

# 以太网协议数据封装动态仿真的设计与实现

王建军, 李勇帆, 肖杰, 郑桥富

(湖南第一师范学院 信息科学与工程系, 湖南 长沙 410205)

**摘要:**传统的协议仿真实验系统都是离散的、静态的,即单独模拟一个协议,且协议中的数据表示是静态的,不能随着输入数据的变化而动态变化。文中描述的以太网动态仿真实验系统能够动态地反映以太网数据通信中各协议之间的相互协作过程,可以帮助学生更好地理解以太网中的数据通信过程。数据封装是协议工作的重要阶段,在实验系统中动态、真实再现数据的封装过程,克服了已有协议仿真系统的不足,可以满足场景化实验教学的需要。

**关键词:**以太网;协议;动态;交互;仿真系统;数据封装

**中图分类号:** TP311

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2010)06-0133-04

## Design and Implementation for Dynamic Simulation Data Encapsulation of Ethernet Protocol

WANG Jian-jun, LI Yong-fan, XIAO Jie, ZHENG Qiao-fu

(Information Science and Technology Department, Hunan First Normal University, Changsha 410205, China)

**Abstract:** Traditional network protocol simulation system is discrete and static now, only one protocol is simulated singleness. The data can't be dynamic variety with input data because the data is static in the protocol. The Ethernet dynamic simulation experiment system can image collaboration between protocols at data traffic, and help student to understand data traffic in Ethernet. Data encapsulation is an important phase of protocol, the shortage of the protocol simulation system is overcome by dynamic, real presenting the encapsulation process. It can meet the needs of scene experiment teaching.

**Key words:** Ethernet; protocol; dynamic; mutual; simulation system; data encapsulation

## 0 引言

TCP/IP 协议簇是计算机网络课程的主要教学内容,也是互连网络数据通信中使用的主要协议。以太网是目前主流的网络类型,不同的以太网通过 TCP/IP 技术互相连接起来进行数据通信,是技术的发展趋势。协议仿真实验教学是帮助学生理解网络协议的重要手段。

目前的协议仿真实验是离散的、静态的,即单独模拟某个协议,不能与其它协议合作,且协议中的数据表示是静态的,不能随着输入的数据的变化而动态变化,

实验效果单调、生硬。具有代表性的网络仿真软件有:国外的 NS2<sup>[1]</sup>, Boson Netsim<sup>[2]</sup>, 国内的吉林大学的“网络协议仿真教学系统”<sup>[3]</sup>, 解放军理工大学的“Psender”<sup>[4]</sup>系统等。NS2 能够演示协议的工作过程,但是,无数据内容的动态变化和协议之间的合作。Boson Netsim 主要用于仿真网络工程实验,帮助学生熟悉网络设备和协议的使用,不能演示协议的工作流程,以及协议之间的相互协作过程,其效果仅类似于一个实际的网络工程实验。“网络协议仿真教学系统”实现了跨机器之间通信,但是数据的传递全部由人工操作,实验环境复杂,为了更好地模拟协议,忽略了实验环境与实际应用场景的一致性。“Psender”系统借用了著作《计算机网络:自顶向下方法与 Internet 特色》作者提供的一些在线实验案例,实现了数据发送方和接收方之间的自动通信和速度匹配,但是,忽略了数据通信的中间过程,如,不能演示交换机的工作流程,也是离散的。因此,已有的仿真实验是离散的、静态的。而网络通信是一个连续的过程,需要协议之间相互协作,且数据也需要动态变化。

收稿日期:2009-10-22;修回日期:2010-01-25

**基金项目:**全国教育科学“十一五”规划 2009 重点课题(DCA090321);湖南省教育科学“十一五”规划重点课题(XJK08AXJ001);湖南省教育科学“十一五”规划青年专项(XJK08QXJ002);湖南省青年骨干教师培养基金(2009-43);湖南省大学生创新实验项目(2008-307)

