

一种基于 SystemC 的片上网络建模与仿真方法

李烨挺¹, 梁利平²

(1 清华大学 微电子研究所, 北京 100084; 2 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 随着芯片上集成度的提高, 设计复杂性和时钟同步的问题也越来越严重, 因此, 面向通讯为中心的片上网络(NoC)将成为未来片上互连的主要方式. 由此建立了一种可对路由内部单元细化配置的片上网络模拟器. 采用分组数据的虫孔(Wormhole)交换策略, 使用仿真速度较快的 SystemC 事务级语言搭建了片上网络模型. 同时提出了一种较为精确的仿真方法, 模拟结果显示能适用于多核结构的片上网络的模拟仿真.

关键词: 片上网络; SystemC; 路由器; 建模; 随机仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)03-0078-05

An NoC Modeling and Simulating Method with SystemC

LI Ye-ting¹, LIANG Li-ping²

(1 Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2 Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: As the increase of chip density, design complexity problem and clock synchronization problem are more and more serious. Therefore, network-on-chip will become a popular way for on-chip interconnects. In this paper, we build up an NoC simulator, in which the inner module of the router could be detailed configured. The NoC model uses worm-hole switch strategy and is built by SystemC transaction level language that has faster simulating speed. In addition, we proposes a more accurate simulating method. The result of the simulation shows that the model can be used in the simulation of NoC for multi-core structure.

Key words: network-on-chip; SystemC; router; modeling; stochastic simulating

1 引言

工艺的发展和应用需求的提升使得在片内集合更多的核已成为必要, 基于通信的片上网络互连方式, 正在逐步替代传统的受到全局时钟约束的总线互连方式^[1].

SystemC 作为一种功能全面、快速的语言比传统的 RTL 语言在建模方面具有更大的优势. 目前, 国外基于 SystemC 的设计方法已用于片上网络体系结构的系统级建模中^[2-3]. 不过这些设计方法主要针对框架级的搭建, 没有细化到各个模块内部参数. 文中提出了一种具有对路由内部单元可细化配置能力的片上网络 SystemC 模拟器, 针对路由器内部的模块参数化, 对之后的 RTL 设计以及路由器结

构和算法的选择具有参照性作用. 此外, 文中还提出了一种通过消除起始和收尾误差的较精确的片上网络性能仿真方法.

2 网络参数和元件概述

2.1 主要网络参数

片上网络的一种重要设计方法就是通信和计算的正交分离, 因此可以通过一定的接口使得计算平台(DSP、CPU 或者其他 IP 等)和网络元件(路由器、网络接口等)分开设计, 提高了设计速度和系统的可扩展性、可兼容性. 即便如此, 网络元件中的设计参数纷繁复杂, 诸如拓扑结构、交换策略、路由方法、流控方式、仲裁分配方法及服务质量(QoS)等, 任何一种参数变化都能改变整个网络诸如延时和吞吐率等

性能,因此要穷尽各种参数得出最好的设计,其工作量几乎是无穷的.借助于国外已经建立的大量对于不同参数的通信元件模型,需要建立一个框架使得能够方便的根据不同的参数构建网络,就能实现加速设计和模拟.

从交换策略上看,传统交换网络的交换方式主要有电路交换和包交换两大类,由于包交换的高效性,现代交换网络大多数采用包交换的方式.包交换主要包括存储-转发、虚拟-直通和虫孔交换的方式,考虑到片上网络的存储单元少,容易并行传输和延时要求高的特点,因此选择需要最少存储单元和平均效率最高的虫孔交换方式作为模型的基础.

虫孔模型大大减少了路由器内部存储单元的数目,因此可以稍加扩展组成虚拟通道(Virtual Channel)以减少网络堵塞的机率,提高传输效率.为此针对虚拟通道采用了目前比较有效和流行的基于信用量(Credit-based)的流控方法.

拓扑结构是网络的基本参数,本模拟器支持网格(Mesh)拓扑结构和环网(Torus)拓扑结构等.根据拓扑结构,通过相应设置虚拟通道有相应的路由方法,比如维序路由、最小自适应路由和平衡路由等.

仲裁分配算法包括最大匹配、iSLIP、轮转优先(Round-Robin)等.

与网络和路由器本身相关的参数还有构造网络直径、网络维数、路由器虚拟通道个数、路由计算、虚拟通道分配、交叉开关分配和交换各个流水级的延时、交叉开关输入和输出的加速比等参数.

