

# 基于 XScale 和嵌入式 Linux 的网络测量仪

曾宪玮, 裴昌幸, 朱畅华, 易运晖

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 西安 710071)

**摘要:** 设计和实现了一种便携式网络性能测量仪, 采用 Intel XScale PXA255 嵌入式处理器和嵌入式 Linux 操作系统, 并采用 FPGA 器件进行小型化和性能优化设计。解决了仪表之间的同步、网络接口的数据交换、数据分析及可视化等关键技术。

**关键词:** 网络测量仪; 同步; 可视化; XScale; 嵌入式 Linux

## Network Measurement Device Based on XScale and Embedded Linux

ZENG Xian-wei, PEI Chang-xing, ZHU Chang-hua, YI Yun-hui

(State Key Lab of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071)

**【Abstract】** A portable network performance measurement device is designed and implemented, in which Intel XScale PXA255 microprocessor and embedded Linux operating system are used. The FPGA device is applied to miniaturize the measurement device and to enhance its performance. The key techniques to solve the problems such as synchronization among devices, data exchange between network interface and CPU, data analysis and visualization are discussed.

**【Key words】** network measurement device; synchronization; visualization; XScale; embedded Linux

网络规模的不断扩大及用户对网络性能要求的不断提高, 使得网络性能的可知性越来越复杂<sup>[1]</sup>。作为一种测量、监视网络性能和诊断网络故障的仪表, 网络测量仪可以有效地诊断网络故障, 从而对网络进行管理和维护。

网络测量是指遵照一定的方法和技术, 利用软件包或硬件工具来测试表征网络性能的指标, 获取网络拓扑结构、节点属性、业务量特征等一系列活动的总和<sup>[2]</sup>。时延、带宽和丢包率是 IETF 网络协议性能指标工作组 (IPPM WG)<sup>[3]</sup> 制定的衡量网络性能的基本指标, 节点和链路的其他指标基本可以从这几个基本指标计算得出。测量方法分主动测量和被动测量。主动测量是将测量分组注入网络进行测量, 如通过在一端发送 UDP 分组, 而在另一端接收该分组, 可以测量端到端的延时、丢包率、分组路由等。被动测量是在网络的某处布置数据采集器, 收集流过该处的网络业务流, 进行分析、提取业务的特征, 获得性能数据。某些指标可以结合 2 种方法测得。

### 1 网络性能测量仪的关键技术

#### 1.1 同步问题

时钟同步始终是某些性能指标测量的前提, 如端到端时延。端到端时延是网络性能的重要指标。目前有些软件同步算法可以减小这种时间不同步所引起的测量误差, 但是精度有待提高。本文采用 2 种硬件同步机制: GPS(global positioning system) 同步和内部同步。GPS 同步具有精度高的优点, 可以达到  $1\mu\text{s}$ <sup>[4]</sup>, 而且可以实现远距离同步。内部同步使用同轴线将 2 台测试仪直接相连, 由内部时钟触发测试仪之间的时间同步。

#### 1.2 网络接口的数据吞吐量

在进行被动测量时, 通常需要对网络数据进行捕获和分

析。这对网卡的吞吐能力和数据处理能力要求很高。绝大部分测试仪都是在 FPGA 里设计自己的 MAC, 这种方案效果最好, 但是成本最高。这里采用 FPGA+MAC 芯片组合结构, 由 FPGA 对 MAC 数据进行硬件预处理, 包括分组过滤、归类存储等。

#### 1.3 数据统计分析及可视化

如何对获得的原始数据进行统计分析以及如何直观显示测量结果是测量仪实现的难点。对此, 可以参照测量要求对数据进行有针对性的分析。系统采用 MiniGUI 图形界面, MiniGUI 是轻量级的图形引擎, 适合嵌入式系统应用。

#### 1.4 系统功耗

作为便携式网络仪表, 系统功耗是个大问题。电源管理需要从硬件和软件 2 个方面入手。本文选用 Intel XScale PXA255 处理器, CPU 时钟可达 400MHz。该处理器针对便携式设备设计的, 功能强、功耗低, 工作时钟可以动态调整<sup>[5]</sup>。其他模块均配备电源管理模块, 可以通过软件关闭没有使用到的模块从而降低系统功耗。