**作者简介:**王建军(1969-),男,湖南衡阳人,博士,副教授,CCF 会员,研究方向为计算机网络通信;李勇帆,教授,研究方向为多媒体技术。

为了真实地模拟网络通信过程,很有必要开发一个系统,既能使协议之间相互协作,又能动态实现数据的变化,使系统能逼真展现出实际的网络通信的运行过程。

以太网动态仿真实验系统使用程序动态模拟以太网中的数据封装、发送、转发和接收过程,并且能够观察数据内容的变化,真实展现数据封装与解封装、ARP 表查询和 MAC 地址表查询的工作流程。

## 1 以太网动态仿真系统介绍

以太网动态仿真实验系统主要目标是设计并实现一个分布交互式系统,在一个局域网内(3 台 PC 组成),各个机器能相互通信,模拟局域网数据通信、封装与解封装等流程。整体系统体系结构采取基于管道-过滤器模型,各个结点使用层次模型和对象模型<sup>[5]</sup>。三种模型结合的方式,可以满足系统设计要求,使实现简单化<sup>[6]</sup>。具体设计方案如下:

在一个以太网的模拟工作环境中(具有发送主机、模拟交换机、接收主机),使用程序动态模拟以太网中的数据封装、发送、转发和接收过程,并且能够观察数据内容的变化,真实展现数据封装、ARP 表查询和 MAC 地址表查询的工作流程,使用程序模拟发送主机中数据封装时的数据填充,使用程序模拟发送主机中 ARP 表的查找和学习过程,使用程序模拟交换机中“MAC 地址表”查找和学习过程,帮助理解以太网数据通信各协议协调工作机制。

实验环境是使用三台 PC(B 机器带有双网卡)组建成整个仿真平台,其中 B 机器的两个网卡分别连接 A 机器和 C 机器。拓扑结构如图 1 所示。

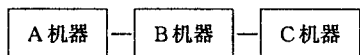


图 1 仿真平台拓扑结构

在 A 机器中,要求程序能动态实现对用户的数据依层次进行封装、ARP 表查询,负责把数据发送给 B 机器,并触发模拟以太网交换机(B 机器)中的仿真程序运行。

B 机器模拟以太网交换机,要求程序能够模拟以太网交换机的数据接收过程、MAC 地址映射和学习过程以及数据发送过程,并触发 C 机器中的仿真程序运行。

在 C 机器中,要求程序实现模拟数据的接收和解封装过程,并把数据还原交给用户。

通过这三个程序的协调演示,将以太网通信中数据的封装、传输等过程真实展现,加深学生对以太网数据通信过程中,主机和交换机的各层次工作协议作的

用以及协议之间相互协作的理解,主要包括应用层协议、传输层协议、网络层协议、数据链路层协议、ARP 表、MAC 地址表等。

## 2 数据封装

网络数据通信过程主要包括数据封装、数据传输和数据解封装过程。数据传输依赖通信机制,目前大多数网络系统使用 Socket 实现通信,此部分内容的仿真将另文描述。数据解封装是数据封装的逆过程。文中主要描述协议工作过程中数据的封装过程,读者可以据此理解数据的解封装过程。

数据封装是指将协议数据单元(PDU)封装在一组协议头和尾中的过程。在 TCP/IP 四层参考模型中,每层主要负责与其它机器上的对等层进行通信。该过程是在“协议数据单元”(PDU)中实现的,其中每层的 PDU 一般由本层的协议头、协议尾和数据构成。每层可以添加协议头和尾到其对应的 PDU 中。协议头包括层到层之间的通信相关信息。协议头、协议尾和数据是三个相对的概念,这主要取决于进行信息单元分析的各个层。

### 2.1 数据封装分析

TCP/IP 协议已是网络数据通信中使用的主要协议,TCP/IP 协议簇中包含了一个相当重要的协议,这就是 UDP 协议<sup>[4]</sup>。

UDP 协议,即用户数据报协议,主要用来支持那些需要在计算机之间传输数据的网络应用。包括网络视频会议系统在内的众多的客户/服务器模式的网络应用都需要使用 UDP 协议。UDP 协议的主要作用是将网络数据流量压缩成数据报的形式。一个典型的数据报就是一个二进制数据的传输单位。每一个数据报的前 8 个字节用来包含报头信息,剩余字节则用来包含具体的传输数据。

