

# 多速率机制下拥塞识别的 Ad Hoc 跨层路由方案

杨光松<sup>1,2</sup> 肖明波<sup>2</sup> 陈辉煌<sup>2</sup> 姚彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(集美大学信息工程学院, 厦门 361021)

<sup>2</sup>(厦门大学通信工程系, 厦门 361005)

<sup>3</sup>(清华大学电子工程系, 北京 100084)

E-mail: ygs3@163.net

**摘要** 利用跨层设计的思想, 论文提出了一种自适应多速率机制下, 基于节点信息的 Ad Hoc 路由算法。根据物理层 SNR 的测量, 结合 MAC 层的信息进行延迟估计, 引入一种新的路由度量来选择路径, 避开拥塞, 减少延迟, 提高网络吞吐量, 从而能改善网络的整体性能。

**关键词** Ad Hoc 网络 多速率机制 跨层 路由设计

文章编号 1002-8331-(2006)14-0158-04 文献标识码 A 中图分类号 TP393

## A Congestion-aware Cross-layer Routing Scheme of Ad Hoc Networks with Multi-rate Mechanism

Yang Guangsong<sup>1,2</sup> Xiao Mingbo<sup>2</sup> Chen Huihuang<sup>2</sup> Yao Yan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(Information Engineering School, Jimei University, Xiamen 361021)

<sup>2</sup>(Department of Communication Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

<sup>3</sup>(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** This paper proposes a cross-layer routing scheme based on information monitored by nodes for Ad Hoc networks supporting multi-rate mechanism. A new routing metric is introduced to take SNR measure on physical layer and delay estimate on MAC layer into account. With this metric, the routing algorithm tends to choose routes with wider bandwidth, lower delay, and less congestion. It demonstrates that the proposed scheme improves the performance of Ad Hoc work.

**Keywords:** Ad Hoc networks, multi-rate mechanism, cross-layer, routing design

### 1 引言

Ad Hoc 网络具有无中心、自组织、多跳、能量受限等特点。在快速移动的无线环境中, 网络的链路特性、拓扑结构、节点业务量都在不断发生变化; Ad Hoc 网络在无线环境中节点之间存在着干扰和竞争; 由于网络外界干扰和内部流量的不平衡, 也会导致拥塞、冲突, 从而使整个网络的质量下降。因此, 如何在复杂的无线信道与网络条件下设计具有较好性能的 Ad Hoc 网络路由协议颇具挑战性。

IEEE 802.11 是目前无线 Ad Hoc 网络中占主导地位的标准。802.11 的物理层能提供多速率能力, 控制帧及广播帧以基本速率发送, 而数据帧可以根据信道状况选择不同的速率。研究者据此提出了一些支持多速率的 MAC 层机制<sup>[1-3]</sup>, 可以用于改善 Ad Hoc 网络的性能。

由于 Ad Hoc 网络本身的特点, 在 Internet 网络中获得成功应用的分层设计模式往往难以给出性能满意的 Ad Hoc 网络。这是由于这种模式侧重于通信协议的各层独立进行研究, 彼此缺乏相关性。为此, 提出了跨层设计 (Cross-layer) 思想<sup>[4-6]</sup>, 即将各层的参数联合考虑, 允许层与层之间的信息交换。跨层

设计模式以一种综合的方法来适应 Ad Hoc 网络的动态性, 有可能有效地提高网络的整体性能、合理有效地利用网络资源。

本文利用跨层设计的思想, 提出了一种改进的路由度量, 在多速率机制下, 避开干扰和冲突, 同时尽量选择高速链路, 增加系统吞吐量, 从而提高网络的性能。本文接下来的部分安排如下。第 2 节介绍了速率自适应机制和 Ad Hoc 网络中的一些常用路由度量; 第 3 节介绍了跨层设计方法, 对 802.11DCF 机制下的延迟性能进行了分析, 并给出了跨层路由算法的实现; 第 4 节给出仿真结果及分析; 最后在第 5 节给出全文结论。

### 2 多速率机制下的路由度量

#### 2.1 速率自适应机制

速率自适应 MAC 协议的中心思想是: 在信道条件较好时, 用较高的速率发送数据, 这可以通过改变物理层调制方案来实现。ARF (auto-rate full back)<sup>[1]</sup>是最早提出的基于发送端信息的自动速率协议, 发送端在成功发送若干个帧后, 尝试用更高的速率发射, 如果失败则降低发射速率。RBAR (Received based auto-rate)<sup>[2]</sup>和 OAR<sup>[3]</sup>是基于接收端信息的 MAC 层机制,