### 2 网络测量仪的系统实现

#### 2.1 系统硬件结构

根据系统性能要求及特点, 选择 Intel XScale PXA255 作为中央处理器, 完成数据存储分析、结果输出和与人交互等主要功能。PXA255 是 Intel 公司推出的针对手持式计算应用领域推出的高性能、低功耗处理器, 功耗为 mW 级。Intel

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60132030)

**作者简介:** 曾宪玮(1981 - ), 男, 硕士研究生, 主研方向: 分布式网络测量, 嵌入式系统; 裴昌幸, 教授、博士生导师; 朱畅华, 博士研究生、讲师; 易运晖, 博士研究生、工程师

**收稿日期:** 2006-08-29 **E-mail:** zengxw@mail.xidian.edu.cn

XScale 体系结构包含了 ARM V5TE 的内核以及 ARM DSP 增强指令集, 能够满足使用需要。同时, 针对便携式仪表的特点, 给每个功能模块配备了电源管理单元, 如液晶、网络接口模块等。在没有使用到该单元的时候, 软件自动将关闭该模块。硬件结构如图 1 所示。

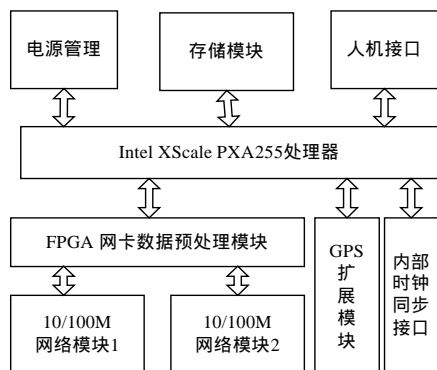


图 1 网络测量仪硬件结构

由于网络测量通常要高速捕获并实时分析流经网络的分组数据包, 因此对测量仪网络接口的吞吐量和 CPU 的处理能力要求非常高。为了降低 CPU 的处理负担, 使用 FPGA 完成网卡数据的预处理, 包括捕获、解包、过滤和归类等, 而让 CPU 处理 FPGA 输出的数据、输出处理结果以及人机交互等, 大大提高了网卡的吞吐量和系统性能。FPGA 内部功能模块如图 2 所示。

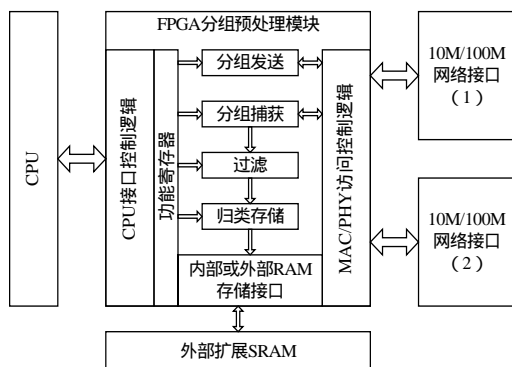


图 2 FPGA 分组数据预处理结构

在 FPGA 内部功能寄存器中定义了 3 种工作模式: 正常模式, 发送模式和捕获模式。

正常模式下, CPU 可以跨过 FPGA 直接从 10M/100M 网卡芯片读出数据, 此时 FPGA 仅仅完成总线的逻辑转换和译码功能, 对于 CPU 来说, FPGA 是透明的。CPU 往相应的寄存器位置可以进入发送模式和捕获模式;

发送模式下, 网络接口可以按照用户设定的参数如发送速率、分组(帧)的大小发送数据包。使用 FPGA 而不是 CPU 来完成这项工作的主要原因是提高发送速率。通过测试, 如果使用 CPU 直接操作 MAC 的话, 调整 CPU 的读写时序, 发送速率可以达到 60 ~ 75Mb/s 而采用 FPGA 直接控制 MAC 发送速率能够达到 85Mb/s 以上。这主要用于产生特定的流量, 在某些性能测试方面是非常有用的;

在捕获模式下, 可以设定对特定包进行捕获、过滤某种特征的分组如只捕获某个源 IP 的数据分组。捕获结果将根据用户设定进行归类存储, 如果用户不关心分组数据, 则可以

仅仅存储包头信息(MAC 地址、IP 地址、端口号和协议类型)。对于检测到相应的错包(如 CRC 校验出错)、碎片包等将置位相应的内部寄存器。捕获结果存储于 FPGA 内部 SRAM 高速存储器或者外部扩展存储器。该存储器可以被 CPU 和 FPGA 共享。

