

无线接入系统的系统级建模及性能分析

方林波^{1,2}, 黄樟钦¹, 侯义斌¹, 王治强¹

(1. 北京工业大学 计算机学院, 北京 100124; 2. 第二炮兵工程学院, 西安 710025)

摘要: 为了分析 IEEE 802.11 协议中主要参数对无线接入系统性能的影响以及设计低成本的无线接入点 (access point, 简称为 AP), 按照复杂嵌入式系统的系统级设计流程, 在 AP 的软/硬件实现之前使用形式化建模语言 POOSL 建立了无线接入系统的抽象模型. 定量地分析了最小竞争窗口 (CW_{min}) 等参数对有效吞吐量和平均延时等性能指标的影响, 通过分析 CPU 利用率, 确定了合适的 CPU 处理速度. 结果表明: 在系统设计的早期阶段通过系统级建模及性能分析, 可以确定系统设计的关键参数.

关键词: 仿真; 性能分析; 嵌入式系统; 接入点

中图分类号: TP 391

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2009)02-0270-06

无线局域网 (wireless local area network, 简称 WLAN) 有 2 种基本布置方式: Ad Hoc 模式和 BSS 模式^[1]. 在 BSS 模式中, 无线接入点 (access point, 简称 AP) 和与其通信的移动主机组成有基础设施的基本服务集 (basic service set, 简称 BSS), 移动主机之间以及移动主机与有线网络之间通过 AP 进行通信. AP 在 WLAN 中为移动主机提供接入有线网络和管理移动主机的服务, 是 WLAN 的关键嵌入式设备. AP 的设计涉及硬件部分和软件部分以及功能因素和非功能因素等多个方面. 一方面需要实现 AP 的基本功能, 另一方面需要尽量降低系统设计成本, 即选取合适的硬件使得在满足系统需求的情况下达到成本最低. 系统级设计方法通过系统级建模和性能分析, 在系统软/硬件实现之前确定系统中关键部分的规格和参数, 从而缩短系统设计时间、降低设计成本. 系统级设计方法的核心是建模语言, 在软/硬件系统领域应用广泛的建模语言有 POOSL、SDL、SystemC、Esterel 及 ROOM 等. 其中, POOSL (parallel object-oriented specification language) 是一种非常高效的分析和评估工业级复杂系统的建模语言^[2], 能精确地描述系统的并发性、分布性、时间、通讯和功能特性, 已成功地建模分析了 Internet Router^[3] 和 Network Processor^[4] 等系统.

1 系统级设计方法

在文献[5]中提出了基于 POOSL 的嵌入式系统的系统级设计方法, 主要分为 3 个阶段. 第 1 阶段进行系统需求分析, 提出系统的概念与需求, 建立概念模型, 分析系统的关键属性, 提出需要回答的问题或测试的性能指标. 第 2 阶段建立可执行的行为模型, 对第 1 阶段建立的概念模型进行量化, 并利用 POOSL 语言及其建模工具建立可执行抽象模型, 根据模型的仿真执行分析系统的功能属性是否正确. 第 3 阶段在行为模型的基础上通过插入性能分析代码, 将行为模型扩展为可执行的性能分析模型, 根据性能分析模型的仿真执行, 对系统的性能指标进行定量分析, 从而确定系统的非功能属性是否满足系统需求.

2 POOSL 语言及其建模工具

POOSL 语言由数据类、进程类和聚类 3 部分组成. 其中, 数据类基于传统的面向对象语言 (如 C++)

收稿日期: 2007-09-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90407017), 北京市教育委员会科技发展计划重点项目资助项目 (KZ200510005006).

作者简介: 方林波 (1973-), 男, 四川营山县人, 博士生; 黄樟钦 (1965-), 男, 浙江绍兴人, 教授, 博士生导师.

的概念,用于描述进程类之间产生和交换的信息.进程类基于时间扩展的进程代数(CCS),能精确地描述系统的并行的、并发的、分布式的和实时的行为,进程之间通过信道上消息传送进行通讯.聚类用于建立进程类和其他聚类的层次化结构,适于描述系统的拓扑结构.

为了快速有效地建立 POOSL 模型和进行性能分析,荷兰 Eindhoven 大学开发了交互式建模工具 SHESim 和高速执行引擎 Rotalumis^[6],SHESim 能生成用 POOSL 语言描述系统的结构和功能行为的可执行抽象模型,它以可视化的方式建立和修改数据类、进程类及聚类. SHESim 在仿真执行的过程中能产生交互图,通过交互图可以分析进程之间的消息交互情况,并动态验证模型的正确性. Rotalumis 能快速仿真执行大型的工业级系统模型,从而迅速获取 SHESim 所建模型的性能分析结果.