基金项目: 清华-高通无线通信研究中心资助项目

作者简介: 杨光松, 博士研究生, 研究方向为移动通信, 无线网络等。肖明波, 教授。陈辉煌, 教授, 博士生导师。姚彦, 教授, 博士生导师, 国家 863 计划通信主题专家领导小组成员。

接收机收到 RTS 信号后,根据信道的信噪比确定链路速率,并在 CTS 中将此速率通知发送端,从而自适应地调整速率。它们先以基本速率发送 RTS 帧到接收机,接收机根据测量的信号强度判断 SNR,选择合适的速率,并把此信息附在 CTS 帧上送回发送机。在每一个数据分组发送之前,必须交换 RTS/CTS 信息。

## 2.2 路由度量

现行的 Ad Hoc 路由协议基本上是基于最小跳数路由判决,它的一个基本假设是二进制信道。由于无线通信的非对称性以及 MAC 层机制的影响,使用最小跳路由度量往往不能构造一条性能良好的路径<sup>[7]</sup>,而且可能产生灰区(gray-zone)效应<sup>[8]</sup>。

在有线网络中,也有用链路速率的倒数作为路由度量。但是,在无线网络中存在排队延迟和重传,而且在 802.11 网络中,由于 RTS 等控制帧是用 1Mbps 的基本速率传送,控制负荷占用了整个媒体时间的很大一部分,这个度量在无线网络中不能直接应用。

文献[6]中用 MAC 延迟作为干扰识别的度量,但未考虑节点的排队延迟,输入业务量大的时候也会造成拥塞。

文献[7]利用信道带宽和延迟的关系,提出了基于媒体时间 MTM(medium time metric)的路由度量。但是,这个度量的提出是基于全干扰的假设,它没有考虑阻塞和业务负荷的影响。

## 3 Ad Hoc 网络的跨层方法及路由实现

### 3.1 跨层方法

传统的分层设计模式侧重于对各个部分独立的研究,缺乏相互之间的相关性;而跨层设计<sup>[9]</sup>把各层的设计因素紧密地结合在一起,各层之间可以交换信息,用一种综合的方法来适应网络的动态特性,能有效地提高网络的整体性能、合理有效地利用网络资源。

通信协议各层之间是相互影响的:物理层通过信道估计来获得一个链路的状态信息,发送机据此选择一个速率。而速率在 MAC 层会影响一个数据分组的延迟。网络层的路由判决也会影响网络的负载分配,从而影响各自链路上的延迟、丢包、速率等参数,反过来又会影响 MAC 层的性能。例如,如果选择了干扰多的路径,就会使 MAC 层相互干扰和相互碰撞,迫使物理层采取措施满足 BER 的需求。

因此,应综合考虑各层影响,用跨层的方法来进行干扰拥塞识别的路由设计。如图 1,网络节点之间互相交换信息以获知链路状况及媒介竞争情况。同时,对节点队列长度等本地信息进行测量。在路由的判决和处理时,根据物理层以及 MAC 层信息,进行综合处理和判决,以发现可靠而高效的路由。

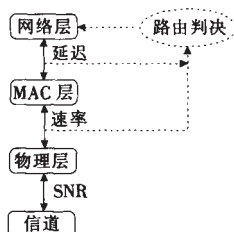


图 1 跨层路由实现框图

### 3.2 延迟分析及路由度量

本文提出的路由设计的思路是:根据物理层的 SNR 信息

决定链路速率,结合广播分组的单跳单程延迟测量,对一条链路的实际数据分组传送延迟进行估计,并以此计算路由度量,最小化一个链路上的传送时间,充分利用带宽,在发生干扰或者冲突时,能绕过拥塞区域,提高系统的吞吐量。

#### (1) 延迟分析

Ad Hoc 网络工作于存在衰落、多径的无线信道环境中,每个节点都有可能遭受来自系统外部的或者系统内其它节点的射频干扰,导致 SNR 降低;由于网络的 MAC 层机制,也可能由于信道竞争而增长接入延迟;在业务量集中的节点,由于缓存队列长度和节点服务速率的限制,也可能导致分组延迟增加,乃至丢包。