文中主要模拟动态仿真系统中 UDP 报文的数据传输过程。在 A 机器中,当用户在文本框中输入数据后,整个系统的数据封装过程就开始。传输层对 UDP 报文进行封装,网络层对 IP 报文进行封装,网络接口层对数据帧进行封装。至此,数据的封装过程就完成了。在仿真系统中根据 TCP/IP 层次结构并结合 UDP 报文的传输机制设计了如下几个数据封装模块:

- \* 传输层 UDP 报文的封装。
- \* 网络层 IP 报文的封装。
- \* 数据链路层数据帧的封装。

### 2.2 信息的输入

目前的许多仿真软件对数据的输入基本上采用某种颜色来取代。不能够动态展现出用户输入的信息,

也无判断用户输入的信息是否超过了以太网中的协议规定长度,缺乏与用户的交互行为,使用户不能直观理解数据切割、封包和传输过程。

在此仿真系统中,根据以太网的帧长度为1500字节和已知的IP报头20字节和UDP报头8字节,最后得出用户输入的信息不能超过1472字节。对于用户输入信息,定义了一个char MultiUser[1472]数组来保存<sup>[7]</sup>。当需要进行数据封装的时候,就可以访问MultiUser数组中的信息。

### 2.3 IP 和 MAC 地址的存取

现实生活中的邮件通信,必须明确地给出信息的发送方的地址和接收方的地址,同样在互联网上数据通信也如此,仿真系统中的数据通信必须明确给出通信双方的IP地址和MAC地址。由于系统中数据封装过程中的数据都是动态实现的,文中无法一一描述,仅描述IP地址和MAC地址的动态封装过程,展示实验仿真系统的动态、交互和协作特点。

对于IP地址和MAC地址的获取,采用Java Native Interface(JNI)技术实现本地IP和MAC的查询。JNI是Sun公司提出的Java使用本地方法的一个解决办法<sup>[8]</sup>。通过使用本地方法,使C程序与Java程序交互工作,可以通过WINDOWS的API访问核心态的IP地址和MAC地址。

WINDOWS系统目录System32下都带有iphlpapi.dll动态函数库文件<sup>[9]</sup>。IP Helper是iphlpapi.dll中一套用于管理本地网络设置的API(应用程序编程接口),功能十分强大。通过使用IP Helper,可以方便地改变计算机的网络设置或者提取有关的信息<sup>[10]</sup>。iphlpapi.dll动态函数库中包含GetAdaptersInfo(pinfo, &len)函数就是用于提取网卡信息<sup>[11]</sup>,如图2所示。

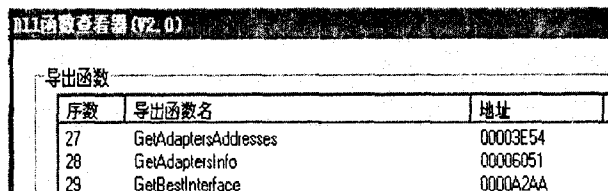


图2展示了DLL函数查看器(DLL Function Viewer)的界面，显示了iphlpapi.dll文件中的导出函数。表格列出了三个函数：GetAdaptersAddresses、GetAdaptersInfo和GetBestInterface，并给出了它们的地址。

序数	导出函数名	地址
27	GetAdaptersAddresses	00003E54
28	GetAdaptersInfo	00006051
29	GetBestInterface	0000A24A

图2 Iphlpapi.dll 文件中 GetAdaptersInfo 函数

WINDOWS定义了一个结构体 IP\_ADAPTER\_INFO{}，存放了本地机器的网络信息，配合IP Helper中相关函数操作网络信息。结构体类型如下：

```
typedef struct IP_ADAPTER_INFO
```

```
{
```

```
.....
```

```
    UINT AddressLength; //物理地址的长度
```

```
    BYTE Address[MAX_ADAPTER_ADDRESS_LENGTH];
```

```
    //物理地址
```

```
    DWORD Index; //网卡索引号
```

```
    UINT Type; //网卡类型
```

```
    PIP_ADDR_STRING CurrentIpAddress; //当前使用的IP地址
```

```
    IP_ADDR_STRING IpAddressList; //绑定到此网卡的IP地址链表
```

```
.....
```

```
} IP_ADAPTER_INFO, *PIP_ADAPTER_INFO;
```