3 无线接入系统的建模

按照复杂嵌入式系统的系统级设计流程,首先进行系统需求分析,提出影响系统性能的参数、系统规格和需要回答的问题.

3.1 系统需求分析

本文的建模场景是带有 AP 的 WLAN,AP 负责无线网络与有线网络的桥接,AP 与其通讯范围内的所有 STA 构成一个基本服务集. STA 通过 AP 进行相互之间的通信,STA 与有线服务器之间也通过 AP 进行通信. AP 与 STA 均使用 IEEE 802.11 协议进行通讯,IEEE 802.11 协议包括介质访问控制层(MAC)和物理层(PHY)的协议规范. WLAN 的性能指标包括有效吞吐量和平均延时等,影响这些性能指标的主要参数有最小竞争窗口(CW_{min})和活跃站点数等. 需要设计一个 AP,它的系统需求和规格说明为:1)传输有效吞吐量尽可能高,每个移动主机可用的有效带宽不低于 128 kb/s;2)AP 造成的系统延迟不能高于 2 ms;3)尽可能降低产品成本. 归纳起来,通过建模及性能分析,要回答 2 个问题:1)系统有效吞吐量和平均延时随 CW_{min} 的变化情况;2)为了设计满足需求的低成本 AP,CPU 的合适处理速度为多少.

3.2 系统级模型

根据 WLAN 的建模场景,应用自顶向下的建模思路,首先对系统的体系结构进行抽象. POOSL 提供了进程类和聚类对体系结构进行抽象,进程界面由端口组成,端口之间通过通信信道进行连接. 无线接入系统的体系结构抽象如图 1 所示,包括 3 个聚类:STA、AP 和 PC_Server. STA 与 AP 之间通过 Air_SAP 端口和无线信道 air_data 进行通信. AP 与 PC_Server 之间通过 Wire_SAP 端口和有线信道 wire_data 进行通信.

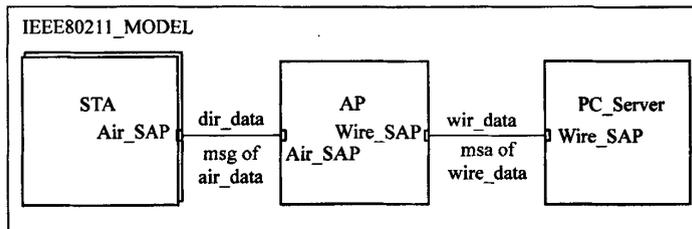


图 1 无线接入系统的体系结构抽象

Fig. 1 Architecture abstraction of wireless access system

AP 的 POOSL 抽象模型如图 2 所示,其中,IEEE80211 模块是聚类 IEEE80211 的实例,即 IEEE 802.11 协议的模型,它是 AP 和 STA 共有的模块,也是建模的重点. IEEE8023 模块是有线网络 802.3 协议进程类的实例,该模块的抽象程度较高,只对数据进行数据头的封装和接收/发送,信道容量设为 100 Mb/s,此模块在 PC_Service 中被重用. Distribution_Service 模块是从 AP 的 MAC 层中提取出来的,完成

无线数据帧到有线数据帧的转换和数据的分发功能. AP-Upper-Layer 模块是进程类 Upper-Layer 的实例,它是数据链路层以上的所有网络层的抽象,完成数据的发送和接收功能. Upper-Layer 进程类也在 STA 和 PC-Server 中使用. Net-Bridge 模块是网桥的抽象,完成有线网络和无线网络的桥接.

