

基于带分复用和多时钟的 3D NoC 测试规划路由设计

许川佩, 郭 荣

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 为高效解决基于带分复用和多时钟策略下的 3D NoC 测试规划问题, 本文对 3D NoC 测试规划中的路由进行设计. 结合 NoC 结构特点, 设计数据传输格式, 采用多播技术的 XYZ 路由策略, 设计了基于该策略的资源冲突等待机制. 以国际标准测试集 ITC'02 中的电路作为仿真对象, 在功耗和带宽限制下, 采用基于改进粒子群算法的带分复用和多时钟策略的 3D NoC 测试规划对设计的路由进行验证, 证明了路由的正确性和有效性.

关键词: 三维片上网络; 带分复用; 多时钟; 路由策略; 测试规划

中图分类号: TP311.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)12-0044-06

Routing Design for Test Scheduling of 3D NoC Based Bandwidth Division Multiplexing and Multi-Clock

XU Chuan-pei, GUO Rong

(School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Routing strategy is designed in this paper to solve the problem of 3D NoC test Scheduling based Bandwidth Division Multiplexing and Multi-Clock efficiently. The format of data packet is designed based on the characteristics of 3D NoC, the XYZ routing strategy with multicast technology is used, and the resource collision waiting mechanism is designed in this paper. We take the circuit in international standard test set ITC'02 as the experimental object, under the dual constraint of power consumption and bandwidth, the test scheduling of 3D NoC based improved particle swarm optimization (PSO) algorithm with bandwidth division multiplexing and multi-clock strategy is used to verify the correctness and effectiveness of the routing we designed.

Key words: three-dimensional network on chip; multiplexing with multiple clocks; multi-clock; routing strategy; test scheduling

1 引言

片上网络(Network-on-Chip, NoC)的产生弥补了片上系统(System on Chip, SoC)由于其共享总线架构导致通信效率明显降低的缺陷. 然而, 随着被测核数量大幅度增加使得 NoC 中 IP 核的测试愈加困难. 因此, 提出一种高效的测试方法是目前 NoC 研究领域亟待解决的问题之一.

针对 NoC 测试过程中需要高效地进行数据传输以及对核自身进行测试两大问题, CotaÉ 等人^[1-2]和许川佩等人^[3]分别提出以重用 NoC 作为 TAM

和基于重用 NoC 作为 TAM 的带分复用策略来提高测试效率. Gallagher P 等人^[4]和 Hu C 等人^[5]均针对核的高效测试问题设计了相应的时钟方案和测试策略以提高测试效率.

采用带分复用策略可以大幅度提高测试效率, 但需要研究如何在片上网络中实现. 传统物理网络的数据传输格式是将 IP 数据包封装在数据帧中, 这种数据传输格式由于需要通信设备的 MAC 地址而不适用于片上网络.

本文在功耗等约束条件下, 针对采用改进的粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)算法的三

维 NoC 测试规划,根据片上网络的通信过程,结合 NoC 结构特点,设计了适用于多时钟和带分复用测试策略的数据传输格式,实现数据的路由。以国际标准测试集 ITC'02 中的电路作为仿真对象进行测试策略验证和路由验证。

2 3D NoC 测试规划

2.1 3D NoC 测试规划问题描述

3D NoC 主要由资源节点(IP 核)、路由节点(R)、资源网络接口(RNI)和通信链路(包括水平方向的互连线 and 垂直方向的 TSV)四部分构成^[3]。

本文针对 3D mesh 结构 NoC,给定一系列系统参数与核的参数: n 个核, B 条 TAM,每条 TAM 带宽为 32,拓扑结构,路由算法、一系列的时钟频率 CLK,系统最大功耗限制 $P_{\max}$,每个核的位置,功耗,数据包等。

结合基于重用 NoC 作为 TAM 的动态带分复用策略,在测试矢量已知和测试端口限制下,以功耗和带宽作为约束,解决如下问题:

(1) 根据实际数据包传输过程,对多数据包传输格式进行重新设计,对路由策略和资源冲突问题进行研究;

(2) 根据功耗与时间的比例确定核的时钟分配,分析多时钟策略的实现过程;

(3) 采用基于改进 PSO 算法的 3D NoC 测试规划验证本文所提出的路由策略。

2.2 3D NoC 资源核的测试策略

(1) 并行测试和动态带分复用策略

NoC 采用支持大量数据传输的分组交换通信技术,为多数据包的并行传输提供了有利条件。本文基于重用 NoC 作为 TAM,采用动态带分复用策略实施并行测试,以此提高测试效率^[3]。

(2) 路由策略

根据 NoC 实际通信过程,测试规划不仅仅包含数据包传输位置和传输顺序,还需考虑到数据包的传输格式和路由方式。由于传统物理网络与片上网络结构上的不同,NoC 通信过程的数据包格式和路由方式必须重新设计以更好地适用于片上网络。