其他主要模块说明如下:

(1)网络接口模块: 网络接口选用集成链路层(MAC)和物理层(PHY)的芯片。这里配置了两个独立的网络接口, 使得使用一台测量仪就可以进行路由器等设备的环回测试。根据 RFC2544 网络设备基准测试协议, 将接口(1)和接口(2)分别配置为收和发状态, 可以测量被测设备的吞吐量。

(2)GPS 模块和内部时钟同步接口。使用 GPS 可以获得精确的时钟同步, 精度可以达到 1μs。这里选用集成的 GPS 接收模块以降低开发难度和成本。GPS 模块可以输出全球同步的秒脉冲, 将该秒脉冲输出与 CPU 的高优先级中断引脚相连, 在秒脉冲的下降沿触发中断, CPU 执行时钟同步程序, 同步时钟。另一种时钟同步的方法是使用内部时钟同步接口。使用同轴线将两台或多台测量仪相连, 由其中一台测量仪产生同步脉冲, 触发所有测量仪执行同步程序从而使测量仪之间时钟同步。两种同步方法有效解决了时钟不同步带来的问题, 提高了测量精度。

(3)存储模块: 系统配备了 3 种类型的存储器: 高速捕获缓存 SRAM, 大容量 SDRAM 和 Flash。

另外, 针对这块测量仪便携式的特点, 系统配置了电源管理模块, 并且为了更直观显示和更方便操作, 系统还配置了 TFT LCD 和触摸屏等。

## 2.2 系统软件结构

系统软件采用了嵌入式 Linux 操作系统, 使用 Linux-2.6 版本的内核。嵌入式 Linux 操作系统自带 TCP/IP 协议栈和文件系统, 这是网络测量仪必不可少的软件组件, 省去了开发协议栈的麻烦。使用 Linux 操作系统的另一优点是程序开发方便、可移植性强、升级方便。将操作系统移植到目标系统即测量仪上后, 程序框架结构和一些通用模块如界面显示等可以先在 PC 机上开发、调试, 之后再移植到测量仪上, 添加特殊功能和模块如流量产生模块等; 由于有文件系统和 Glib 库的支持, 程序升级、添加新的测量模块也仅仅是应用程序的更新, 而不必擦除整块 Flash, 非常方便。

为了增强测量仪的可视化界面以及增强可操作性, 采用 MiniGUI 图形界面系统。由于采用了分层设计的思想, 程序变得简洁高效。软件结构如图 3 所示。



图 3 网络测量仪软件结构

网卡驱动程序的开发是系统软件设计一大难点。由于 CPU 是通过 FPGA 与 MAC 芯片相连的, 因此驱动程序必须和 FPGA 程序相配合, 才能完成相应的功能。另一方面驱动

程序需要屏蔽这些硬件差异，给上层协议栈和应用程序提供统一的接口。

应用程序根据用户输入完成数据采集、数据分析处理以及结果输出的功能。用户程序依赖底层函数库，包括 Glib 库、MiniGUI 函数库和网络测量程序库。其中，网络测量程序库包含了网络基本性能参数的测量功能，提供了一系列网络测量工具集，如端到端时延测量、可用带宽测量、分组捕获和流量产生等。将网络测量编译成函数库的优点在于程序升级性强，只要预先定义好统一的接口，应用程序和库函数可以分开开发和调试，加快开发进度。

专家诊断系统是一系列网络性能自动测试、分析的工具集。如提供对 Web 服务器、FTP 服务器或者局域网性能网络测量仪的另一个功能是提供了 Web 界面，可以通过远程登录到测量仪，对测量仪进行配置、发起测量任务以及查看测量结果等。这一功能是由后台服务程序提供的。后台服务程序是在 HttpLIB 库的基础上编写的 Web 服务器程序。该程序在系统启动过程中自动启动，侦听用户指定的网络接口，接受用户登录以及从 MiniSQL 数据库中读取用户需要的数据返回用户，并且能够根据用户要求启动响应的网络测量程序。网络测量应用程序、后台服务程序和 MiniSQL 3 者的关系见图 4。采用多进程编程方法可以保证系统的稳定性。