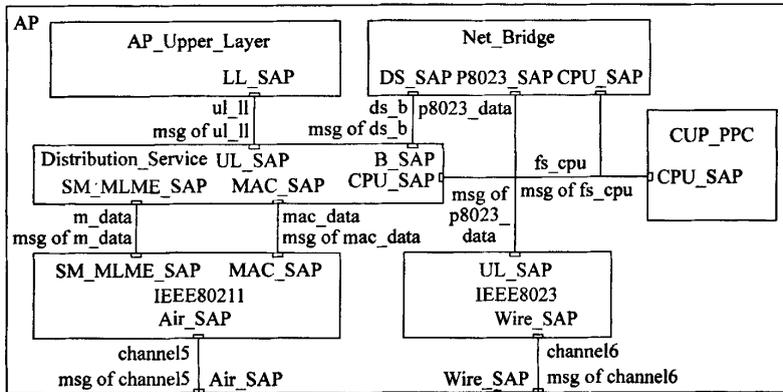


图 2 无线接入系统的 POOSL 抽象模型

Fig. 2 POOSL abstract model of wireless access point

为了清晰地阐述 IEEE 802.11 协议的 DCF 机制在模型中的实现过程,运用 UML 状态图和顺序图描述 IEEE 802.11 协议栈的 Protocol-Control、Transmission、Reception 和物理层 4 个核心模块. 然后,根据状态图和顺序图描述构建类图,进行数据单元的抽象和功能实体的抽象. 数据单元的抽象解决如何粗粒度地描述系统组件之间交互的数据,采用的原则是能准确无误地描述系统组件的功能行为,但又不增加系统建模的复杂性,只抽取与模型行为相关的基本数据段,省略与模型行为无关的数据段中按位编码的意义. 功能实体的抽象需要实现相应进程类和聚类的相应功能函数,并根据建模工具提供的调试功能,逐步修改和优化模型,最终完成模型.

3.3 模型验证

建立好模型后,需要验证该模型的正确性. 无线 AP 系统中的关键部分是 IEEE802.11 协议模块,作者从行为验证和理论值验证两方面对模型进行了验证,以确保模型的正确性. 行为验证目的是证实模型的运行符合 802.11 协议规范. 模型动态执行中产生的交互图可以直接提供各个进程之间的通信和消息传递情况,对于模型的行为验证非常方便. 图 3 是模型在基本方式下产生的部分交互图,从其退避过程和发送过程可以看出,协议模型的运行机制与协议标准是吻合的.

理论值验证是将模型的仿真结果跟数学推导值进行比较. 假设信道容量为 11 Mb/s,通过理论值分析(过程略),信道最大有效带宽在基本接入方式下为 9.40 Mb/s,RTS/CTS 方式下为 8.39 Mb/s. 模型在理想情况下测试的结果为:基本接入方式下有效带宽 9.396 Mb/s,RTS/CTS 方式下为 8.387 Mb/s. 可见,仿真结果与数学推导的理论值是一致的,进一步验证了模型的正确性.



图 3 基本接入方式的动态交互图

Fig. 3 Interaction diagram of basic access method

4 性能分析

在行为模型验证的基础上,在相关的进程类中加入性能分析类,进行性能指标的计算和精度判定,并将分析的结果输出到文件中.在性能指标的统计中采用 95% 的置信度.

主要分析了站点数、AP 的竞争窗口(minimum contention window, 简称 AP_CWmin)和 CPU 主频 3 个参数对系统的有效吞吐量、平均延时、CPU 利用率和 AP 处理延时 4 个性能指标的影响.其中,有效吞吐量指在饱和发送的情况下,所有移动主机在单位时间内成功接收的数据量之和,它是衡量无线网络性能好坏的最重要的指标.平均延时指从数据帧到达一个发送端网卡的空队列到数据帧被目的端成功接收的平均时间,它在实时网络应用中是一个非常重要的性能指标.CPU 利用率指单位时间内处理器的使用率,通过它可以分析系统需要的 CPU 处理速度.仿真执行的参数取值见表 1.

表 1 仿真执行的参数取值
Table 1 Simulation parameters

参数名称	含义说明	取值	参数名称	含义说明	取值
dot11LongRetryLimit	长重传上限	4	MaxBackoffStage	STA 最大退避阶数	5
dot11ShortRetryLimit	短重传上限	7	APMaxBackoffStage	AP 最大退避阶数	3
dot11RTSThreshold	RTS 门限值	2 347	PHYBandWidth	物理层信道带宽	11 Mb·s ⁻¹
MAXFrameSize	数据帧最大长度	2 312 字节	SIFS	短帧间间隔	10 μs
aCW _{min}	竞争窗口最小值	31	DIFS	DCF 帧间间隔	50 μs
aCW _{max}	竞争窗口最大值	1 023	SlotTime	退避时间槽	20 μs

4.1 有效吞吐量和平均延时

有效吞吐量和平均延时随 STA 站点数的变化如图 4 所示.

