

SOPCA: 数字化家电网络通用软件平台

王 勇, 张尧学

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘 要: 如何在复杂多样的信息家电硬件环境中构建一个既能和 Internet 连接, 又能进行内部控制的家庭网络, 软件平台是关键的决定因素. 本文提出并介绍了一种新型的数字化家电网络软件平台 SOPCA(Software Platform of Connecting Appliance). SOPCA 既可以根据需要定制各种不同的程序为用户提供不同的服务, 又能通过自定义的管理协议管理各类信息家电的本地计算资源和对家电实施远程控制. SOPCA 在设计上考虑了家庭网络和信息家电硬件的特点, 并且考虑了家庭网络和 Internet 的互联. SOPCA 在上层定义了通用接口集合, 在底层通过封装可以兼容各种家庭网络的硬件, 通过 Agent 技术进行家庭网络的分布式管理, 是一个具有高可扩展能力的分布式通用家庭网络软件平台.

关键词: 家庭网络; 信息家电; 嵌入式操作系统; 网络管理

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 08-1184-04

SOPCA: A Novel General Software Platform for HomeNet

WANG Yong, ZHANG Yao-xue

(Dept. of Computer Science & Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The software platform is the key to construct an Internet aware HomeNet with remote control capability in a diverse hardware environment. This paper presents the design and implementation of SOPCA (Software Platform of Connecting Appliance), a novel general software platform addresses the problems of resource management in HomeNet. SOPCA is a configurable platform to provide various services for users. A management protocol is also defined in SOPCA to control the information appliance in HomeNet. The design of SOPCA considers the characteristics of hardware in HomeNet and its connection with Internet. With a general upper level interface to capsule the difference between various hardware and distributed agent technique, SOPCA is a flexible platform adapted to radically different hardware in HomeNet environment.

Key words: homeNet; information appliance; embedded operating system; network management

1 引言

信息家电技术和计算机网络的结合产生了家庭网络. 家庭网络是一个动态的计算环境^[1], 信息家电软硬件、操作系统和网络协议的升级使家庭网络时时刻刻处于结构性的变化之中. 信息家电本身功能迥异, 异构的硬件平台上运行各种操作系统和控制软件. 软硬件的动态性和多样性使得家庭网络设备之间的互操作能力很差^[2]. 要构建一个开放的、互操作性强的家庭网络就必须有一个通用的软件平台以屏蔽信息家电硬件的多样性, 通过高层协议实现远程控制和管理^[7].

本文提出和介绍的数字化家电网络软件平台 SOPCA 为家庭网络提供了一个分布式的通用可定制的软件平台. 一方面, SOPCA 能管理平台上信息家电的本地计算资源. 它在上层定义的“嵌入式应用程序编程接口(E API)”为应用程序提供统一的接口, 在底层通过封装来屏蔽硬件的动态性和多样性, 使 SOPCA 能很方便的支持各种家庭网络硬件, 具有很强的通用性; 另一方面, SOPCA 定义了信息家电之间管理信息交换的

协议 HNMP(Home Network Management Protocol)^[4]. HNMP 使用分布式代理技术使数据流和控制流在家庭网络内无缝传输, 实现对信息家电设备的远程管理和控制.

2 SOPCA 系统结构

家庭网络的特点之一就是联网的信息家电设备对计算能力需求的多样性. 在 SOPCA 中根据信息家电本地计算资源的配置把它们归为三类: (1) 本地计算能力很强, 有 100MIPS 以上的 CPU 和足够多的(32MB)存储器; (2) 本地计算资源有限, 有 20MIPS 的 CPU, 例如 Motorola 的 68332. 有少量的(例如 1MB)存储器; (3) 本地计算资源非常少, 由 DSP 作为设备的控制器. 只有 20~ 100kB 的存储器.

能兼容这三类信息家电的数字化家电网络软件平台——SOPCA 的系统结构如图 1 所示:

SOPCA 系统结构主要包括: 家电网络控制中心、HNMP Agent 以及信息家电的支撑软件. 家电网络控制中心一般是运行 HNMP 管理器的家庭网关. HNMP Agent 运行在联网的信息

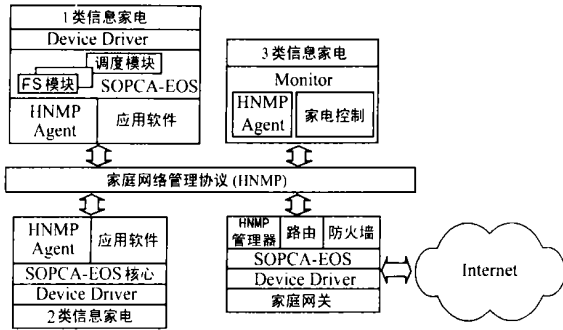


图 1 SOPCA 系统结构

家电上, 向 HNMP 管理器报告信息家电的运行状态并且执行控制家电的指令. SOPCA 中的嵌入式操作系统 SOPCA EOS 和信息家电监控程序 Monitor 是软件平台的基础, 负责管理信息家电的本地计算资源, 并且为信息家电应用软件提供服务接口, 使应用层软件硬件无关.

