

基于 SDM 的片上网络路由器设计

周培园,施慧彬,杨定定

(南京航空航天大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 介绍了片上网络虚电路交换技术中的 TDM 和 SDM 的路由器设计方案,指出 TDM 技术的不足,提出一种基于 SDM 交换技术的路由器设计方案. 相对于 TDM 路由器以及同类 SDM 路由器,比路由器设计复杂度较小,功耗和面积也不大.

关键词: 片上网络;虚电路交换;TDM;SDM;路由器

中图分类号: TP302

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)11-0018-05

Design of NoC Router Based on SDM

ZHOU Pei-yuan, SHI Hui-bin, YANG Ding-ding

(College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper mainly introduces the virtual circuit switching technology of the NoC. We discuss the structure of TDM router and the SDM router. We pointed out the deficiency of the TDM technology and gave a new design of a SDM NoC router. The performance evaluation results show the low complexity of our router. Our router brings less power and less area than TDM router and other SDM router.

Key words: NoC; SVC; TDM; SDM; router

1 引言

随着半导体集成电路发展,片上系统变得越来越复杂. 传统的基于总线的通信结构具有可扩展性不强、结构简单以及当 IP 核较多时布线比较复杂等缺点已经成为了系统性能的瓶颈,难以满足日益增长的片上系统内部通信需求^[1]. 2001 年,研究者们借鉴了计算机网络的思想,提出了片上网络这种全新的片上互联架构^[2]. 本文针对片上网络对吞吐量、延时、面积以及功耗等方面的性能要求,提出一种基于空分复用技术的片上网络路由器设计方案. 该路由器设计复杂度很小,并且具有较小的功耗与面积^[3-5].

2 TDM 与 SDM

2.1 TDM 与 SDM 交换技术

时分复用(Time Division Multiplexing, TDM)是虚电路交换技术实现比较著名的方式,在这种情

况下,时间被分为相同的时间段,在一个时间段之内,可用的带宽专门为一个给定虚拟电路服务,网络资源则在连续的时间内被不同的虚电路共享.

图 1 为基于时分复用的虚电路交换的网络结构图. 图 1 中,IP1 和 IP2 通过各自的网络接口连接到各自的路由器上,路由器 R1、R2 上除了连接网络接口的端口外还有其余四个端口连接到其余相邻的路由器上,R1 和 R2 之间有个 8 位的物理链路. 图中现了 A、B、C、D 四条虚电路分别需要的链路带宽,其中 A 需要一半的链路带宽,B 需要四分之一的链路带宽,C 和 D 分别需要八分之一的链路带宽. 假设基于 8 个时间段的分时复用进行数据通信,那么该链路在之间 4~7 这段时间专门为虚电路 A 服务,在 2~3 这段时间专门为虚电路 B 服务,在 1 这个时间段为虚电路 C 服务,在 0 这个时间段为虚电路 D 服务.

在空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)中,片上网络路由器之间的物理链路是用一

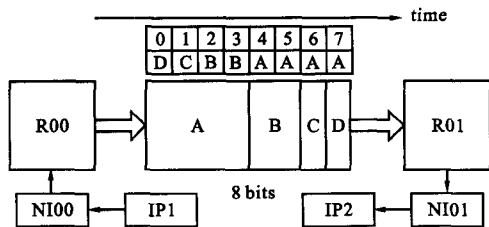


图1 TDM交换结构

组电线组成的,SDM只是将这组电线的一部分子集提供给特定的虚电路使用,通过对数据进行序列化,然后再在链路上传输.图2为SDM虚电路交换技术的示意图,配置与上图的TDM是一致的,R1和R2之间有八根电线,其中虚电路A分配了四根电线,虚电路B分配了两根电线,C和D分别分配了一根电线,各个虚电路的数据就在各自的物理链路上进行传输.

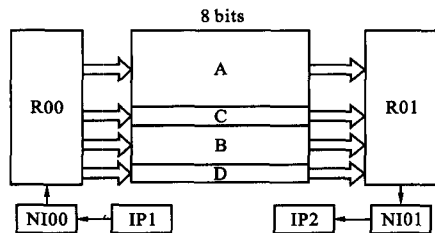


图2 SDM交换结构

2.2 TDM与SDM路由器对比

图3所示为TDM与SDM路由器结构对比,其中(a)为TDM的路由器示意图,一个 n 端口的TDM路由器由 $n \times n$ 的交叉开关组成和一个查找表组成,交叉开关用于连接路由器的输入与输出通道;查找表则基于路由算法,存储着交叉开关的配置信息.路由器运行过程中需要查找表来决定数据的输出端口,并且由于是分时使用的,所以也需要实时更新路由表的数据.