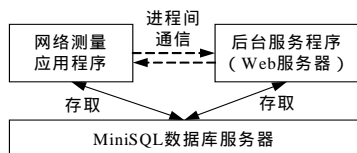


图 4 应用程序和后台服务程序、数据库的关系

### 2.3 系统工作流程

MiniGUI 是基于消息驱动的图形界面系统。系统启动时，完成网络设备初始化工作并启动后台服务程序，之后自动加载运行测量主程序，进入 MiniGUI 主循环。在主循环中不断地取出消息并分发给相应的线程。程序采用了多线程的工作方式，线程之间利用了 MiniGUI 的消息机制通信。一旦有用户发起测量任务，主程序将创建新线程执行任务，该线程在执行完之后自动退出并通知主线程。多线程使得程序结构更加简洁、合理。

(上接第 252 页)

芯片。由于视频的编解码软件接口都是采用平面格式的 YUV420 数据流，需要将其转换为 RGB565 格式以便在 LCD 屏上播放。开始时由于采用直接计算和二次查表法，效果都很不理想，在播放视频画面时，即使是 QCIF(176\*144)的画面，播放起来速度仍很缓慢，只能达到 15 帧/s 左右，画面的连续感很差。之后，由于采用了本文的基于乘法元的查表法，画面的处理速度得到极大地提高，即使是 QVGA(320\*240)的图像画面，音视频同步播放时仍可保持连续，播放速度可达 25 帧/s。因此，该查表法在占用更小的存储空间的前提下，在速度上较二次查表法有很大的提高。

### 4 总结

在现代图像和视频处理中，色彩空间的转换十分重要。其原理虽然简单，设计的好坏却直接影响到整个系统的性能。对于没有相应硬件支持，又对速度和实时性要求较高的图像

### 3 系统测试

使用本网络测量仪对实验网平台进行测试。该实验网平台包含 2 台华为 AR 46-40 路由器、3 台华为 RT2611 路由器、一台 LS3526E 三层以太网交换机以及若干台 S1008 交换机。

将仪表接入实验网，设置好网络参数。在自动测试中，该仪表能够正确发现局域网内主机数量、判断主机类型。在进行其他性能测试中，均可以得出准确的性能参数。系统运行主界面图和时延测量结果分别如图 5、图 6 所示。



图 5 测量仪工作主界面

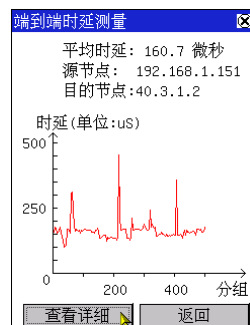


图 6 端到端时延测量结果

### 4 结论

网络的迅速发展需要科学的网络仪表对其进行测量和监视。同时，网络仪表对已有网络精确的测量也有助于新技术的发展。本文介绍了便携式网络性能测量仪的设计和实现的方法，有针对性地解决了网络测量仪的关键技术，达到了一定的实用水平。

### 参考文献

- 1 NLANR. Towards a Systemic Understanding of the Internet Organism: a Framework for the Creation of a Network Analysis Infrastructure[Z]. (1998). <http://moat.nlanr.net/NAI/>.
- 2 朱畅华, 裴昌幸, 李建东. 网络测量及其关键技术[J]. 西安电子科技大学学报, 2002, 29(6): 813-818.
- 3 IPPM. IP Performance Metrics[Z]. (1999-06). [http://www.ietf.org/html\\_charters/ippm-charter.html](http://www.ietf.org/html_charters/ippm-charter.html).
- 4 GARMIN Corporation. GPS 25LP Series Technical Specification[Z]. 2000-04.
- 5 Intel Corporation. Intel PXA255 Processor Developer's Manual[Z]. 2003.

和视频处理系统，色彩空间转换的速度将直接影响到视频播放的帧速率。本文基于乘法元的查表法设计简单，运算速度快、存储空间小，是一种实用的色彩空间转换法。

### 参考文献

- 1 沈俊, 葛燧和. 计算机系统上的 YUV[J]. 计算机工程, 2000, 26(1): 94-96.
- 2 Tkalcic M, Tasic J F. Color Spaces: Perceptual, Historical and Applicational Background[C]//Proc. of International Conference on Computer as a Tool. 2003.
- 3 刘健, 吴玉广. 用 FPGA 实现色空间 R'G'B' 到 YCbCr 的转换[J]. 现代显示, 2004, (1): 56-58.
- 4 田扬林, 许志祥. 二次查表法实现真彩色图像 YUVRGB 格式转换[J]. 电视技术, 2000, (1): 9-10.