为避免碰撞,IEEE 802.11 的 DCF 机制采用物理侦听和 MAC 层虚载波侦听的策略。有基本 CSMA/CA 和 RTS/CTS 两种工作方式。采用基本 CSMA/CA 方式时,当节点检测信道空闲大于某一帧间隔 IFS(Inter Frame Space),即开始发送帧,否则延迟接入并选择退避时间进入退避,结束后重新开始上述过程。RTS/CTS 机制则还需经过 RTS/CTS/DATA/ACK 的过程。DCF 延迟特性与网络规模、业务量大小、网络拓扑、物理传输方式等有关。在本文中,我们考虑的网络执行 RTS/CTS 机制。

以如图 2 所示的一条单跳链路为例,设 A、B 为 Ad Hoc 网络中的一对中继节点,数据分组从发端 A 到收端 B 的时间为:

$$T = T_q + T_{mac} + T_x + T_p \quad (1)$$

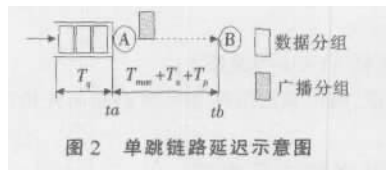


图 2 单跳链路延迟示意图

其中:

$T_q$  为排队时间,指一个分组进入节点缓存到开始进入 MAC 竞争之间的时间。每一个节点的排队延迟与节点缓存大小、流入的业务量以及服务速率相关。

$T_{mac}$  为排队完毕到接入信道的的时间,包括接入信道、竞争信道及冲突避免的时间,与通信范围内的竞争节点数有关。

$T_x = \frac{L}{r}$ ,是数据分组的传送时间,与分组的长度  $L$  和传送速率  $r$  有关。图 3 为不同数据分组长度下的单跳延迟。

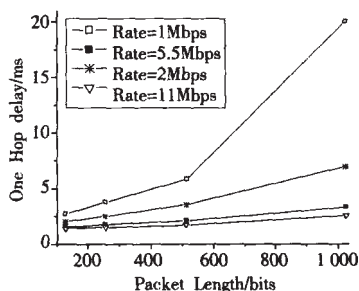


图 3 不同传送速率下的单跳延迟

$T_p$  为数据分组在实际无线信道中的传播时间,通常可以忽略。

#### (2) 链路延迟估计

对于任一条链路  $i$ ,假设长为  $L_0$  的广播分组在节点 A 排队完毕,准备接入信道的时间为  $t_a$ ,邻居节点 B 收到此分组的时

间为  $t_b$ 。由于 802.11 中的控制帧是用基本速率  $r_0$  (1Mbps) 传送的, 而且传送数据帧时采用了 RTS/CTS 机制, 于是可以测量此链路上传送广播分组的时间为  $TM = t_b - t_a = T_{mac} + \frac{L_0}{r_0}$ 。如果节点 A 中有  $N_i$  个长度为  $L$  的数据分组, 链路的实际发送速率为  $r_i$ , 忽略传播时延  $T_q$ , 则根据 (1) 式, 一个数据分组从结束在 A 中的排队到 B 接收的估计时间为:

$$TE_i = N_i \times (TD_{mac} + \frac{L}{r_i}) = N_i \times (TM_i - \frac{L_0}{r_0} + \frac{L}{r_i}) \quad (2)$$

其中,  $TD_{mac} = T_{mac} + \alpha$  是数据分组的估计竞争时间, 其中  $\alpha$  为一常数, 表示由于采用 RTS/CTS 而导致的时延校正因子。

### (3) 路由度量选择与跨层综合判决

由于单跳测量延迟与竞争情况、分组长度、排队情况、信道的服务速率等有关系, 在 Ad Hoc 网络协议中, 可以考虑采用以上的延迟作为路由度量, 即链路  $i$  对应的路径代价为  $C_i = TE_i$ 。