为了仿真系统便于远程获取其它机器网络信息，将提取的信息存于A机器(服务器)的数据库netinfo中。服务器中数据的设置在Socket连接后完成。netinfo数据库中有netcardname, ip, mac, mname四个元素，分别对应网卡描述、IP地址、MAC地址、机器名。当系统启动时，一旦Socket套接字建立成功，便将连接的IP信息存入数据库，然后在A机器上运行ARP程序，在数据库保存该IP对应的MAC地址。

在服务器中，存(取)数据库的方式分为两种：一是服务器本身的网络信息，可以直接存取；二是局域网中其他活动主机的网络信息，需要先基于IP连接数据库之后，然后将信息存取。也就是说，如果是A机器存(取)网络信息，可以利用本地连接的方式对数据库进行操作。如果是B机器或者C机器存(取)网络信息，可以基于IP地址来实现对数据库的访问。具体的流程如图3所示。

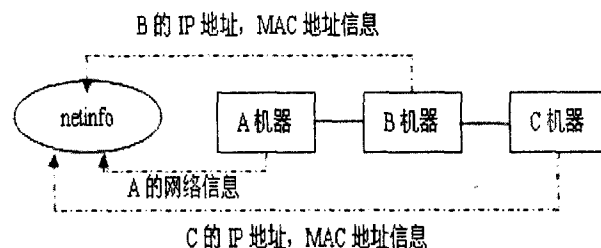


图3 访问数据库流程

由于TCP/IP协议簇非常复杂,文中后续部分,仅对数据内容、IP地址和MAC地址进行了动态实现,其余参数在程序中固定填充,既说明了问题,也使系统实现简单化。

### 3 UDP 报文封装模块

传输层是互联网上的计算机经过网络进行数据通信时,第一个端到端的层次,具有缓冲作用。当网络层服务质量不能满足要求时,它将服务加以提高,以满足高层的要求;当网络层服务质量较好时,它只用很少的工作。动态仿真系统中,传输层主要进行UDP报文封装。UDP报文封装模块工作流程如图4所示。

### 4 IP 报文封装模块

网络层是TCP/IP参考模型中的第二层。介于运

输层和网络接口层之间,这在数据链路层提供的两个相邻端点之间的数据帧的传送功能上,进一步管理网络中的数据通信,将数据设法从源端经过若干个中间节点传送到目的端,从而向运输层提供最基本的端到端的数据传送服务。动态仿真系统中,网络层主要演示 IP 报文封装。