本文结合 NoC 结构特点,设计了数据包传输格式,采用 XYZ 路由算法,并在此基础上引入多播技术来对多数据包进行传输,有效实施并行测试,缩短测试时间。

(3) 多时钟策略

当数据包被路由到被测核之后,即需展开对资

源核的测试。鉴于 3D NoC 全局异步-局部同步的通信机制,再根据核测试功耗与测试时钟成正比,测试时间与测试时钟成反比,本文采用多时钟策略对 IP 核进行测试。通过给不同的核分配不同的测试时钟,来改变核的测试时间,最终目的是在功耗允许的范围内缩短核的测试时间,进而减少整体测试规划时间。

2.3 测试规划数学模型

(1) 目标函数

测试规划以测试时间作为目标函数,系统耗费的总测试时间取决于所有 TAM 测试时间的最大值,本测试规划的最终目标是最小化系统总测试时间。测试时间函数如式(1)、式(2)所示:

$$T = \min \left\{ \max_{1 \leq i \leq B} \left(\sum_{j=1}^{N_c} (T_{t_{i,j}} + T_{w_{i,j}}) \cdot t_{i,j} \right) \right\} \quad (1)$$

$$t_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{当核 } j \text{ 被分配到 TAM}_i \text{ 上} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

式中: N_c 为待测 IP 核的总数; B 为 TAM 条数; $T_{w_{i,j}}$ 表示在当前测试节点处由于路径冲突或功耗过大时的空闲等待时间; $T_{t_{i,j}}$ 为核 j 分配到 TAM _{i} 上测试所需的时间,由该核测试所消耗的时间 $T_{\text{core } j}$ 和该核的测试数据包的传输时间 $T_{\text{pass } j}$ 组成,即: $T_{t_{i,j}} = T_{\text{core } j} + T_{\text{pass } j}$ 。

每一个核的测试时间可以由 BFD 算法^[6] 计算得到。 $T_{\text{pass } j}$ 计算公式见文献[3]。

(2) 约束函数

① 功耗约束

考虑到 3D NoC 每层的功耗不同,本文实施总功耗和层功耗双重约束。总功耗约束条件要求所有在测核的总功耗不超过系统的总额定功耗,层功耗约束条件要求在 3D NoC 结构中同一层的所有在测核的测试功耗不超过该层的额定功耗。

② 带宽约束

在任一时序,带宽约束条件要求当前 TAM 上和当前时序下的所有在测核的测试数据包总带宽不超过该 TAM 的最大带宽。

功耗约束函数和带宽约束函数均与文献[7]一致。

2.4 基于改进粒子群算法的 3D NoC 测试规划实现

基于前文所述的 3D NoC 资源核的测试策略和测试规划数学模型,本文采用改进粒子群算法对 NoC 进行测试规划。

本文采用二维编码矩阵实现 IP 核的测试数据

分配和测试顺序调度,将测试规划问题转换为对粒子寻优问题.假设 3D NoC 的规模为 $M \times N \times L$,有 n 个待测 IP 核, B 条 TAM. $\mathbf{X}$ 表示测试数据的 TAM 分配矩阵; $\mathbf{S}$ 表示每条 TAM 上的测试数据传输顺序矩阵;实数矩阵 $\mathbf{TS}$, $\mathbf{TE}$ 分别记录每个 IP 核的测试起始时间、结束时间.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{L1} & X_{L2} & \cdots & X_{Lm} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{B1} & S_{B2} & \cdots & S_{Bn} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{TS} = \begin{bmatrix} TS_{11} & TS_{12} & \cdots & TS_{1m} \\ TS_{21} & TS_{22} & \cdots & TS_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ TS_{Lm} & TS_{Lm} & \cdots & TS_{Lm} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{TE} = \begin{bmatrix} TE_{11} & TE_{12} & \cdots & TE_{1m} \\ TE_{21} & TE_{22} & \cdots & TE_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ TE_{Lm} & TE_{Lm} & \cdots & TE_{Lm} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{X}, \mathbf{S}, \mathbf{TS}, \mathbf{TE}$ 的说明均与文献[3]一致.

针对粒子群算法多样性差等缺陷,本文结合烟花算法^[8]和遗传算法^[9]对其进行改进.将改进后的粒子群算法应用于 3D NoC 测试规划问题,测试流程图如图 1 所示.