2.2 路由器概述

本模拟器采用的较为常用的基于虫孔交换和虚拟通道^[4]的路由器,如图1所示,主要包括输入部分、输出部分和交换单元三大部分组成.

输入部分包括虚拟通道队列(Virtual Channel)、路由算法(Routing Algorithm)单元、虚拟通道标志位(Indicator)等模块.每个路由器有若干个输入物理通道,分别与相邻的路由器相连.每个输入路由通道包括了若干个虚拟通道队列以提高效率和预防死锁等现象发生.当相邻路由器的数据微片(Flit)从物理通道输入后,根据数据微片被分配的虚拟通道,将它放入相应的虚拟通道队列中,一般来说虚拟通道队列是一种类此先进先出存储器(FIFO)的模块.路由算法单元根据各个虚拟通道所存储数据包(Packet)的数据片头(Head Flit)所带的信息,确定该数据包路由方向及输出通道,路由算法可以是确定性路

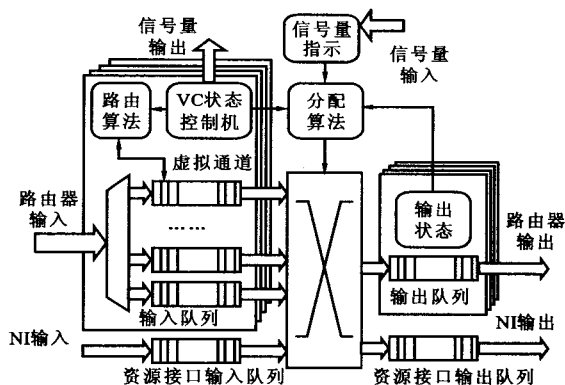


图1 路由器结构图

由,也可以是根据网络状况的自适应路由.虚拟通道标志位主要标志了每个虚拟通道的占用情况、空余存储空间、目前处于的状态等信息,一方面给交换部分中分配算法(Allocation Algorithm)模块提供信息,另一方面输出给相邻路由器置信信息.除了以上所述各模块外,输入部分还包括从资源向网络注入的数据队列及指示标志位,其基本功能和虚拟通道的队列及其标志位相似.

输出部分包括输出队列和输出指示位等模块.每个路由器有若干个输出物理通道,分别和相邻的路由器相连.各输出队列接受经过交换单元部分输出的数据,等待向相邻的路由器发送数据片;输出指示位带有各输出队列的空余存储信息或占用信息(此时相当于输出队列长度为1),为交换单元部分中的分配算法模块提供信息.除了上述各模块外,输出部分还包括从网络向资源输出的数据队列及其指示标志位,其基本功能和输出队列及其标志位相似.

交换单元部分主要包括接收虚拟通道标志位,交换分配算法和交换器等模块.接收虚拟通道标志位模块主要是根据置信输入的结果标志相邻各物理通道的各虚拟通道的空余存储空间和占用情况;交换分配算法根据上述信息以及输入部分的虚拟通道标志位信息和输出部分的输出标志位信息,将输入的数据微片合理地分配到输出队列上去,经常采用的方法有简单的两级仲裁分配和一些优化了的具有复杂功能的分配算法;交换器模块通常采用交叉开关(Crossbar)的方式对输入的数据交换至输出.

2.3 网络接口

网络接口用来连接路由器的资源接口和资源IP模块(如DSP、CPU等),主要分为与IP模块相关的接口部分和与其无关的通用接口.其主要的功能是将IP模块产生的专用数据转变为通用接口格式,将这数据分组打成包(packet),分割成微片(flit)格

式后发送给路由器,并将从路由器接收过来的微片聚集成包后,以通用格式将数据发送给 IP 模块。

3 模型框架的搭建

3.1 模型总体框架

本模拟器使用面向对象的设计方法,通过配置可以方便地对不同拓扑,不同路由器参数的片上网络进行建模并根据配置中的仿真参数控制数据的生成,最终进行仿真和性能评估^[4]。