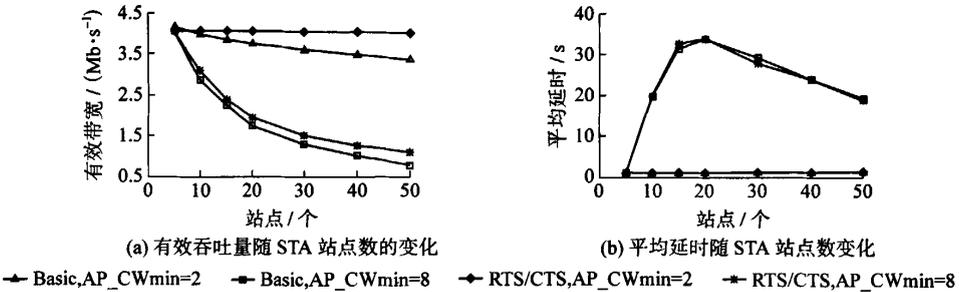


图 4 有效吞吐量和平均延时随 STA 站点数的变化曲线图
Fig. 4 Valid throughput and average delay versus number of stations

与在 Ad Hoc 网络的情况下的分析结果^[7]进行比较,可以得出:

- 1)有效吞吐量大约是 Ad Hoc 网络的 50%,主要原因是数据帧需要经过 AP 进行转发,即相当于经历了 2 跳才到达目的站点.
- 2)网络的性能与 AP_CW_{min}关系很大,AP_CW_{min}为 2 和 8 的情况下吞吐量与平均延时的相差都很大,随着 AP_CW_{min}的增大有效吞吐量呈急剧下降,与基本访问方式相比,RTS/CTS 方式的情况稍好一些.2 种方式的平均延时随站点数的变化情况基本一致.
- 3)随着 AP_CW_{min}的增大,AP 在无线信道中的竞争优势会减小,使得接收到的帧不能及时转送出去,在 AP 中越积越多,导致帧到达目的站点的延时比较大.

4.2 CPU 利用率

在对 CPU 硬件资源的建模过程,采用的建模方法基于 Y-Chart^[8], Y-Chart 方法的优点是可以将任务映射到多个结构上执行,通过性能分析确定最终实现的目标平台。

根据 Y-Chart 方法要求,需要确定系统任务、结构和映射,在分析中对各功能实体需要占用硬件资源的任务,采用了任务级粒度的描述,即划分为各个时长不同的任务,每个任务包括 2 个参数:任务标识,用于标识具体的任务名,以便计算处理器占用的时间、占用资源的时间,用需要占用的处理器周期数目描述(与处理器架构及其处理速度有关)。根据系统在运行时占用处理器资源的方式,将任务分为 4 种:1) readDataFromPort(从网卡中读取数据):当有数据帧到达网卡时,通过中断调用程序从网卡寄存器中将数据以字节为单位读取到 AP 的内存中;2) writeDataToPort(向网卡中写数据):以字节为单位将待发送数据帧写入网卡寄存器;3) swapFrameFormat(帧格式的转换):当有数据从无线网端口向有线发送时,需要将 802.11 协议帧转换成 802.3 协议帧,或做相反的转变。主要进行数据帧信头的构造和校验码的计算;4) searchDataInHashTable(网桥的哈希表查询):网桥中的数据库是以哈希表的方式存储的,当有数据帧到达一个端口时,网桥需要从数据库中查询该帧的目的地址,以确定从哪个端口发送出去。

PowerPC 体系结构是一种精简指令集计算机(reduced instruction set computer, 简称 RISC)体系结构。PowerPC 大部分指令都在一个单一的周期内执行,通常只执行一个单一的操作,如将数据从内存加载到寄存器,或者将寄存器数据存储到内存。对 CPU 利用率分析的关键是计算出执行每种任务所需要的时钟周期数,从 HostAP 源程序中提取出 4 种任务的相应代码,并将其编译成汇编语言代码,可以计算出每个任务的大概执行时间。通过计算,可以得出 4 种任务占用处理器时钟周期数分别为 35 017、35 017、20 000 及 5 000。

让 AP 满负荷工作,此时 AP 的吞吐量最大。假设无线局域网中只有 1 个 STA 进行满负荷的上行数据发送,其余 STA 不发送数据,以避免信道中有碰撞,使得有效带宽达到最大。AP 使用不同频率的处理器器的情况下,CPU 利用率和 AP 处理延时的仿真结果如图 5 所示。