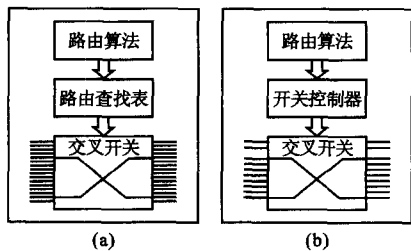


图3 TDM与SDM路由器结构图对比

TDM路由器需要实现链路的分时使用,需要不断修改路由配置,而且时间段的分配也十分严格,这些缺点成为制约TDM片上网络性能的主要因素.而且当网络拥挤时,即使带宽达到要求,也不能建立一条虚电路,所以只能采用最优路由算法,而这

将会增加电路延时和功耗.

SDM技术在虚电路的整个生命周期期间为该电路分配一部分物理链路,基于SDM与基于TDM的片上网络的路由器有很大的不同.SDM的路由器结构如图1(b)所示,路由器包含一个交叉开关和开关控制单元,其中交叉开关连接路由器输入输出端口,控制单元用于控制数据的传输.可以看出SDM结构的路由器没有路由表,而是通过开关控制器控制输出的.

虽然SDM路由器的交叉开关比TDM大,但与TDM技术相比,SDM技术中路由器的配置简单,对链路的分组没有要求,所以建立虚电路的建立时延较小,而且路由器的功耗和面积也比较小,很容易就在源节点和目的节点之间找到一个较短的路径.所以从全局的角度来看,SDM的性能远远高于TDM.

3 基于SDM多路路由器结构

在基于空分复用技术的片上网络中,路由器用于根据虚电路中分配的链路信息以及路由器的输入等信息完成数据在网络中的交换,路由器的设计很大程度上决定片上网络的性能.空分复用片上网络的路由器最核心的模块是路由仲裁器和交叉开关,仲裁器根据路由算法并通过交叉开关为数据选择输出端口.空分复用路由器中,输出链路被平均划分为若干组,文献[6]中提到了一种基于空分复用技术的路由器设计方法,文中的路由器一个输入对应多个输出,该路由器称为多路路由器.多路路由器是一种非常灵活的路由设计方法,每个输入可以利用对应的 n 个输出中的任意一个作为其输出链路.

图4为一个4路路由器的示意图,可以看出,对于一个输入链路,可以使用4个输出链路中的任意一个作为其输出端口.尽管多路路由器的设计灵活性很强,但正是由于这种灵活性却导致了仲裁器和交叉开关的设计复杂度非常的高,路由的配置也比较复杂,多路路由器交叉开关的设计复杂度达到了 $O(N^2)$,这就导致了路由器的面积和功耗非常大.

多路路由器还很有可能导致目的网络接口中接收的数据与源网络接口传过来的数据的顺序不一致.图5所示为一个4路路由器数据顺序出错的实例,该图中网络接口NI1通过R1,R2和R3这三个路由器及4个链路发送数据ABCD到NI2中,由于多路路由的灵活性,如果路由器一条链路不能使用,可以使用其余的3条链路.这就导致NI2中接收的数据顺序为ADBC,与数据的发送顺序不同.这就要

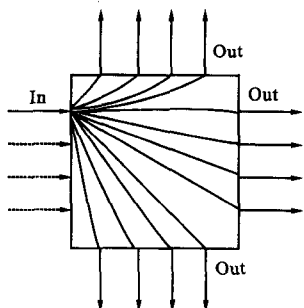


图 4 4 路路由结构图

求网络接口 NI2 中需要额外的功能模块对数据进行排序,额外地增加了网络接口的设计复杂度,影响了系统的性能。

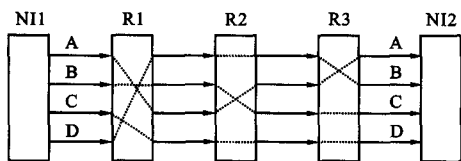


图 5 数据顺序出错

4 1 路路由器

鉴于多路路由器的交叉开关功耗和面积太大,数据接收和发送的顺序不一致的问题,本文在多路路由器的基础上进行改进,设计出具有低功耗、低面积并且不需要在网络接口中对数据进行重排序的 1 路路由器。