该框架如图 2 所示,主要的输入是配置文件,它以一定的格式输入,其主要内容是路由器模块的参数、网络拓扑相关的参数和生成模拟数据的参数。当配置文件里的参数被片上网络的仿真程序读入后,该基于面向对象的程序会根据参数,用多态的方式对路由器模块和数据生成单元模块进行配置。其中,路由器模块根据路由模块参数对路由算法、仲裁方式和连接方式进行例化,而数据生成单元根据配置决定使用 DSP 模块模型、其他 IP 模块模型还是流量自动控制模块(实例中仿真使用的是流量自动控制模块)。最后根据网络参数将路由器和数据生成单元连接成所需网络,生成片上网络总体 SystemC 模型。通过对该模型仿真可以得到所需要的性能结果。

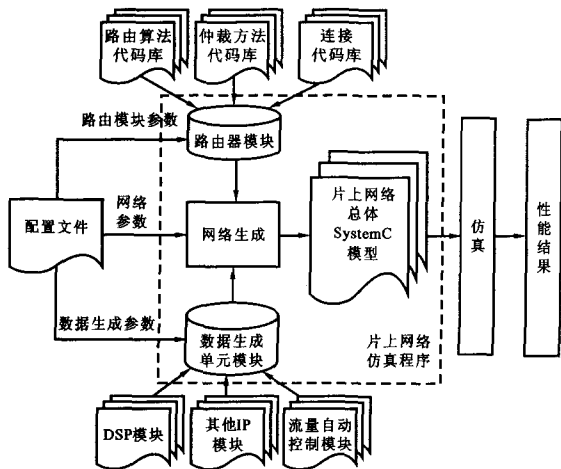


图 2 片上网络仿真模型基本框架

3.2 基于 SystemC 的模型

SystemC 语言是一种完成电子系统从软件到硬件全部建模的公开语言,能协同处理指令等软件在硬件模型上的模拟,它继承并扩展了 C++ 语言,支持面向对象的操作,对于可配置的网络来说具备继承、多态等可重构的方法,丰富的标准库有利于仿真和模拟。它的事务级模型仿真速度要比传统的 RTL 模块速度快 10 到 100 倍^[5],并具有从系统层到 RTL 层不同层次细化的能力,支持 Verilog 等 RTL

代码的接口,便于集成 IP,支持多种 EDA 工具,具备作为模拟平台的条件。国内外已经普遍使用 SystemC 来进行系统设计^[6]。

接口方法调用(Interface Method Call, IMC)。一组特定的通信方法(method)被称为接口(interface),包括数据接口和控制接口。通道(channel)是由一个或者多个接口来实现。模块能够使用它们的端口(port)与实现相应接口的通道进行互连。

在 SystemC 中,接口是一个 C++ 抽象类。它确定了一组在通道中实现的访问方法。但接口本身并不提供实现。通道是用于通信和同步的容器。通道实现一个或者多个接口。也就是说,通道必须继承一个或者多个接口,同时通道也可以连接两个或者多个模块。

本模拟器实现片上网络的方法如图 3 所示。流量操作单元控制数据生成(可以是实体的处理器核也可以是随机数据生成器,文中的实例使用后)模块产生对网络接口(NI)的读写操作,该操作通过端口调用 NI 通道定义的接口方法。同样的方法,NI 也能通过端口调用路由器网络通道定义的接口方法。最后,流量操作单元对返回的数据进行检测。这样,数据生成模块可以以调用接口方法的手段对网络进行操作,实现通信和计算的分离。

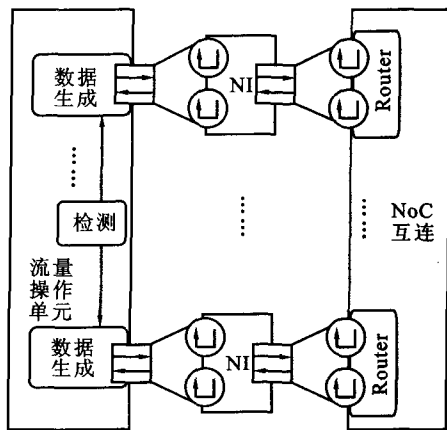


图 3 片上网络的 SystemC 实现

4 仿真方法和仿真结果

4.1 仿真方法

面向应用负载的仿真是对网络最精确的仿真方式,因此数据生成单元接入 DSP 核等 IP 并使其运行一定的指令,将能够精确地对网络的性能进行评估。这种方式开发 IP 核和编写指令的工作量很大,因此建立一种较为精确的测试的方法十分有必要。