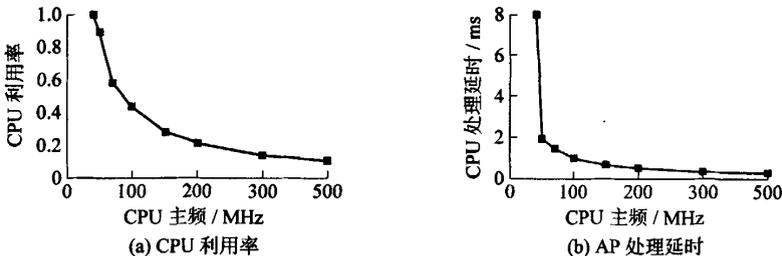


图 5 CPU 利用率和 AP 处理延时随处理器主频的变化曲线图

Fig. 5 CPU occupancy and AP process delay versus CPU operating frequency

根据图 5 中数据分析可以得出:

1) 在 AP 满负荷工作的情况下,当处理器的主频低于 50 MHz 时,CPU 利用率都是 100%,主频越大利用率也越低;

2) 当 CPU 的主频低于 50 MHz 时,AP 处理延时会急剧增加。造成这种现象的原因是处理器对帧的处理速率低于网卡的接收速率,如果持续饱和和工作则会导致丢帧;

3) 当 CPU 的主频为 80~100 MHz 时,CPU 利用率为 50% 左右比较合适,此时,AP 的处理延时只有 1~2 ms,符合系统需求。如果主频选得太大,则 CPU 利用率太低。例如,如果 CPU 主频选 300 MHz,则 CPU 利用率只有 30% 左右。

基于 Xilinx 公司的 ML310 FPGA 开发板搭建了无线 AP 的原型系统,将 CPU 主频设为 100 MHz,3 台无线移动端通过 AP 与有线服务器进行 FTP 传输,让 AP 满负荷工作,用 top 命令测试此时 CPU 利用率为 50%~60%,与本文的模型测试结果基本一致。

5 结束语

基于系统级设计方法,使用 POOSL 语言建立了无线接入系统的模型,在建立模型过程中,对协议进行了合理的抽象,并验证了模型的正确性.最后,通过模型仿真执行,分析了网络中无线站点数目、协议中竞争窗口大小对有效吞吐量和平均延时的影响.同时,根据分析结果,确定了低成本的 CPU 处理速度.可以看出,通过系统级建模和性能分析,在系统设计的早期阶段建立系统的可执行模型,对系统方案进行分析和评估,可以确定影响系统性能的关键设计参数,缩短系统的设计时间,降低开发成本.

参考文献:

- [1] GAST M S. 802.11 Wireless Networks; the Definitive Guide[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 7-17.
- [2] PUTTEN P H A, VOETEN J P M. Specification of reactive hardware/software systems[D]. Netherlands: Eindhoven University of Technology, 1997.
- [3] THEELEN B D, VOETEN J P M, BOKHOVEN L J V, et al. Performance modeling in the large: a case study[C]// Proceedings of the 13th European Simulation Symposium. Belgium: SCS-Europe, 2001: 174-181.
- [4] THEELEN B D, VOETEN J P M, KRAMER R D J. Performance modelling of a network processor using POOSL[J]. Journal of Computer Networks, 2003, 41(5): 667-684.
- [5] 方林波, 黄樟钦, 侯义斌, 等. 基于 POOSL 的系统级建模及性能分析[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(6): 650-655. FANG Lin-bo, HUANG Zhang-qin, HOU Yi-bin, et al. System-level modeling and performance analysis based on POOSL[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(6): 650-655. (in Chinese)
- [6] BOKHOVEN L J V. Constructive tool design for formal languages; from semantics to executing models[D]. Netherlands: Eindhoven University of Technology, 2002.
- [7] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3): 535-547.
- [8] HOON M M C M. Performance analysis of distributed real-time embedded systems[D]. Netherlands: Eindhoven University of Technology, 2005.

System-level Modeling and Performance Analysis of Wireless Access System

FANG Lin-bo^{1,2}, HUANG Zhang-qin¹, HOU Yi-bin¹, WANG Zhi-qiang¹

(1. College of Computer Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: The wireless access point (AP) is a key device in wireless LAN (local-area network), and its performance influences the data transmission quality strongly. To analyze the impacts of the main parameters in the IEEE 802.11 protocol on the wireless access system and design low-cost AP, an abstract model of wireless access system is built according to system design flow of complex embedded system before the hardware/software of AP is actually realized. Based on the simulation of the model, the influence of the parameter CW_{\min} (minimum contention window) on the performance metrics such as valid throughput and average frame delay were analyzed. The appropriate processing speed of CPU is also confirmed by analyzing the CPU occupancy. The results show that the key design parameters can be determined through system-level modeling and performance evaluation in the earliest design phases.

Key words: simulation; performance evaluation; embedded systems; access point

(责任编辑 刘 潇)