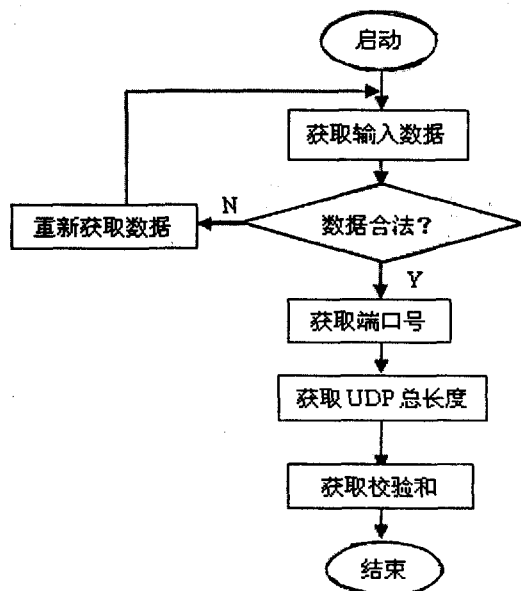


图 4 UDP 报文封装模块流程图

IP 报文封装模块具体流程图如图 5 所示。由三个线程并行运行填充 IP 包。

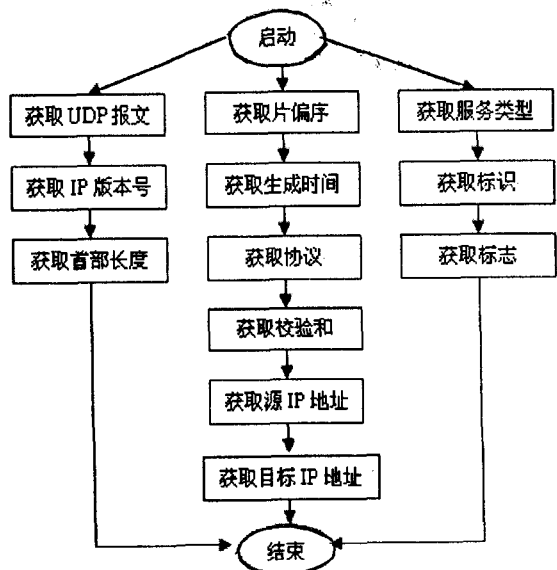


图 5 IP 报文封装模块流程图

## 5 数据帧封装模块

网络接口层是 TCP/IP 协议中的最底层,它负责通过网络发送和接收数据帧。对应于 OSI 参考模型中的数据链路层和物理层。数据链路层最基本的服务是

将源计算机网络层来的数据可靠地传输到相邻节点的目标计算机的网络层。其中,数据链路层中的一个功能是如何将数据组合成数据帧,即如何封装成数据帧。

在帧封装过程中,第一次封装时,系统需要调用 ARP 程序获取目的 MAC 地址。然而在系统第二次运行时,ARP 有缓存表,所以不要调用。因此,在此处需要定义一个标志来判断系统是否是第一次运行。为了简化系统的设计,暂时只考虑系统是第一次运行,即系统暂不存在 ARP 缓存表。对于帧尾 CRC,是用来校验数据在传输过程中是否出现错误,系统暂不考虑这点。

数据帧报文封装模块具体流程如图 6 所示。

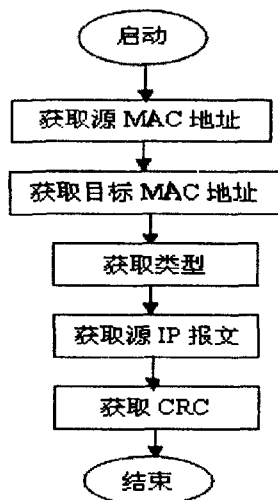


图 6 数据帧封装流程图

## 6 结束语

以太网与 TCP/IP 结合使用,是目前局域网的主要形式。文中描述的协议动态数据封装平台,真实再现了协议的工作流程,克服了以往协议仿真实验系统的不足,使实验过程更加逼近实际的应用。

### 参考文献:

- [1] The network simulator NS-2[EB/OL]. 2006-10. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- [2] 黄声烈,邢磊,曾庆敏.网络协议仿真教学系统平台的构建[J].实验技术与管理,2005,22(11):83-85.
- [3] 蒋一川.网络协议仿真教学系统的设计与实现[J].吉林大学学报,2007(9):85-94.
- [4] 谢慧,聂峰.基于 Boson Netsim 的计算机网络仿真实验教学研究[J].实验技术与管理,2007,24(5):89-91.
- [5] Kruchten P. The tao of the software architect[EB/OL]. 2005-04. <http://www-128.ibm.com/developerworks/rational/library/4032.html>.
- [6] 许宏图,赵政.基于 JBPM 的协调软件的研究[J].计算

(下转第 174 页)

种方式进行仿真,同时对其都引入 1% 的随机信道故障,和 0 到 20m/s 变化的节点移动速度,同时向前面一样引入两条 UDP 流来进行竞争以产生拥塞,并通过多次的模拟以消除随机拓扑结构的影响(见图 5)。

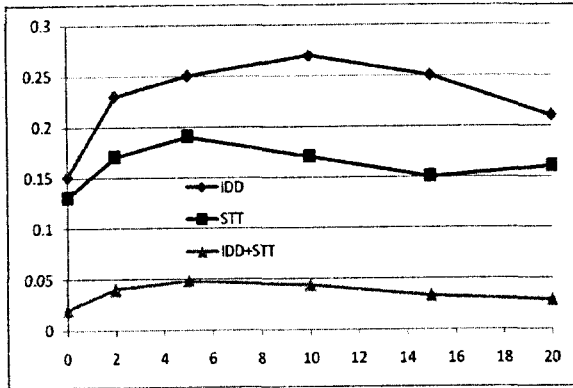


图 5 单一参数和多参数检测的精确度比较

图中横坐标是节点的移动速度,纵坐标是拥塞检测的不精确百分比。从图中可以看出,使用联合参数的方法能得到不低于 95% 的精确度,而使用单一参数只有 70% 到 80%,精确度的提高还是比较明显的。所以,用这种联合参数的方法来判断能更好地区分出网络中的拥塞情况,从而能采取相应的对策来解决。

