(3)(4)计算信号到达各节点的功率大小, 并确定能够监测到该信号的节点集  $S, S = \{N_i | rxPower_{N_i} \geq P_{lim}\}$ 。通过调用物理层模型提供的接口, 射频传播模型驱动 S 中每个节点的物理层状态的转化。

从图 4 也可以看出, 射频传播模块应向物理层模块提供一个接口, 用于将数据帧从物理层发射到无线信道, 同样物理层模块也应向射频传播模块提供一个接口, 使物理层从无线信道接收到达的信号。

## 4 802.11b 物理层协议在 Qualnet 中的实现

Qualnet 是一个基于 Parsec<sup>[4]</sup> (Parallel Simulation Environment for Complex System) 语言的并行可扩展离散事件仿真工具, 它的早期版本是由美国加州大学洛杉矶分校 (UCLA) 开发的网络仿真器 GloMoSim<sup>[5]</sup>。Qualnet 不但继承了 GloMoSim 在运行效率和扩展性等方面的良好特性, 还增加了许多协议模型, 尤其是针对无线网络进行了比较全面的扩展。如在 Qualnet 中实现了 IEEE802.11b 物理层和 MAC 层协议模型, 并在此基础上建立了 AODV、DSR 等无线自组网路由协议模型。

Qualnet 实现的 IEEE 802.11b 协议就是基于上文提出的物理层协议仿真建模思想, 但模型中包含四个状态, 分别为发送状态 (PHY\_TRANSMITTING)、接收状态 (PHY\_RECEIVING)、侦听状态 (PHY\_SENSING) 和空闲状态 (PHY\_IDLE)。其中后两个状态是对图 5 中的侦听状态的细化, 即将侦听的结果作为两个独立的状态, 以分别表示物理层对信道空闲估计的结果。当  $\Sigma Interference + Noise \geq CS_{threshold}$  时, 物理层处于侦听状态, 否则转入空闲状态。四个状态之间的转化过程与图 5 所示基本类似, 也是由四个离散事件 (C1、C2、C3、C4) 驱动物理层完成状态的转化。转化状态的操作是在与离散事件对应的四个处理函数中完成的, 分别为:

- 1) Phy802.11\_StartTransmittigSignal;
- 2) Phy802.11\_TransmissionEnd;
- 3) Phy802.11\_SignalArrivalFromChannel;
- 4) Phy802.11\_SignalEndFromChannel.

在函数(1)中调用射频传播模块提供的接口 (PROP\_ReleaseSignal), 函数 3) 就是物理层模块向射频传播提供的接口。在函数 4) 中将正确接收的数据帧传递给 MAC 层, 但不是通过判断接收信号的 SNR 是否超过  $SNR_{threshold}$  的方法实现对数据帧的差错检验。Qualnet 实现了一种基于信道误码率的数据帧接收模型。信道的误码特性是由物理层采用的信号调制方式决定的。图 6 显示了当物理层采用 DBPSK 调制方式 (即 IEEE 802.11b 物理层速率为 1Mbps) 时 BER (位误码率) 和 SINR 之间的关系。

图中, SINR 为接收信号的功率与物理层检测到干扰信号和噪声大小的比值, 即:

$$SINR = \frac{rxPower}{\sum Interference + Noise}$$

Qualnet 为 IEEE 802.11b 采用的四种调制方式分别建立了对应的 SINR—BER 关系表。当物理层收到来自射频传播模块的数据帧后, 根据头部的速率信息查询对应的 SINR—BER 表, 就可以得到该数据帧的位误码率, (下转第 159 页)