3 SOPCA 的嵌入式操作系统

为了提高软件平台的可扩展性, 使软件平台的硬件相关性尽可能的小, SOPCA EOS 将硬件平台中的基本部件(如中断处理器, 存储管理单元等等)抽象为逻辑部件. 这些对外有统一定义的接口的逻辑部件组成一个硬件无关的虚拟机.

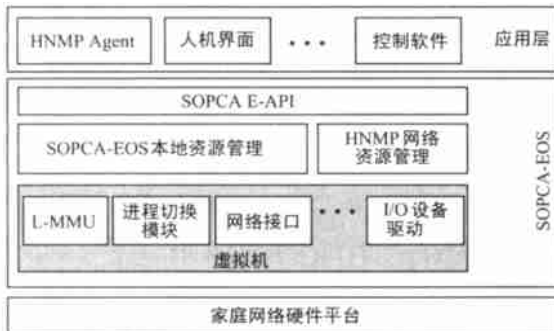


图 2 SOPCA-EOS

SOPCA EOS 采用 Monolith 和 μ Kernel^[9] 混合体系结构: SOPCA EOS 的核心集成了必需的关键功能模块, 这个核心能独立运行在最低配置的硬件平台上. 除此之外的扩展功能都以动态可加载模块的形式实现. 例如, 文件系统 (VFS 除外)、调度模块以及设备驱动.

3.1 进程管理

实时进程是指该进程执行结果的正确性不但取决于结果的逻辑正确性, 而且取决于结果产生的时刻是否满足预设的时限 (Deadline). 进程的实时性是嵌入式操作系统的重要特性. 在工业控制和飞机导航系统等要害系统中, 如果实时进程不能同时满足上述两点要求就会产生灾难性的后果. 这种实时性称为 Hard Real-time. 信息家电的控制对实时性的要求远没有如此严格. 实时进程的运行如果有时不能满足它的时限只影响系统的性能, 比如视频流回放时丢失若干帧, 使图像出现抖动. 这种对实时性的要求称为 Soft Real-time 和 Firm Real-time. SOPCA EOS 可以达到 Soft Real-time.

家庭网络的各种设备中, 进程运行的时间特性复杂多样,

SOPCA 把它们归纳为以下几类: (a) 进程能在时限内对随机事件进行响应, 例如某些关键中断的处理程序; (b) 进程要以某个固定的周期循环执行, 例如某些传感器的数据采集进程; (c) 进程对事件的平均响应时间要求尽可能小, 例如交互式用户界面.

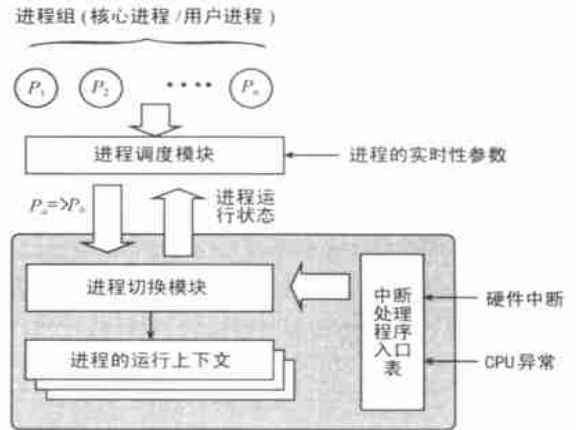


图 3 SOPCA 的进程管理

SOPCA EOS 把进程调度作为一个独立的可动态加载模块. 嵌入式操作系统根据设备对实时性的不同要求, 动态加载适当的进程调度模块实现不同的调度算法. 进程运行的实时性要求由进程控制块 (PCB, Process Control Block) 中的参数进行描述, 这些参数包括: 进程的开始时间、最长可能运行时间 (WCET, Worst Case Execution Time)、平均运行时间、Deadline 和周期性进程的运行周期等.

```

/* header files */
/* global variables */
main()
{
    RT_param struct param;
    unsigned int state;
    /* other local variables */
    ...
    /* initialization program code */
    ...
    set_rt_param( param );
    while(1){ /* one job periodic task */
        if( check_in() ){
            /* start of real time section */
            ...
            /* end of real time section */
            state = check_out();
        }
    }
    /* rest of code */
    ...
}

```

图 4 SOPCA 周期进程的实例

在 SOPCA 的实时编程模型中, 进程可以用 check_in() 和 check_out() 将某段代码设置为实时段 (Real time Section), 进程进入实时段前必须首先通过系统调用 set_rt_param() 来设置这个实时段的时间参数. 进程调度模块根据这些时间参数和调度算法选择将 CPU 分配给就绪队列中的某个进程.