图 6 为本文所设计的路由器的结构示意图,每个路由器具有 5 个输入端口和 5 个输出端口,中间的路由器通过东 (East)、西 (West)、南 (South)、北 (North) 四个输入输出端口连接相邻的路由器,并通过一个本地 (Local) 输入输出端口连接一个本地网络接口。该路由器中一个输入链路只能对应一个输出链路,例如最中间的路由器在 East 方向有 8 个输入链路,每条链路的宽度为 1 位,这 8 条输入分别与 West、North、South 以及 Local 四个方向的 8 个输出链路对应。由于在虚电路交换技术中,在虚电路未释放之前不仅独占了路由器之间的链路,而且独占了路由器内部的交叉开关通信路径,而每条虚电路只使用路由器的一对输入输出,所以路由器的 8 个输入输出之间的关系可以采用交叉开关固定好。由于路由器输入输出链路的一一对应关系,交叉开关的设计变得更容易,例如具有 8 位输入的路由器的交叉开关的交叉点 (Cross-Point) 的数目也是 8 个,交叉开关的设计复杂度为 $O(N)$ 。相对于多路路由器交叉开关 $O(N^2)$ 设计复杂度来说,本文设计的 1 路路由器交叉开关的复杂度有了很大的降低,这

就使得路由器面积和功耗都比较低。除此之外,由于数据传输过程中的虚电路只占用路由器的一个输出,数据只在这条输出链路上传输,接受的数据与发送数据的顺序是保持一致的,这就不需要网络接口对数据进行重排序,从而降低了网络接口的设计复杂度。

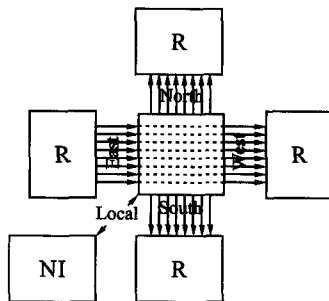


图 6 1 路路由器

图 7 为本文所设计的路由器的功能结构图,该路由器能够根据输入控制信息决定数据的输出方向以及输出链路。East、West、South、North、Local 分别表示路由器 5 个方向的输入,每个方向都连接一个仲裁模块 (Arbiter), 仲裁模块主要用于输出链路控制,决定数据的输出。在这些仲裁器中,连接 Local 的仲裁模块用于网络接口输入数据的仲裁,其余的仲裁模块连接相邻的路由器。Switch 表示交叉开关,用于连接路由器的输入链路 with 输出链路。

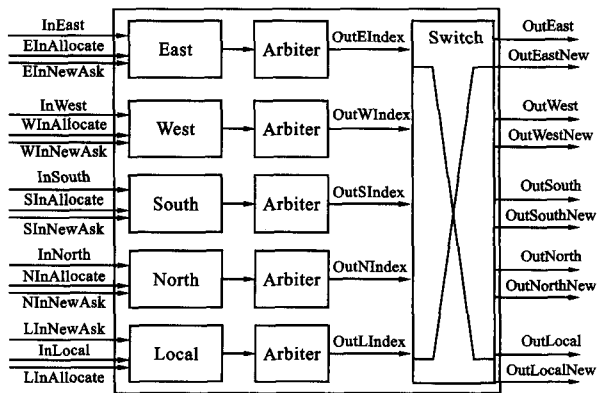


图 7 路由器的功能结构图

可以将路由器模块的端口信号分为以下几组。InEast、InWest、InNorth、InSouth 和 InLocal 为 8 位的输入信号,表示路由器五个方向的数据输入。EInAllocate、WInAllocate、SInAllocate、NInAllocate 和 LInAllocate 为 3 位输入信号,分别用于在路由器的 5 个输出方向判断数据的输入方向;数据输入方向采用 3 位二进制编码,‘001’表示 East 方向,‘010’表示 West 方向,‘011’表示 North 方向,‘100’表示 South 方向,‘101’表示 Local 方向。Out-

EIndex、OutWIndex、OutSIndex、OutNIndex 和 OutLIndex 为 4 位输入,表示路由器输出方向的链路分配情况;由于路由器有 8 个输出链路,而一条虚电路只使用其中的一条,就需要标明虚电路使用的是哪一条输出链路,用‘0001-1000’表示路由器的 8 个输出链路. OutEast、OutWest、OutSouth、Out-North 和 OutLocal 为路由器的各个方向个输出,该输出的值与输入的值是对应的.