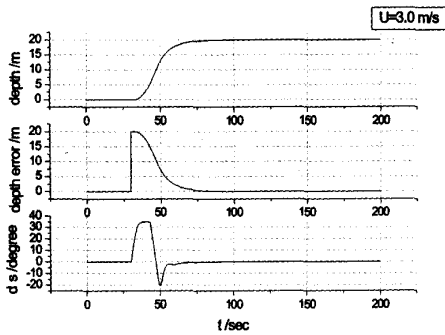


图3  $u = 3.0 \text{ m/s}$  时 AUV 深度控制的仿真结果

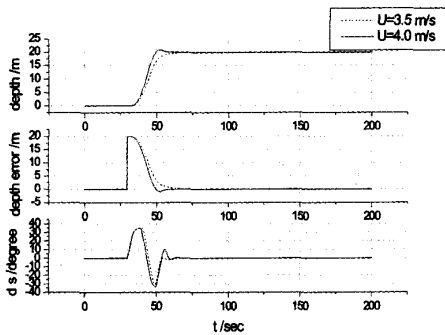


图4  $u = 3.5, 4 \text{ m/s}$  时 AUV 深度控制的仿真结果

看,所设计的控制器在区间范围均有良好的鲁棒性能,这说明鲁棒  $H_\infty$  设计方法是实用和有效的。

参考文献:

[1] 李殿璞. 船舶运动与建模[M]. 哈尔滨工程大学出版社,1999.  
 [2] 赵国良,季鲁慧,丛望. 潜艇空间运动的滑模控制[J]. 控制理论与应用,1994,(3):350-355.  
 [3] 褚健,俞立,苏宏业. 鲁棒控制理论及应用[M]. 杭州:浙江大学出版社,2000-4.  
 [4] J Guo, F C Chiu, C C Huang. Design of a sliding mode fuzzy controller for the guidance and control of an autonomous underwater vehicle[J]. Ocean Engineering,2003,30:2137-2155.  
 [5] Giuseppe Conte, Andrea Serrani. Robust Control of a Remotely Operated Underwater Vehicle[J]. Automatica,1998,34(2):193-198.

[作者简介]



熊华胜(1978.10-)男(汉族),江西丰城人,博士研究生,主要研究方向为潜器与水下机器人鲁棒控制技术;

边信黔(1941.10-)男(汉族),北京人,教授,博士生导师,研究方向为潜器与水下机器人控制技术;

施小成(1957-)男(汉族),黑龙江哈尔滨人,博士,博士生导师,教授,主要研究方向为船舶运动综合控制、水下机器人。

参考文献:

[1] Mineo Takai, Jay Martin and Rajive Bagrodia. Effects of wireless physical layer modeling in mobile ad hoc networks[C]. Proceedings of the 2001 ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, October 2001. 87-94.  
 [2] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee [S]. IEEE Standard 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 1999.  
 [3] 刘乃安,等. 无线局域网(WLAN)——原理、技术与应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2004.  
 [4] R Bagrodia, etc. PARSEC: A Parallel Simulation Environment for Complex Systems [J]. Computer, 1998, 31(10):77-85.  
 [5] X Zeng, R Bagrodia, M Gerla. GloMoSim: a Library for Parallel Simulation of Large-scale Wireless Networks [C]. Proceedings of the 12th Workshop on Parallel and Distributed Simulations, May 1998, 154-162.

[作者简介]



陈海明(1981-)男(汉族),浙江宁波人,硕士研究生,主要研究方向:无线网络协议设计与性能评价;

舒炎泰(1942-)男(汉族),江西于江人,教授,博士生导师,主要研究方向:计算机网络性能评价, CIMS,计算机实时控制;

鲍彦如(1976-)女(汉族),河北石家庄人,讲师,在职博士生,主要研究方向:无线网络性能评价。

(上接第126页)

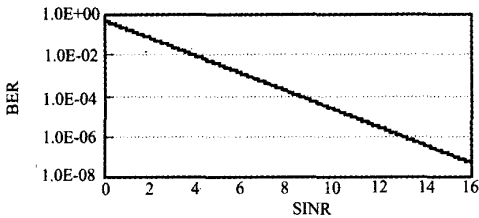


图6 DBPSK 的误码特性

并由此可决定帧误码率(FER),即:  $FER = 1 - (1 - BER)^{length}$ ,从而使物理层按 FER 决定的概率  $(1 - FER)$  向 MAC 层传递收到的数据帧。这种基于信道误码率的数据帧接收模型能够比较真实的模拟物理层对数据帧进行差错校验和丢弃错误数据帧的操作。

5 结语

一个比较真实的物理层仿真模型的建立将为在仿真环境下评价和研究无线局域网的性能打下可靠的基础。由于在离散事件驱动的网络仿真器中任何协议模型的建立都是基于有限状态自动机理论,所以本文提出的无线局域网物理层协议仿真建模方法也适用于设计和实现其它各层协议的仿真模型。