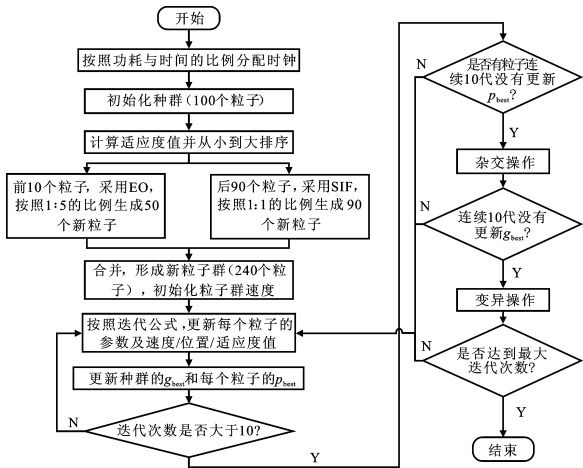


图 1 改进粒子群算法流程图

3 3D NoC 测试规划路由设计

要在 3D NoC 上实现测试规划并进行验证,需

考虑数据包在 NoC 通信过程中的传输格式(数据包格式)和传输方式(路由策略).由于 NoC 与传统物理网络结构上的不同,传统物理网络的数据传输格式和路由方式由于需要通信设备的 MAC 地址而不适用于片上网络.针对 NoC 通信,本文结合 NoC 结构特点,设计数据包进行数据传输,以提高通信效率,完成测试规划.

3.1 测试数据包格式设计

NoC 测试过程中的测试数据由外部测试设备 ATE 产生和接收,而测试数据的传输以消息形式实现,一个消息包含多个数据包,由于链路带宽限制,每个数据包被划分为若干 Flit. 鉴于 NoC 结构特点,每个核的数据包不能仅包含源/目的地址,还必须包含测试规划过程中需要的该核的其他物理信息,如核的编号,数据包序号及路由跳数等.

Flit 按照类型分为头 Flit, 数据 Flit 以及尾 Flit. 以头 Flit 为例,其格式设计如图 2 所示,做如下说明:

①DF 标志位表示该 Flit 所在的数据包是否是可拆分的,为 0,表示可拆分;若为 1,则该 Flit 代表的就是该核的所有数据. 只在每个数据包的头 Flit 标识.

②‘数据包#’和‘Flit#’则应对的是每个核的消息所包含的数据包的数量及 Flit 的数量.

③ Flit 类型,其标志位在每个 Flit 占两位,本文设定头 Flit 标识为 11,数据 Flit 标识为 10 或 01,尾 Flit 标识为 00.

④核的 id,数据包 id 及 Flit id 三者具有从属关系,分别表示了其所属的被测核,该被测核的某个数据包以及该数据包的某个 Flit.

⑤源地址 (X, Y, Z) 与目的地址 (X, Y, Z) 分别为数据包路由的起始位置和目的位置,跳数代表数据传输过程中数据包经由的路由数量. 对于每个核,ATE 所发送的数据包的数量是测试向量数量的两倍(一半用于测试矢量,另一半用于测试响应). 故,在数据包传输过程中,其源地址与目的地址以及跳数部分所携带的信息在测试前后是不一样的,并且,每经过一个路由器,其源/目的地址都是不一样的,可根据 XYZ 路由算法计算得到.

⑥负载部分记录的则是相关测试信息.

综上所述,由于属于同一数据包的数据包应具有相同的标识,结合图 2,上述的②③④⑤⑥是所有的 Flit 共有的部分,①则是头 Flit 所特有的. 当具有的尾标识的 Flit 到达目的地址后,核对最终的数据包

id 和 Flit id 是否与该 Flit 携带的数据包 # 和 Flit # 信息是否一致,若一致,则数据包传输完毕,否则触发报错。

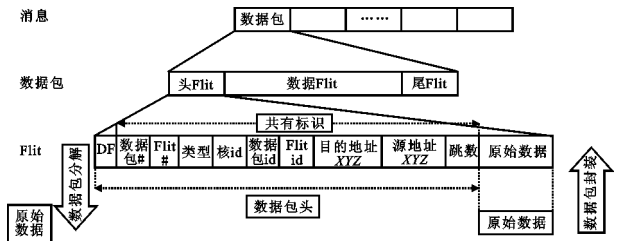


图 2 数据包格式

3.2 路由策略

NoC 测试过程中,当测试数据包通过输入端口并经由一个或多个 Router 存储转发之后,传输到与待测核相连的 Router 上,资源网络接口 RNI 将数据包头去掉之后,将原始数据交付 IP 核,即图 2 所示的数据包分解过程;测试完毕后,IP 核将测试响应交付 RNI,再由 RNI 将原始数据添加数据包头,封装成数据包递交给 Router,即图 2 所示的数据封装过程,最终经输出端口传输至 ATE。

由于每个 IP 核的数据包不止一个,基于本文所采用的带分复用策略,每条 TAM 同一时刻需要传输多个被测核的测试数据,因此,本文在 XYZ 路由算法的基础上引入多播路由技术.在多播路由过程中,根据 flit 中的起始地址和目的地址以及 XYZ 路由算法,将测试矢量或测试响应传输到相应的被测核或输出端口。

