

基于 IEEE 802.3 标准的 MAC 在不同视角的 事务级建模研究

彭智聪, 陈 岚, 冯 燕, 马 娟
(中国科学院 微电子所 EDA 中心, 北京 100029)

摘 要: 以基于 IEEE 802.3 协议的媒体访问控制层(MAC)为研究对象, 讨论了事务级建模的方法. 基于 SystemC 和 TLM 2.0 协议, 建立了 MAC 在程序员视角(PV)和验证视角(VV)的模型, 并进行了验证. 通过分析 MAC 发送帧和接收帧的过程, 对比了不同视角事物级模型的建模精度和仿真速度.
关键词: 事务级建模; 程序员视角; 验证视角; MAC; IEEE 802.3; SystemC; TLM 2.0
中图分类号: TP31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7180(2017)07-0056-04

Transaction Level Modeling of IEEE802.3 MAC for Different Use Cases

PENG Zhi-cong, CHEN Lan, FENG Yan, MA Juan
(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In this paper, TLM methodology is studied for IEEE 802.3 MAC. Based on SystemC and TLM 2.0, two use cases, i. e., Programmer's View (PV) and Verification View (VV), are established. By analyzing frame transmission and reception of MAC(Media Access Controller), trade-offs between speed and accuracy of the TLM in different use cases are presented.
Key words: transaction level modeling; programmer's view; verification view; IEEE 802.3; MAC; systemC; TLM 2.0

1 引言

近年来, 研究人员和机构对 TLM 抽象层级和建模方法的关注越来越多. 开放 SystemC 联盟组织(OSCD) 利用 SystemC 进行系统级设计, 由于他们的关注点在软件开发上, 因而他们按照所需的时钟信息将 TLM 划分为程序员视角(PV)、附加时钟信息的程序员视角(PVT), 以及周期精确视角(CA)^[1-2]. 开放内核协议国际合作组织(OCP-IP) 出于对 SoC 集成方面的考虑, 将 TLM 按照模块间数据传输情况划分为三个层次, 分别为消息层、事物层和传输层^[3]. COWARE 公司为了整合这两个组织对事务级建模的定义, 根据应用场景对 TLM 划分如下: (1) 架构视角(AV), 用于架构探索; (2) 程序员视角(PV), 用于嵌入式软件设计; (3) 验证视角(VV), 用于周期精确的

系统的验证和软硬件协同验证^[4]. 因而, 设计人员需要根据不同的应用场合对模型细节进行不同层次的抽象^[5]. 对于不同的使用场景, 它们在建模精度和仿真速度上的要求完全不同. 通常来说, 高的仿真速度需要以牺牲建模精度为代价, 反过来也是. 因此, 对于在 SoC 流程中的不同环节, 采用合适的事务级建模层次可以很大程度上提高建模的效率, 同时也可以最大程度优化仿真时间.

本文从 PV 和 VV 两个视角建立了基于 IEEE 802.3 协议的 MAC 的事务级模型, 并对模型进行了验证.

2 基于 IEEE 802.3 标准的 MAC 简介

在 IEEE 802.3 标准中, 数据链路层包括逻辑链路控制(LLC)子层和媒体访问控制(MAC)子

层^[6]. MAC 位于 LLC 和物理层之间,采用了 CS-MA/CD(载波监听多路访问/冲突检测)的介质访问控制技术,遵循 IEEE 802.3 所定义的帧格式完成数据帧的封装、解封、发送和接收.图 1 描述了 MAC 的基本架构,它由以下几个部分构成:

- (1)帧发送 TX 模块和帧接收 RX 模块,这部分实现对发送帧的封装和对接收帧的解封;
- (2)控制模块,通过在全双工模式中插入控制帧实现数据流控制;
- (3)管理模块,提供基于 IEEE 802.3 标准的媒体独立接口,用来定义物理层和链路层的连接;
- (4)主机接口,通过总线将 MAC 与主机以及外部存储单元相连,同时需要配置寄存器和缓冲描述符.