### 3 结束语

展现了在 ad hoc 网络环境下用于 TFRC 协议的拥塞检测方法,这是一种使用联合参数的检测方法,并通过仿真实验证明这种方法比起单一参数的检测方式具有更好准确度,从而使 TFRC 协议能很好服务于实时多媒体业务。

现实中的 ad hoc 网络中存在着更多的不确定性,还可以设计其他更合理的参数以此来更好地区分出各种不同的网络情况,并通过仿真实验来证明参数选择的合理性和精确性,这些都将是今后的工作。

### 参考文献:

[1] Liu J, Suresh S. A TCP: TCP for mobile Ad Hoc networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19(7): 1300-1315.

[2] Rejaie R, Handley M, RAP E D. An End-to-End Rate-Based Congestion Control Mechanism for Real Time Streams in the Internet [C]//IEEE INFOCOM'99. New York: IEEE, 1999: 1337-1345.

[3] 张冰,李振,刘增基.基于接收端二项式算法的拥塞控制机制[J].西安电子科技大学学报:自然科学版,2003,30(7):47-52.

[4] Chen K, Nahrstedt K. Limitations of Equation-Based Congestion Control in Mobile Ad hoc Networks [C]//Proc IEEEICDCSW'04. River Side, USA: IEEE, 2004: 756-761.

[5] Wdmer J, Denda R, Mauvern. A Survey on TCP-Friendly Congestion Control[J]. IEEE Network, 2001, 15(3): 28-37.

[6] Handley M, Floyd S, Padhye J, et al. TCP Friendly Rate Control Protocol Specification[S]. RFC3448, 2003.

[7] Monks J, Sinha P, Bharghavan V. Limitations of TCP-ELFN for ad hoc networks[C]//MOMUC. [s.l.]: [s.n.], 2000: 650-670.

[8] 苏晓丽,郑明春,孟强. TCP友好多播拥塞控制算法研究[J].计算机工程与科学,2003,25(4):26-29.

[9] 方旭明.移动 ad hoc 网络研究及发展现状[J].数据通信,2003(4):15-23.

[10] 王珍,刘飒.无线 ad hoc 网络及其关键技术[J].电信科学,2003(4):10-13.

[11] 李云,陈前斌,隆克平,等.无线自组织网络中 TCP 稳定性的分析及改进[J].软件学报,2003,14(6):1178-1186.

[12] Floyd S, Handley M, Padhye J, et al. Equation-Based Congestion Control for Unicast Applications[C]//Proc. ACM SIGCOM. [s.l.]: [s.n.], 2000.

[13] Hassan S, Kara M. Simulation-based Performance Comparison of TCP-Friendly Congestion Control Protocols[C]//UKPEW2000. Durham: [s.n.], 2000.

[14] Anker T, Shnayderman I, Dolev D, et al. TCP-friendly many-to-many end-to-end congestion control[C]//IEEE, Reliable Distributed Systems, Proceedings 22nd International Symposium. [s.l.]: [s.n.], 2003: 209-218.

[15] Fu Z, Greenstein B, Meng X, et al. Design and Implementation of a TCP-Friendly Transport Protocol for Ad Hoc Wireless Networks[C]//In Proceedings of ICNP2002. Paris, France: [s.n.], 2002.

(上接第 136 页)

机技术与发展,2006,16(8):16-17.

[7] 柯尼汉,里奇. C 程序设计语言[M]. 徐宝文,等译.北京:机械工业出版社,2001.

[8] 赵毅.跨平台程序设计语言——Java[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2006.

[9] 谭浩强. C++ 面向对象程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

版社,2006.

[10] 丁展,刘海英. Visual C++ 网络通信编程实用案例精选[M]. 北京:人民邮电出版社,2004.

[11] 施伯乐,丁宝康. 数据库技术[M]. 北京:科学出版社,2002.