3.2 存储管理

SOPCA EOS 采用虚拟存储管理系统(VMS)管理 RAM. 虚拟存储管理系统为每个进程提供了一个独立的虚拟地址空间, 进程对某个虚拟地址的访问由 CPU 存储管理单元(MMU, Memory Management Unit)转换为对物理地址的访问. 虚拟存储管理系统复杂的地址转换机制给整个系统带来不确定性. Hard Real-Time 实时操作系统一般是根据进程的 WCET 进行进程调度的. 在虚拟存储管理系统里, 进程的 WCET 要在每执行一条指令都产生一个缺页中断的最坏情况下计算. WCET 要远大于实际平均运行时间, 导致系统资源的利用率非常低.

SOPCA EOS 使用虚拟存储管理系统的原因在于: (1) 和传统的嵌入式系统不同, 信息家电的控制只要求所谓的 Soft Real Time. 为了能保证系统资源利用率, SOPCA EOS 的实时进程调度是基于平均运行时间而非 WCET; (2) 虚拟存储管理可以借助 MMU 实现多进程环境下可靠的存储保护; (3) SOPCA 中改进的 VMS 的缺页中断频率大大降低, 而且中断的处理不再需要访问慢速 I/O 的外存储器. SOPCA EOS 中进程虚拟地址空间的最大值= 系统安装的物理存储器的容量+ 系统的 I/O 地址空间. 虚拟存储管理系统使用单级页表进行进程的虚拟地址空间到物理地址空间的映射.

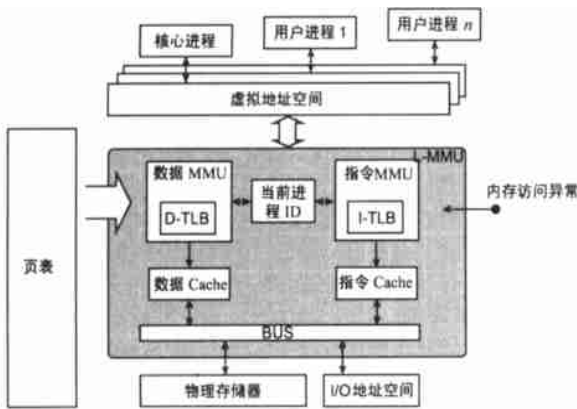


图 5 SOPCA 的存储管理系统

SOPCA EOS 中进程对虚拟地址的访问过程如下:

(a) 当进程首次访问某个虚拟地址时, 由于 TLB 中都没有该地址对应的表项, 必然产生一次缺页中断; (b) 缺页中断的处理程序为该虚拟地址对应的页在 RAM 中分配一个物理页面. 如果该地址属于进程代码段, 则通过文件系统检索到它对应的外存储器(NvRAM)的地址; 如果该地址在数据段, 则从 RAM 中分配一页空闲页面和该虚拟地址对应; (c) 在该虚拟地址所属的页表表项中填入对应的物理地址; (d) 在 TLB 中为这个虚拟地址创建一个表项, 然后结束缺页中断处理程序;

可以看出: 任何代码段虚拟地址至多产生一次缺页中断, 数据段中任何虚拟地址在一次分配与释放的生命周期中也至多产生一次缺页中断. 和桌面操作系统的虚拟存储管理系统相比, SOPCA 简化了从虚拟地址到物理地址的映射步骤并且大大减少了缺页中断的次数.