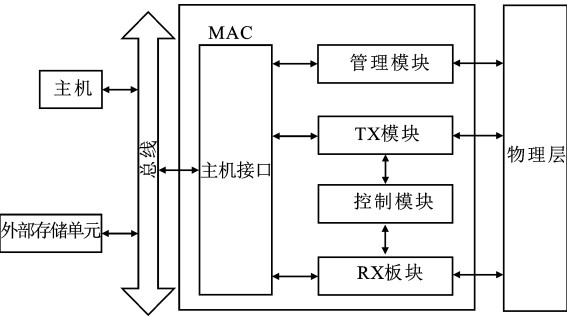


图 1 基于 IEEE 802.3 协议的 MAC 架构

3 MAC 的事务级建模

3.1 编程语言

MAC 的事务级建模基于 SystemC 和 TLM2.0 两个标准,它们均通过 c++ 编程实现. SystemC 是硬件和软件系统建模的语言,而 TLM2.0 是一个类库^[7],涵盖了建立 SystemC 模型和连接它们的方法.为了提高建模效率,我们使用了 Synopsys 公司开发的 SystemC 模型库,即 SCML1 和 SCML2,其中包含了数据通信时发起方和目标方的一些模型,它们能很恰当地被应用于对 MAC 的建模中.

3.2 事务级模型结构

MAC 的接口有三类:与主机通信、与外部存储单元交换数据和与物理层交换数据.如图 2 所示,定义 CTRL_IN 为目标套接字(target socket),用来访问寄存器和缓冲描述符,他们都有自己的回调函数(callback).一旦发生读或写的操作,会触发相应的 SystemC 事件或执行相应的回调函数. DATA_RXTX 作为发起套接字(initiator socket),在外部存储单元和 MAC 之间执行直接存储器存

取,实现缓存与外部存储器之间数据的交换.目标套接字和发起套接字都通过基于 TLM2.0 的通用载荷(generic payload)与总线交互.为了精确模拟内存映射的总线,通用载荷中嵌入了诸多属性,如指令、地址、数据和使能信号等.与物理层交互的部分由 6 个信号构成:MTXCLK 和 MRXCLK 都是从物理层输入的时钟信号,提供时钟信息给 TX 和 RX 模块;MTXD 和 MRXD 是 MAC 与物理层交换的数据;MTXEN 和 MRXDV 是定义有效帧起止的使能控制信号.

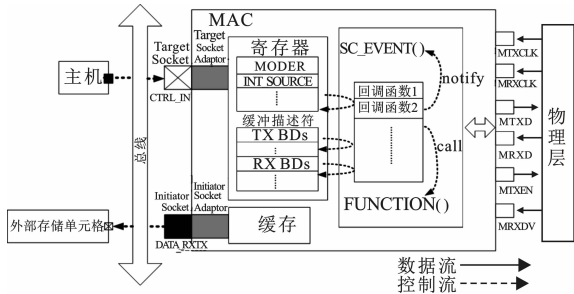


图 2 MAC 事务级建模的总体框图

3.3 事务级建模的方法

3.3.1 验证视角的模型设计

对于验证视角的模型而言,在接口之间进行的数据传输会在每个周期内进行.为了保证时间的同步性,我们引入了 SystemC 内嵌的进程变量 SC_THREAD,它可以在被挂起之后经过指定的时长或者某个事件的触发而继续运行.在数据发送阶段,使用了两个 SC_THREAD 进程变量,分别命名为 tx_do_it 和 send_frame.如图 3(a)所示,tx_do_it 运用一个无限循环体实现数据流控制和帧的产生.当对 MODER 寄存器的 TXEN 位进行写操作时,将进行帧的发送,调用 TXEN_callback 函数,触发 do_tx 事件,使得无限循环体 tx_do_it 从断点开始运行.当缓冲描述符的 READY 位被置 1 时,帧发送开始.如果在此期间 RX 模块接收到一个控制帧,变量 rec_control 会被标记,为了防止数据溢出,帧发送端将产生额外的延迟.如果 RX 模块没接收到控制帧,那么数据将从外部存储单元移动到内部缓存中,并且依据 IEEE 802.3 的格式进行帧的封装,这一过程通过 gen_frame 函数实现.当变量 send_begin 置 1 时,send_frame 进程将被使能,帧被拆分为高半字节和低半字节在每一个 MTXCLK 的上升沿发送到物理层.帧的发送通过 MTXD 接口进行.帧发送成功后,产生一个中断.