网络拓扑结构可用一个无向图  $G=(V, E)$  来表示, 其中  $V$  是移动节点集合,  $E$  是链路的集合。考虑网络中两个节点  $s, d \in V$ , 如果从节点  $s$  到节点  $d$  存在两条路径  $X \subseteq E$  和  $Y \subseteq E$ , 则其对应的路径代价分别为  $C_X = \sum_{i \in X} C_i$  和  $C_Y = \sum_{j \in Y} C_j$ 。于是路由判决算法为:

$$\text{if } C_X < C_Y \quad (3)$$

$$\text{then \{选择 X\} else \{选择 Y\}}$$

也就是说, 路由算法的任务是找到路由代价 (端到端延迟) 最小的路径。

## 3.3 跨层路由算法及实现

在进行 Ad Hoc 网络跨层路由设计时, 首先要获取节点各层信息, 并在节点之间进行交互。通常节点之间的状态更新有以下三种方法: 用一个信道返回 ACK 包, 包含到目的地的信道状态<sup>[1]</sup>; 每个信道在数据分组或者 ACK 包头中, 加入当前的信道质量<sup>[2,3]</sup>; 使用探测包, 在每个节点维护一个链路质量状态矩阵。可以在具体路由协议设计时考虑选用。

对于主动路由协议, 可以定期监测节点, 广播报文交换信息, 并及时更新路由表。对于按需路由协议, 每个节点泛洪广播报文, 物理层根据接收到的 BER 信息来调整数据发送速率, MAC 层也可据此进行延迟计算, 从而获得路由度量。本文以一种主动路由协议 AODV 为例进行说明如何实现我们的路由算法。为此, 对 AODV 作以下改动:

(1) 原 AODV 协议的 RREQ (Routing Request) 分组包括了源节点和目的节点地址, 序列号, 跳数。本文采用 RREQ 扩展格式<sup>[10]</sup>, 将 RREQ 中的跳计数改为累计估计时间计数, 以执行估计时间度量。同时增加上游节点的排队长度和接入时间。

(2) 原 AODV 中, 由于 RREQ 分组由源节点号和广播 ID 唯一决定, 节点收到重复的分组将会被丢弃。为了平滑路径延迟估计, 在一定的计数时间内, 如果到源节点的新路径  $X$  的估计延迟小于原路径  $Y$  的估计延迟, 允许中继节点中继 RREQ 分组。每个节点更新路由表项。为避免过时的路径信息, 不允许中继节点产生 RREP 分组到源节点。

具体的路由执行过程为: 当不存在到宿节点的有效路径时, 启动路由发现过程。源节点广播一个 RREQ 报文到邻居节点, 然后更新总的路径延迟度量, 直至到达目的节点。假设网络

中同步良好, 每个节点使用 802.11DCF 机制, 并且可以监测 MAC 层的接口队列。考虑如图 2 所示链路  $i$  两端的节点 A 和 B, 当 B 收至 A 发来的 RREQ 报文时, 从 RREQ 分组头中, 可以知道链路  $i$  的信道 SNR 和节点 A 中的队列长度以及 RREQ 在 A 节点接入信道的时间。根据 (2) 式可以计算链路  $i$  的估计延迟  $TE_i$ 。

在泛洪 RREQ 分组的过程中, 中继节点在路由表中记录总的路径延迟  $\sum_i TE_i$ 。如果新路径  $X$  与原路径  $Y$  相比, 具有更大的路径延迟, 则接收到的 RREQ 报文将被中继。为避免拥塞, 当队列中队列长度超过 80% 的缓存时, 则不中继 RREQ。

如果一个 RREQ 分组到达宿节点, 宿节点响应一个 RREP 分组到接收到 RREQ 分组的相邻节点。如果某个节点转发的 RREQ 分组比前面一个 RREQ 分组有更小的路径延迟, 宿节点又立即发送一个 RREP 分组到源节点改变路径。除了宿节点, 不允许任何中继节点产生 RREP 分组, 以避免中继节点的记录误差。源节点收到 RREP 分组时, 根据路径延迟度量和宿节点序列号的新旧来选择路由。

当节点发生错误时, 比如队列溢出或者移出通信范围时, 由错误节点发送一个 RRER 分组, 告知链路的变化情况, 源节点又重新初始化链路发现过程。

## 4 仿真及分析

本文使用 NS2.26<sup>[11]</sup> 仿真工具对路由算法及度量的性能进行评估。使用修改后的 AODV 路由协议, MAC 层为 802.11DCF, 采用多速率机制和延时估计度量, 每个采样点进行 10 次仿真, 取其平均值。

仿真场景为长宽各为 1000m 的区域, 随机分布 50 个节点, 采用两径衰落信道, 移动模式采用随机停靠模式 (Random waypoint), 最大移动速率为 2m/s, 信源采用任意产生 10 个固定比特的数据源, 分组长度为 512byte, 速率为 1 (或 2)、5.5、11Mbps 时, 最长通信距离分别为 100m、200m、250m, 仿真时间为 200s。