5 握手协议及仲裁器

本文在路由器之间或者路由器与网络接口之间的数据传输过程中采用了请求与响应的一次握手协议. EInNewAsk、WInNewAsk、SInNewAsk、NIn-NewAsk 和 LInNewAsk 是路由器五个方向的数据请求信号,EOutNew、WOutNew、SOutNew、NOut-New 和 LOutNew 是路由器五个方向的响应信号. 当路由器准备发送数据时就向相邻的节点发送数据发送请求信号,接收节点收到数据接收请求信号后就发送响应信号给请求节点. 路由器之间数据传输的握手协议需要经过四个阶段,以 East 方向的握手协议为例,第一阶段数据发送方在 EInNewAsk 为低电平的时候将数据放到相应的输出链路上,并且设置 OutEastNew 为高电平;第二阶段数据接收方在 OutEastNew 为高电平的时候设置 EInNewAsk 为高电平,同时接收数据;第三阶段数据发送端发现 EInNewAsk 为高电平后,确认数据接收成功,就将 OutEastNew 设置为低电平;第四阶段数据接收端检测到 OutEastNew 为低电平时设置 EInNewAsk 为低电平,进入下一次传输.

路由器的 5 个输出方向都会有仲裁器,并且功能是一致的,本文设计的路由器是基于虚电路的,在数据传输之前虚电路已经建立起来了,这就意味着数据的传输路径已经确定. 所以仲裁模块不需要对数据的目的地址进行分析,只需要根据虚电路建立的信息完成数据交付.

图 8 所示为 East 输出方向的仲裁电路,仲裁器根据 EInAllocate 和 OutEIndex 的值确定输入与输出的对应关系. 首先,仲裁器根据 EInAllocate 的编码值来确定数据的输入方向,如果值为‘010’表明路由器 East 方向的输出数据来自 West 方向的输入,即 OutEast=InWest. 其次,仲裁器需要根据 Out-EIndex 确定输出数据的值,OutEIndex 表示 East 输出方向的链路分配;对于虚电路 A,如果 OutEIn-dex 的值为‘0001’表明虚电路使用的是路由器的第

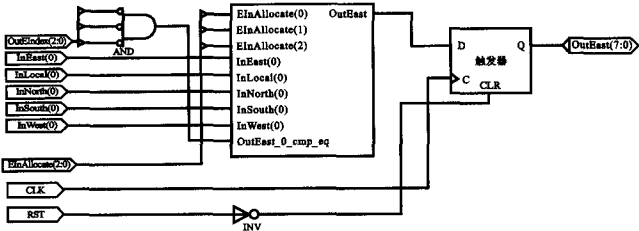


图 8 East 方向仲裁电路

一个输出,即 OutEast[0]=InWest[0].

在仲裁模块中需要通过查找交叉开关确定数据的输出链路,交叉开关实现了输入链路输出链路全互联. 交叉开关有多种实现方式,包括三态门实现的交叉开关和多路选择器实现的交叉开关. 本文考虑到路由器的面积和功耗,交叉开关的一个输入仅仅对应一个输出,采用多路选择器实现输入输出的数据选通. 交叉开关的结构如图 9 所示.

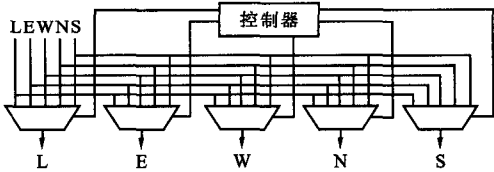


图 9 交叉开关结构图

交叉开关的输出端口选择主要是通过路由仲裁模块来实现的,当仲裁器接收到数据接收请求后就会向交换开关发出请求,交叉开关会根据仲裁器的选择向指定的输出通道发送数据,并返回响应信号.

6 性能评估

为了对不同的片上网络进行比较,提出了片上网络的性能评价标准,衡量片上网络设计的好坏主要看它的性能如何. 片上网络的芯片往往要求芯片在面积、占用的资源数目、功耗方面具有很好的优势. 本文主要从功耗、面积、FPGA 资源利用率对片上网络的性能进行评估,主要用到了 Xilinx 的 ISE、XPower 以及 Synplify 工具.