进程 data_store 将在 MRXCLK 的每一个上升

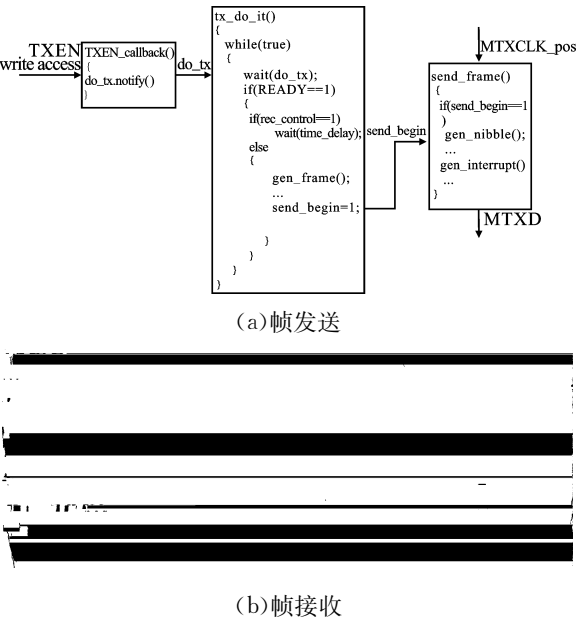


图 3 验证视角帧发送和帧接收的事物级模型

沿触发,当 MODER 寄存器中的 RXEN 位被置 1 时,将调用 RXEN_callback 函数,该函数将变量 flag_receive 标记为 1,随后 data_store 进程将 MRXD 接收到的半字节组装为字节流,并将它们存储于变量 rx_data 中.在 MRXDV 的下降沿,触发 receive_frame 事件. isdata 函数用来判断接收到的帧是否是数据帧,并分别按照数据帧和控制帧来进行处理.接收成功产生中断.接收帧的过程如图 3 (b)所示.

3.3.2 程序员视角的模型设计

程序员视角是寄存器精确级的,它将许多具体的实施细节抽象掉,只保留程序员在硬件子系统上的意图,而使低层次的软件驱动能够正确工作.与验证视角所不同的是,send_frame 进程不是在时钟沿被触发,而是被一个 systemC 事件 txevent 触发,如图 4(a)中所示.该事件所等待的时间长度与发送完一帧数据的时长相一致.也就是说,发送的数据帧越长,事件触发的时间越晚. send_frame 进程用来产生中断.

类似的,程序员视角中对 RX 模块的具体实施细节也都进行了抽象,如图 4(b)所示.模型中移除了用于将半字节组装成字节的进程,只保留了产生中断的 receive_frame 进程.

4 程序员视角模型(PV)与验证视角模型(VV)的对比

MAC 的程序员视角模型和验证视角模型在建模精度和仿真速度两方面进行了对比.其中,建模精

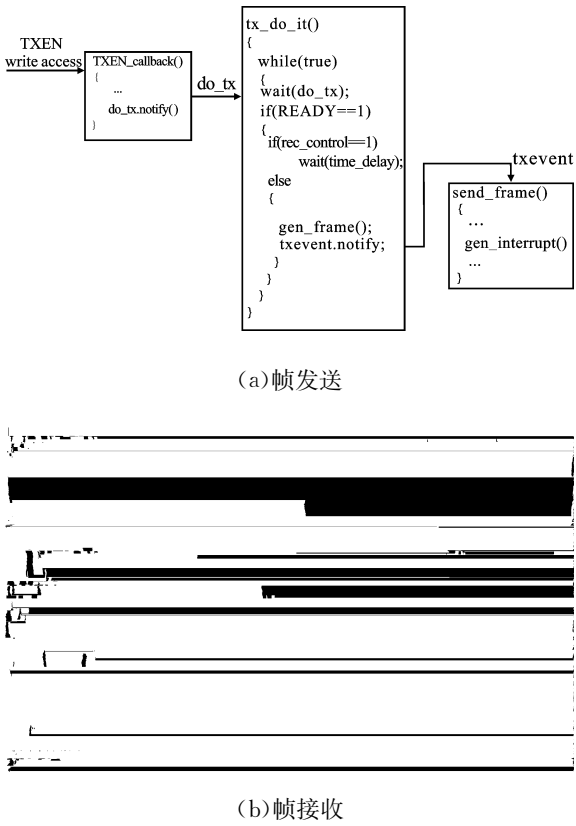


图 4 程序员视角帧发送和帧接收的事务级模型

度用功能完整性反映,而仿真速度由所花费的仿真时间来表示.为了获取不同大小数据包的影响,我们选取了 10 个长度在 80~1 280 个字节不等的数据帧进行传输.

4.1 建模精度

仿真结果从寄存器配置、控制和数据接口的值、进程的触发频率三方面进行考察.从图 5 可以看出,寄存器的值在 PV 和 VV 中是一致的,这表明这两个模型有相同的内存映射.控制接口 MTX-EN 和 MRXDV 的值在两种模型中相同,数据接口 MTXD 和 MRXD 的值在 PV 模型中没有获取,而在 VV 模型中有周期精确的值.另外, send_frame 进程在 VV 的每一个周期都被触发,而在 PV 中仅在每一个数据帧发送之后触发.表 1 呈现了两种模型仿真结果的差异,综上,VV 的建模精度比 PV 的高.