采用分组投递率和端到端延迟作为衡量网络性能的指标。分组投递率指网络中目的节点成功接收的分组数与网络中信源产生的分组数的比值, 反映了网络的数据处理能力。

仿真结果如图 4、图 5。由图可见, 在发送到网络中数据量比较小的时候, 两种路由度量下的端到端延迟及分组投递率都很接近, 但随着网络负荷的升高, 由于局部的网络拥塞, 引起了分组丢失和延迟的增加。

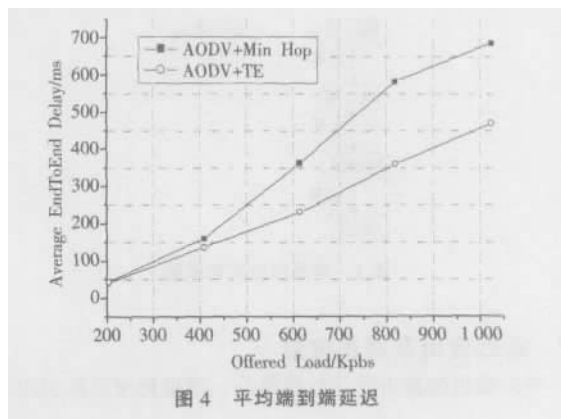
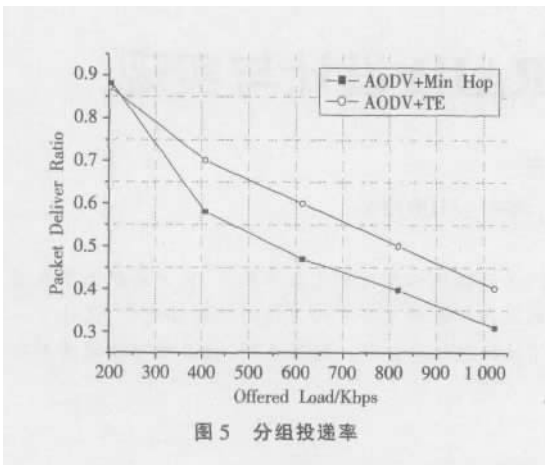


图 4 平均端到端延迟



在网络负荷增大时, 引入估计延迟度量机制后的度量后, 能避开拥塞路径, 减少延迟, 并提高分组投递率, 从而提高了网络的性能。

## 5 结论

本文在对多速率机制下 Ad Hoc 网络延迟参数进行分析的基础上, 利用跨层的方法, 综合考虑物理层和 MAC 参数, 提出了一种路由度量, 在选择路径时, 充分利用多速率机制的带宽, 同时能够避开干扰和冲突, 选择具有小的冲突竞争以及排队延迟的路径, 均衡负载。仿真结果证明, 该方法能提高系统的分组投递率, 减少延迟, 从而提高了网络的总体性能。

(收稿日期: 2005 年 7 月)

## 参考文献

1.A Kamerman, L Monteban.WaveLAN- II: A High Performance Wireless

(上接 157 页)

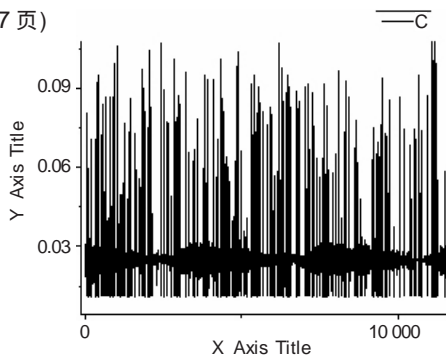


图 7 局部放大图

圾报文影响时, 几分钟后就会出现网络堵塞现象, 最终整个网络任务瘫痪, 影响了系统的正常工作。若使用本文设计实现的嵌入式 TCP/IP 协议栈实现网络通讯功能, 则无论在每秒 1 250 包垃圾报文的影响下还是在每秒钟 5 000 包或 10 000 包垃圾报文的影响下, 均不会出现网络堵塞现象, 更不会出现网络任务瘫痪。但会出现丢包现象, 并且, 随着垃圾报文量的增加丢包问题也更为严重。值得一提的是, 这种丢包问题是由于以太网的自身工作机制 (CSMA/CD, 带有冲突检测的载波侦听多路存取) 和 UDP 协议的工作原理 (无连接, 不可靠) 引起的, 是不可避免的。