3.3 文件系统

SOPCA EOS 通过文件系统管理信息家电的两类外存储

器: 有高速 I/O 能力的 NvRAM 和相对慢速 I/O 的硬盘等. SOPCA EOS 根据这些外存储器的存取特性建立不同的文件系统. 为了能管理多文件系统并向应用层提供统一接口, SOPCA - EOS 在多文件系统上层引入一个虚拟文件系统——VFS (Virtual File System). 加载某个文件系统时, VFS 建立一个该文件系统的操作集索引. 操作集包括该文件系统上的文件存取和存储空间管理函数. 应用程序存取某个文件时, VFS 首先检索该文件对应的文件系统的操作集表, 然后再调用该操作集中的函数完成操作. 慢速 I/O 的外部存储器上的文件系统必须同时保证数据访问吞吐量和并发访问时数据的一致性. SOPCA EOS 的 VFS 通过高速缓存(Buffer Cache)协调这两种相互矛盾的需求. 嵌入式系统中闪存(Flash Memory)是常用的外存储器, 它的读周期长度和表 1 闪存的典型存取特性 DRAM 相当, 然而写周期的长度通常是硬盘的 10 倍. 闪存的写操作还必须遵守一定的时序规则^[6].

读周期	80~ 150ns
写周期	10μs/ Byte
擦除周期	1s/ Sector
最大擦除次数	100, 000

SOPCA EOS 在 EXT2^[5] 文件系统的基础上结合闪存的特性实现了一个用于管理闪存空间的 EXT2-NV 文件系统. EXT2-NV 沿用 EXT2 的文件及目录管理算法, 根据闪存的存取特性和规则设计了新的存储空间管理方法. EXT2-NV 将闪存空间划分为 3 个层次: Bank、Sector 和 Block. Block 是 EXT2-NV 文件系统中写操作的最小单位. EXT2-NV 的写操作采用“Write Copy”策略, 大大减少擦除操作的次数.

为了能在各种情况下保证 EXT2-NV 的数据一致性和提供灾难恢复功能, 对 Block 写操作采用两步提交(2-Step Commit)算法. EXT2-NV 文件系统依靠一个核心线程监控存储空间的状态. 当处于“Free”状态的 Block 数量过少时, 在一定的策略指导下擦除某些 Sector, 再将其中的 Block 标记为“Free”状态.

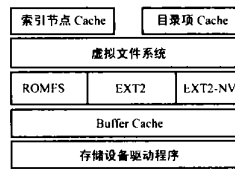


图 6 SOPCA 的虚拟文件系统

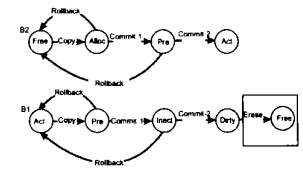


图 7 Ext2-NV 的 Block 写操作状态转换

3.4 动态加载模块

SOPCA EOS 利用可动态安装和卸载的模块(K-Module)在内核中按需增加和卸载组件, 提高 SOPCA 的可扩展性. 大部分设备驱动程序、网络协议栈和文件系统都可以实现动态加载. 可动态加载的模块还便于 SOPCA EOS 的在线更新.

SOPCA EOS 的模块是经连接的可重定位二进制文件. 按需加载模块时, 内核首先将模块从外部存储器中读到核心地址空间中, 然后根据内核符号表修正模块中尚未解析的对内核符号的引用. 内核分配新的 K-Module 数据结构以及足够的内核内存, 并将新模块登记在内核模块表的末尾.

和 μKemel 体系结构中的模块不同, SOPCA EOS 中的模

块和内核在同处一个虚拟地址空间,因此模块和内核其它部分的通讯属于进程内部的通讯.而 μ Kernel 体系结构的模块之间、模块与内核之间的通讯是进程间通讯,它复杂的实现方式的效率要远远低于进程内部的通讯.

3.5 嵌入式应用程序编程接口(E API)

嵌入式应用程序编程接口 E API 定义了嵌入式操作系统为应用程序提供的服务接口和它的可移植性、出错处理及出错恢复. SOPCA 的 E API 包含两个子集:符合 POSIX1003.1 标准的通用可移植的系统接口集合和一个提供实时系统服务的扩展接口集合.前者是 POSIX 1003.1 的子集;后者为应用程序提供了实时时钟、实时线程、实时中断处理和实时进程间通讯等服务的接口定义.

4 Monitor

Monitor 是 SOPCA 平台上的简单信息家电的监控程序.这类信息家电中的计算资源很少,管理任务简单,因此把计算资源管理模块、家电控制模块、网络模块以及 HNMP 代理联接成一个可执行的二进制镜像文件. Monitor 工作在 CPU 的实模式下,整个系统中只有 Monitor 一个进程.由于 Monitor 是一个和硬件紧密相关的程序,所以尽管在 Monitor 中没有核心态和用户态的区别,我们仍然在各个模块之间定义了函数集合作为通用接口,使得 Monitor 可以在各种硬件平台之间迅速的移植.