4.2 仿真速度

仿真速度通过对比两种模型所花费的仿真时间而得.由于仿真时间很大程度上取决于 CPU 的工作性能,为了消除随机误差,我们取 10 次仿真时间的平均值作为一次数据传输的仿真时间.对比帧发送和帧接收的仿真速度,并计算它们的比值,如图 6 所示.可见,PV 模型的仿真速度远远大于 VV 模

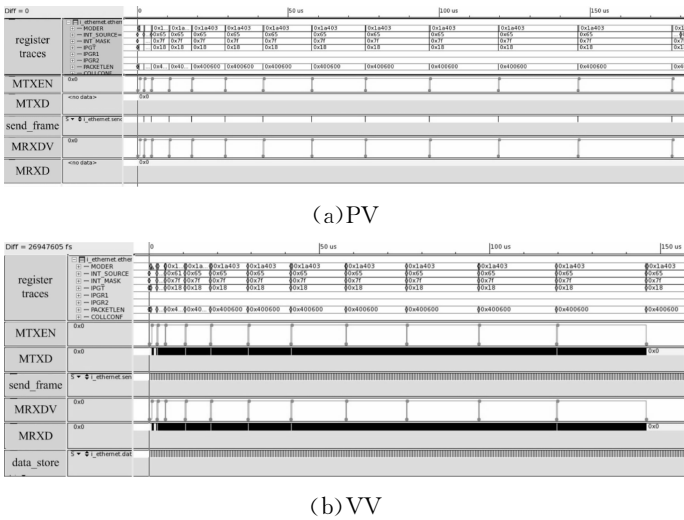


图 5 PV 和 VV 的仿真结果

型. 定量分析,以一个长为 1 280 个字节的帧为例,对于帧发送和帧接收,验证视角的仿真速度分别是程序员视角的 27 067 倍和 1 113 倍.

表 1 仿真精度对比

	PV 模型	VV 模型
寄存器配置	相同	
接口	MTXEN	相等
	MTXD	无
	MRXDV	相等
	MRXD	无
进程	send_frame	每一帧触发
	data_store	无

5 结束语

本文对基于 IEEE 802.3 协议的 MAC 进行了建模,从验证视角和程序员视角出发,分别进行了设计. 选取建模精度和仿真速度对 PV 模型和 VV 模型进行了比较,PV 模型有着更快的仿真速度,而 VV 模型有着更高的仿真精度. 根据对两种模型定量的分析,可以指导架构设计人员对事务级模型在不同应用场景下进行合理剪裁,从而大大提高建模效率,缩短 SOC 的上市时间.

参考文献:

[1] Bernstein A, Burton M, Ghenassia F. How to bridge the abstraction gap in system level modeling and design [C]// Computer Aided Design, 2004. ICCAD-2004. IEEE/ACM International Conference on, 2004. IEEE, 2004: 910-914.

[2] Schirner G, Domer R. Quantitative analysis of the

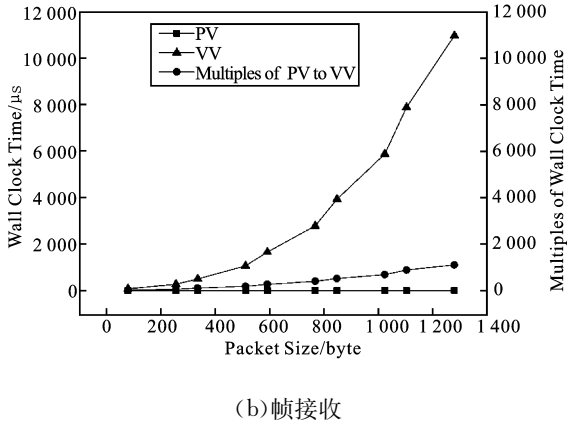
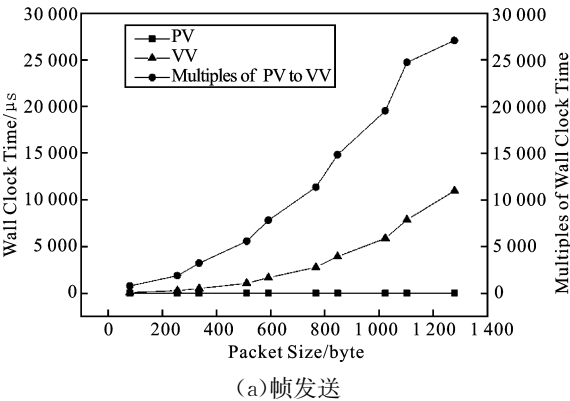


图 6 帧发送和帧接收的过程中 PV 模型和 VV 模型的仿真时间以及它们的比值

speed/accuracy trade-off in transaction level modeling [C]//Design, Automation and Test in Europe, 2006. IEEE, 2006: 1-6.