在本模拟器中采用随机的数据生成方式对网络

性能进行评估,主要的生成数据参数包括注入过程(injection process),流量图(traffic pattern)和包的长度。

对于注入过程来说,采用网络测试中最普遍使用的伯努利(Bernoulli)过程即如果平均注入率为 r 个微片/单位时间,那么两个微片的平均间隔将为 $1/r$ 单位时间。

一般的流量图包括均匀分布(uniform)、邻近分布(neighbor)和转置分布(Transpose)等分布,与实际应用的流量图较为接近,比如经过优化的应用网络传输经常体现邻近分布的状态而快速傅立叶(FFT)往往使得网络呈现转置分布的流量。

包长度一般基于实际应用的负载的流量分布,在本模型中为某平均定长的正态分布。

另一方面,仿真过程对测试的精确度有一定影响,其主要原因是,在一定的注入率下,刚开始仿真阶段起始网络状态为空,而收尾阶段停止包的传输导致部分已经发送的数据未能接收。因此,本模型提出一种如图4所示的仿真过程,用来消除起始阶段和收尾阶段的误差,使得仿真较为精确。

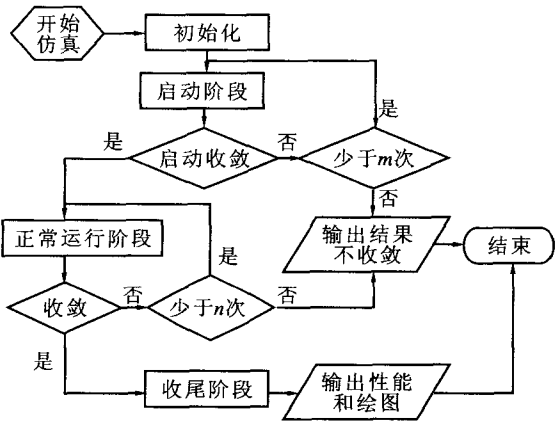


图4 片上网络仿真流程

如图4所示,整个仿真分为三个状态,其中若干个周期称为一个阶段。

(1) 启动状态(warm up):仿真的未稳定阶段,如果连续两个阶段之间的统计量误差不超过一定门限值 Δ_1 ,则启动收敛,进入正常运行阶段;否则仿真处在未稳定阶段,继续下一个启动阶段;如果超过一定次数(如图4中的 m)则仿真不收敛退出。

(2) 正常运行状态(run):该阶段启动延时和吞吐量的统计,注入的数据要打上标记,所有接收到的打上标记的数据计入延时的统计。如果连续两个阶段之间的统计量误差不超过一定门限值 Δ_2 三

次,则运行收敛,进入收尾阶段,停止吞吐量的统计;否则运行处于未稳定状态,如果执行阶段的次数大于一定的次数(如图4中的 n),则仿真不收敛退出。

(3) 收尾状态(drain):在收尾阶段,继续以原来的注入率注入数据,但注入的数据不再计入延时的统计,即不打上标记。在正常运行和收尾阶段接收到的打上标记的数据全部计入延时的统计,直到在正常运行阶段所有打上标记的数据全部接收到结束仿真。

4.2 仿真结果

利用上述模拟器,可以对不同参数下的片上网络进行性能的分析,包括包的平均延时、最大延时、平均吞吐率和最小吞吐率。性能结果可以由图示表示,也可以列出文字结果。

图5所示为不同包长下平均包的传输延时,一般来说,包长越长,延时增加,吞吐率降低,VC缓存数少时尤其明显。另外,长 packet 的串行延时较大也是一方面因素;但是由于VC流控的原因,对每个包处理有固定的延时,因此太小的包长(如长度为1个微片长度)反而导致平均延时的增加。

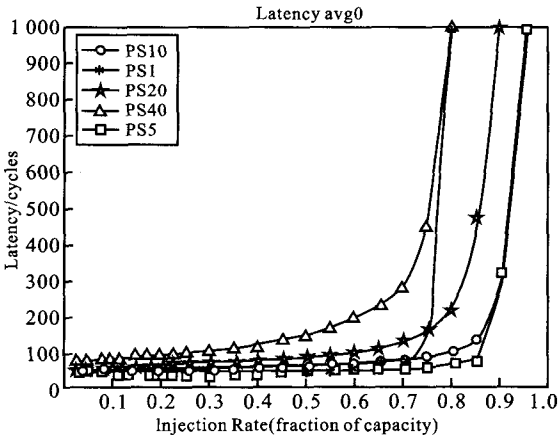


图5 不同包长下平均包的传输延时

图6所示为固定存储资源下不同VC数得到的最小吞吐率,可以看到尽管增加VC的个数能提高吞吐率,但消耗硬件资源,若固定存储资源,随VC的增加,每个VC内缓存数越来越小,反而会影响到效率,吞吐率反而会降低,在本次仿真中较为折衷的方案如4vc8buf和8vc4buf的方案得到的吞吐率最高。