表 1 将本文设计片上网络与时分复用片上网络以及文献[6]中的空分复用片上网络的性能进行了对比.

表 1 性能对比			
性能参数	时分复用 ^[6]	空分复用 ^[6]	本文设计
面积/ μm^2	41 756	23 737	21 056
功耗/mW	325	301	199
交叉开关复杂度	$O(N^2)$	$O(N^2)$	$O(N)$
关键路径延时/ns	0.32	0.44	0.56

可以看出,空分复用片上网络的面积和功耗都

优于时分复用片上网络. 但是由于空分复用把路由器的物理链路进行了分组, 所以关键路径的延时要高于时分复用. 相对于文献[6]中的采用了多路路由器, 本文路由器的交叉开关的设计复杂度为 $O(N)$, 这就降低了片上网络的面积和功耗.

7 结束语

本文以虚电路交换技术为基础, 提出一种基于空分复用路由器的设计方案, 该路由器的设计相比文献[6]中来说具有较低的功耗与面积, 而且交叉开关的设计复杂度也非常小.

参考文献:

- [1] Srinivasan K, Chatha K, Konjevod G. Linear programming based techniques for synthesis of network on chip architectures[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2006, 14(4):407 - 420.
- [2] Zhou W B, Zhang Y, Mao Z G. An application specific NoC mapping for optimized delay [C]//DTIS 2006. Gammarth, Tunisia, IEEE, 2006:184- 188.
- [3] Kim D, Kim M, Sobelman G E. CDMA-based network on chip architecture[C]//Proc of Circuits and Systems. Minnesota: University of Minnesota, 2004:137-140.
- [4] Kees Goossens, John Dielissen, Andrei Radulescu. A ethereal network on chip: concepts, architectures, and implementations[J]. IEEE Design and Test of Computers, 2005, 22(5):414-421.
- [5] Matteo Monchiero, Gianluca Palermo, Cristina Silvano, et al. Efficient synchronization for embedded on-chip multiprocessors[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2006, 14(10):1049-1062.
- [6] Anthony Leroy, Dragomir Mилоjevic, Diederik Verkest, et al. Concepts and implementation of spatial division multiplexing for guaranteed throughput in network on chip[J]. IEEE Transactions on Computers, 2008, 57(9):1182-1195.

作者简介:

周培园 男, (1987-), 硕士研究生. 研究方向为计算机系统结构.

施慧彬 男, (1965-), 博士, 副教授. 研究方向为计算机系统结构、可重构计算、SoPC 设计、编译技术等.

杨定定 女, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为计算机系统结构.

(上接第 17 页)

参考文献:

- [1] Fridrich J, Soukal D, Lukas J. Detection of copy-move forgery in digital images[C]//Proc. of Digital Forensic Research Workshop, IEEE Computer Society. Washington, 2003:55-61.
- [2] Cao Y, Gao T, Fan L, et al. A robust detection algorithm for region duplication in digital images [J]. International Journal of Digital Content Technology and its Applications, 2011, 5(6):95-103.
- [3] Kang X, Wei S. Identifying tampered regions using singular value decomposition in digital image forensics [C]// Proc. of International Conference on Computer Science and Software Engineering, CSSE. Wuhan: Wuhan University, 2008(3):926-930.
- [4] Amerini I, Ballan L, Caldelli R. A SIFT-based forensic method for copy-move attack detection and transformation recovery[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2011, 6(3): 1099-1110.
- [5] Huang H, Guo W, Zhang Y. Detection of copy-move forgery in digital images using sift algorithm[C]//Proc. of Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application, PACIIA. Wuhan, 2008(2):272-276.
- [6] Xu B, Wang J, Liu G, et al. Image copy-move forgery detection based on SURF[C]// Proc. of International Conference on Multimedia Information Networking and Security, MINES. Nanjing, 2010:889-892.
- [7] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[C]//Proc. of the 4th Alvey Vision Conference. Manchester, 1988:147-151.
- [8] 王俊文, 刘光杰, 张湛, 等. 图像区域复制篡改快速鲁棒取证[J]. 自动化学报, 2009, 35(12):1488-1495.

作者简介:



赵洁 男, (1984-), 博士研究生, 讲师. 研究方向为数字取证与图像处理.