[3] Burton M. Transaction level modeling: A reflection on what TLM is and how TLMs may be classified[C]// Forum on Specification &. Design Languages, IEEE, 2007:92-97.

4.6 前向安全性和后向安全性

每一次密钥协商协议后,标签及服务器产生的密钥都是不同于前一次的随机值.由于 PUF 每次的响应是不可预测的,即使是合法的通信双方,即标签及服务器也不能预测下一次密钥协商时将要产生的密钥值.因此,该协议提供密钥的前向安全性和后向安全性.

5 结束语

本文提出两种基于 PUF 的密钥协商协议,通过该协议,通信双方,即标签和服务器能得到相同的随机密钥.只有合法的服务器才拥有标签的 ID 及标准的挑战响应对数据,从而结合 P 才能计算得到密钥 key' .由于标签内的 PUF 单元具有不可复制的特征,从而只有合法的标签才能产生与 key' 相等的密钥 key .该密钥可以用于后续的身份认证或安全通信.这两种协议能够有效防止物理攻击、重放攻击、假冒攻击、中间人攻击、离线猜测攻击及在线猜测攻击,同时提供前向安全性及后向安全性.

参考文献:

- [1] Godor G, Giczi N, Lmre S. Elliptic curve cryptography based mutual authentication protocol for low computational capacity RFID systems-performance analysis by simulations[C]// 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010:650-657.
- [2] 张兴, 韩冬, 曹光辉, 等. 基于 PRESENT 算法的 RFID 安全认证协议[J]. 通信学报, 2015, 36(增刊 1):65-74.
- [3] Samyde D, Skorobogatov S, Anderson R, et al. On a new way to read data from memory[C]// International

IEEE Security in Storage Workshop. IEEE, 2002: 65-69.

- [4] Lim D, Lee J W. Extracting secret keys from integrated circuits[J]. IEEE Transactions on VLSI Systems, 2005, 13(10), 1200-1205.
- [5] Tuyls P, Schrijen G, Skoric B. Read-proof hardware from protective coatings [M]. Springer, 2006, 369-383.
- [6] Gassend B, Clarke D, Van Dijk M, et al. Silicon physical random functions [C]// Acm Conference on Computer and Communications Security. ACM, 2002: 148-160.
- [7] Holcomb D E, Burleson W P, Fu K. Initial SRAM state as a fingerprint and source of true random numbers for RFID tags [C]// Proceedings of the Conference on RFID Security. IEEE, 2007: 11-13.
- [8] Kumar S, Guajardo J, Maes R, et al. The butterfly PUF protecting IP over every FPGA [C]// IEEE International Workshop on Hardware oriented Security and Trust. IEEE, 2008: 67-70.

作者简介:

郭丽敏 女, (1986-), 硕士, 工程师. 研究方向为集成电路设计开发. E-mail: guolimin@fms.h. com. cn.

刘 丹 男, (1981-), 硕士, 工程师. 研究方向为集成电路设计开发.

王立辉 男, (1982-), 硕士, 工程师. 研究方向为集成电路设计开发.

单伟君 男, (1988-), 硕士, 工程师. 研究方向为集成电路设计开发.

李 清 女, (1968-), 硕士, 高级工程师. 研究方向为集成电路设计开发.

(上接第 59 页)

- [4] Huss S A. Advances in design and specification languages for embedded systems[M]. Dordrecht: Springer, 2007.
- [5] Khaligh R, Radetzki M. Efficient and extensible transaction level modeling based on an object oriented Model of Bus Transactions[J]. Embedded System Design: Topics, Techniques and Trends, 2007, 231: 313-324.
- [6] IEEE. Carrier sense multiple access with collision detection(CSMA/CD) access method and physical layer specifications[Z]. New York: IEEE, 2005.
- [7] Glasser M, Bergeron J. TLM-2. 0 in SystemVerilog

[EB/OL]. [2016-03-08]. http://events.dvcon.org/2011/proceedings/papers/04_2.pdf.

作者简介:

彭智聪 女, (1988-), 助理研究员. 研究方向为虚拟原型验证. E-mail: brenda123456@yeah. net.

陈 岚 女, (1968-), 研究员, 博士生导师. 研究方向为超深亚微米芯片设计方法学及计算机体系结构.

冯 燕 女, (1980-), 博士研究生, 助理研究员. 研究方向为 SoC 设计与验证、IP 核标准与共性技术.

马 娟 女, (1988-), 工程师. 研究方向为虚拟原型验证.