由表1可得,维序路由(DIM)算法在平均(Uniform)流量图和相邻(Neighbor)流量图下,延时较小,吞吐率高;而最小自适应路由(MAD)在其他特殊流量图(如 Transpose)下体现出优势。

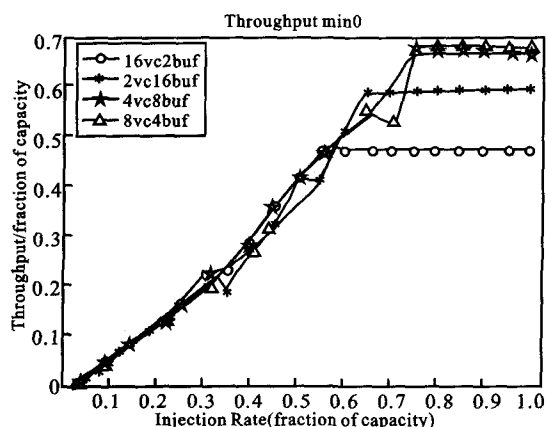


图 6 固定存储资源下不同 VC 数的最小吞吐率

表 1 不同路由方式在不同流量图下的吞吐率

归一化 吞吐率		流量图		
		Uniform	Neighbor	Transpose
路由 算法	DIM	0.8	1.9	0.2
	MAD	0.6	1.2	0.6
	ROMM	0.6	1.4	0.5

5 结束语

文中建立了一种基于 SystemC 的片上网络模型,主要采用的交换策略是基于虫孔交换,其特点是它具有可配置性,能对路由器参数、网络拓扑参数以及数据生成参数进行配置仿真。文中还提出一种较为精确的随机仿真流程,用来消除了启动阶段和收尾阶段的误差。仿真结果能够表明不同参数的片上

网络性能结果,为多核 DSP 等片上网络系统的仿真建立了基础。

参考文献:

- [1] Benini L, De Micheli G. Networks on chips: a new SoC paradigm [J]. Computer, 2002, 35(1): 70-781.
- [2] Coppola M. OCCN: a network-on-chip modeling and simulation framework[C]// Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition. France: Grenoble, 2004(3): 174-179.
- [3] Jalabert A. Xpipes compiler: a tool for instantiating application specific networks on chip[C]// Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition. France: Grenoble, 2004(2): 884-889.
- [4] 丁帅,吴宁,葛芬,等. 片上网络路由单元的系统级建模研究[J]. 微电子与计算机, 2009, 26(1): 93-96.
- [5] Caldari M. Transaction-level models for AMBA bus architecture using SystemC 2.0 [C]// Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition. Italy: Ancona University, 2003: 26-31.
- [6] 张宇昂,李丽,杨盛光,等. 基于 SystemC 的时钟周期精确交易级建模及通信细化[J]. 微电子与计算机, 2007, 24(12): 187-190.

作者简介:

李烨挺 男, (1983-), 硕士研究生. 研究方向为基于片上网络结构的多核 DSP 设计.

梁利平 男, (1969-), 博士, 研究员. 研究方向高性能数字信号处理器和高速混合信号集成电路设计技术.

(上接第 77 页)

- [3] Almgren M, Jonsson E. Using active learning in intrusion detection [C]// Proceedings of the 17th IEEE Symposium on Security Foundations Workshop. IEEE Computer Society Press. Sweden: Goteborg, 2004: 88-98.
- [4] Cristianini N, Shawe-Taylor J. 支持向量机导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [5] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer-verlag, 1999.
- [6] Tong S, Koller D. Support vector machine active learning with applications to text classification[J]. Machine learn-

ing research, 2001(2): 45-66.

- [7] Girolami M. Mercer kernel based clustering in feature space [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002, 13(3): 780-784.

作者简介:

黄双福 男, (1983-), 硕士研究生. 研究方向为网络安全、机器学习.

陈贤富 男, (1963-), 博士, 副教授. 研究方向为智能信息处理、信息安全.