## 5 结束语

本文对在综合导航系统项目开发过程中发现的 VxWorks 操作系统网络通讯功能的缺陷进行了深入的分析, 根据实际项

LAN for the Unlicensed Band[J].Bell Labs Technical J, 1997: 118-133

2.Gavin Holland, Nitin H Vaidya, Paramvir Bahl.A rate adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks[J].Mobile Computing and Networking, 2001: 236-251

3.B Sadeghi, V Kanodia, A Sabharwal et al.Opportunistic media access for multirate ad hoc networks[C].In: International Conference on Mobile Computing and Networking, Atlanta, Georgia, USA, 2002

4.Liang Qin, Thomas Kunz.Survey on Mobile Ad Hoc Network Routing Protocols and Cross-Layer Design[R].Technical Report SCE-04-14, Carleton University, Systems and Computer Engineering, 2004

5.Chen Kai, Shan Samarth H, Nahrstedt Klara.Cross-layer design for data accessibility in mobile Ad Hoc networks[J].Wireless Personal Communications, 2002; (21): 49-76

6.Wing Ho Yuen, Heung-no Lee, Andersen T D.A Simple and Effective Cross Layer Networking System for Mobile Ad Hoc Networks[C].In: Personal, Indoor and Mobile Radio Communications.The 13th IEEE International Symposium, 2002; 4: 1952-1956

7.D S J De Couto, D Aguayo, B A Chambers et al.Performance of multi-hop wireless networks: Shortest path is not enough[C].In: Proceedings of First Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-1), 2002

8.H Lundgren, E Nordström, C Tschudin.Coping with communication gray zones in IEEE 802.11b based ad hoc networks[C].In: Proceedings of 5th ACM International Workshop on Wireless Mobile Multimedia (WoWMoM '02), 2002

9.Conti M, Maselli G, Turi G et al.Cross-Layering in Mobile Ad Hoc[J].Network Design Computer, 2004; 37(2): 48-51

10.C E Perkins, E M Royer, S R Das.Ad hoc on-demand distance vector routing.Internet Draft, 2002

11.Ns-2 Network Simulator.http://www.isi.edu/nsnam/ns/

目的需要设计并实现了一个基于 VxWorks 系统的嵌入式、高性能 TCP/IP 网络协议栈。并通过两个实验对本文设计的网络协议栈与 VxWorks 系统提供的网络协议栈进行了性能对比测试, 验证了设计的正确性和有效性。但本文设计的网络协议栈与具体项目结合, 考虑到协议栈的性能, 只实现了 TCP/IP 协议栈中的部分协议。与 VxWorks 系统提供的网络协议栈相比, 具有一定的应用局限性。(收稿日期: 2005 年 9 月)

## 参考文献

1.W Richard Stevens 著.范建华等译.TCP/IP 详解卷 1: 协议[M].北京: 机械工业出版社, 2000

2.GARY R Wright 著.陆雪莹, 蒋慧等译.TCP/IP 详解卷 2: 实现[M].北京: 机械工业出版社, 2000

3.Douglas E Comer 著.林瑶, 蒋慧等译.用 TCP/IP 进行网际互连第一卷: 原理、协议与结构[M].北京: 电子工业出版社, 2004

4.Andrew S Tanenbaum 著.熊桂喜, 王小虎译.计算机网络[M].第 3 版, 北京: 清华大学出版社, 1999

5.马凯.TCP/IP 与网络体系结构[M].北京: 中国电力出版社, 2000

6.郑宗汉.实时系统软件基础[M].北京: 清华大学出版社, 2003

7.孔祥营, 柏桂枝.嵌入式实时操作系统 VxWorks 及其开发环境 Tornado[M].北京: 中国电力出版社, 2002

8.李明, 康静秋.嵌入式 TCP/IP 协议栈的研究与开发[J].计算机工程与应用, 2002; 38(16): 118-121

9.万捷磊, 朱杰.在嵌入式网络应用中实现 TCP/IP 协议[J].微电子学与计算机, 2002; (5): 28-30

10.李方敏编著.VxWorks 高级程序设计[M].北京: 清华大学出版社, 2004

11.Liam B Quinn 著.刘晓梅等译.快速以太网[M].北京: 人民邮电出版社, 1999