5 信息家电网络管理

家庭网络中的网络资源形态各异(IEEE1394, HomePNA, Ethernet, 无线局域网等等). SOPCA 一方面要能支持各种新型网络传输介质和传输协议,同时还要能够作为家庭网络和公共网络之间的网关和防火墙. SOPCA 的网络资源管理功能包括:(1)把各种传输介质互连.包括路由、网桥和协议转换功能;(2)Internet 接入功能.能处理 IP 协议^[8];(3)在不同介质的链路层之间使用 IP 协议或者进行链路层的协议转换;(4)家庭网络和 Internet 之间的 IP 层及应用层防火墙;(5)家庭网络设备的管理和自动配置功能;

在 SOPCA 中用 HNMP^[4]模型对家庭网络进行管理. HNMP 为远程控制家庭信息设备提供了基础,并和 SNMP^[3](Simple Network Management Protocol)模型兼容. HNMP 模型包括四部分:管理工作站、被管设备、管理信息库(MIB)和管理协议.

管理工作站即家庭网络控制中心.它运行 HNMP 管理器、维护管理信息库并可以改变被管设备的状态,对它们进行控制.被管设备是

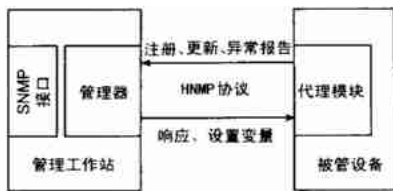


图8 SOPCA 的 HNMP 管理模型

家庭中运行 HNMP 代理模块的信息家电设备. HNMP 管理器和 HNMP 代理模块通过 HNMP 协议进行交互.

HNMP 模型中定义了用于家电网络管理的管理信息库(MIB):在 SNMP 协议的 MIB 2 子树下增加子树 HNMP 来标识所有与家庭网络管理相关的管理对象.管理工作站与被管设

备之间通过 HNMP 报文交换进行通讯,完成注册、更新、设置参数和报告异常等交互过程^[4].

6 结论

SOPCA 是一个家庭网络的分布式的通用可定制软件平台.它包括嵌入式操作系统, Monitor 以及家庭网络的网管协议 HNMP. SOPCA 的通用性体现在它能使信息家电硬件平台上的多样性对应用软件变得透明. SOPCA 中定义了分布式的 HNMP 管理模型和协议实现家庭网络的网管及信息家电的远程控制.我们已经在实验室内建立了一个以 SOPCA 为软件平台的家庭网络的实验环境,这个实验环境中包括数字机顶盒等信息家电和家庭网络控制器.通过 SOPCA,家庭网络与 Internet 相连并且可以实现家庭网络设备的远程控制.为了进一步提高 SOPCA 的可伸缩性和可配置性,我们正在尝试在 SOPCA 中使用智能化的构件技术.

参考文献:

- [1] Walter Y Chen. Emerging home digital networking needs [A]. Proc. of 4th International Workshop on Community Networking [C]. IEEE, 1997. 7- 12.
- [2] Win Treese. Putting it together: the home area network [J]. ACM Net Worker, 2000, 4(1): 11- 13.
- [3] Case J, M Fedor, M Schoffstall, J Davin. The Simple Network Management Protocol [S]. RFC 1157, May 1990.
- [4] 刘云新, 张尧学. 数字化家庭网络管理模型 HNMP [J]. 电子学报, 2001, 29(8): 1050- 1052.
- [5] EXT2: Extended 2 File System [S]. <http://www.ext2.org/>.
- [6] Flash Memory [Z]. Intel Corporation, 1994.
- [7] L Giarletta, A Dima. A conceptual model for pervasive computing [A]. In Proc of International Workshops on Parallel Processing [C]. IEEE, 2000. 9- 15.
- [8] Sung Woo Tak, Jong Moon Son, Tae Keun Kim. Experience with TCP/IP networking protocol S/W over embedded OS for network appliance [A]. In Proc of International Workshops on Parallel Processing [C]. IEEE, 1999. 556- 561.
- [9] Sang Yeob Lee, Youjip Won, Whoi Yul Kim. Designing low cost embedded system for multimedia data processing: linux based micro kernel approach [A]. In Proc of International Conference on Consumer Electronics [C]. IEEE, 2001. 346- 347.

作者简介:



王 勇 男, 1974 年 9 月生于安徽省合肥市, 清华大学计算机系博士生, 主要研究方向为嵌入式操作系统, 实时通讯和服务质量控制.

张尧学 男, 1956 年 1 月生于湖南省常德市, 工学博士, 清华大学计算机系教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机网络, 包括网络路由器、网络协议工程、服务质量控制方法与网络操作系统等.