根据 2.1 节对 NoC 测试问题描述,本文在功耗和带宽约束下,采用带分复用策略,以非抢占式测试调度方式对被测核数据包进行传输,即某个核的数据包一旦开始传输就不得中断.故当多个核的测试数据并行传输时,不可避免的会遇到资源冲突问题.本文采用资源冲突等待机制来解决此问题.描述如下:

- ①并行测试调度时,寻找可用的 TAM,即某条 TAM 是空闲状态或可使用状态;
- ②基于步骤①,寻找分配到该条 TAM 的所有待测核;
- ③针对待测核,作如下约束判断:当前待测核的带宽总和不超过 TAM 带宽;满足总功耗和层功耗约束;在 XYZ 路由算法下,判断所需使用的路由资源是否与当前测试过程中所有在测核正使用的路径资源不冲突;
- ④依次对每个待测核做步骤③的条件判断,若

满足以上三个约束,对其进行测试和测试数据传输,并且在测试完成之后,释放其所占用的所有路径资源.否则,一直循环直到找到满足所有条件的待测核并遍历所有 TAM.

综上所述,针对 3D NoC 测试规划的路由策略,如图 3,以 $3 \times 2 \times 3$ 规模的 3D mesh 结构 NoC 为例,当按照 XYZ 路由算法对核 10 以及核 17 进行测试时,图中虚线椭圆圈出的路由器和通信链路是两个被测核的数据传输所需的共有资源.按照上述的路由策略和基于该策略的资源冲突等待机制,在通信过程中,核 10、核 17 的数据传输路径一旦冲突,则按照上述第 1 步骤,判断哪个核满足约束条件,满足约束条件的核的数据包被优先传输且一直占有资源直到传输完成。

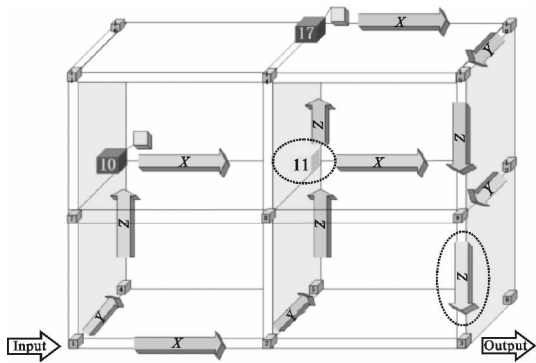


图 3 路由策略示意图

4 多时钟策略

在 3D NoC 测试过程中,当测试数据包被路由到与被测 IP 核相连的路由器之后,IP 核测试数据通过资源网络接口(RNI)与路由器进行交互.针对 IP 核自身测试过程,如何提高其测试效率也是一个研究重点。

文献[10]对核的测试时间与 TAM 带宽之间的关系进行了分析.由文献[10]可知,核的测试时间随 TAM 宽度的增加呈阶梯模式减少,当 TAM 宽度到达一定的值之后,核的测试时间不会再减少.此外,由于片上资源有限,TAM 宽度并不能无限制的增大.因此,仅从增加 TAM 带宽方面来考虑提高测试效率是行不通的.鉴于 3D NoC 全局异步-局部同步的通信机制,以及核的测试时间与测试时钟成反比,测试功耗与测试时钟成正比,本文采用多时钟策略对不同的 IP 核分配不同的测试时钟来提高测试效率。

4.1 多时钟策略数学模型

鉴于 3D NoC 全局异步-局部同步的通信机制,为高效地对核测试,在满足功耗约束的前提下,本文采用多时钟策略,对不同的 IP 核分配不同的测试时钟.

本文采用文献[5]提出的多时钟策略,时钟分配设计如下:

对于第 i 个核,假设其测试时间为 t_i ,测试功耗为 p_i ,设片上时钟频 f_T 是由振荡器^[4]产生的.根据 $p_i \propto f_T$ 以及 $t_i \propto 1/f_T$,为简化起见,设定待测核的时钟频率有两种选择 $\{f_T, 2f_T\}$. 当功耗与时间的比值 k_i 大于所有核 k_i 的均值 $\bar{k}$ 的一半时,对应的时钟频率为 f_T ,标志信号 $s = 0$; 否则为 $2f_T$,标志信号 $s = 1$. 具体表示如公式(3) ~ (5) 所示:

$$k_i = p_i/t_i \tag{3}$$

$$\bar{k} = \sum_i^n k_i/n \tag{4}$$

$$f_i = \begin{cases} f_T, & k_i > Md * \bar{k}, s = 0 \\ 2f_T, & \text{otherwise}, s = 1 \end{cases} \tag{5}$$

式中, n 是所有待测核的数量, f_i 代表对应的第 i 个核的时钟频率, M_d 是一个比例常数, 本文设为 0.5, s 为时钟标志信号.

4.2 多时钟实现过程

针对上述多时钟策略数学模型,本文设计了多时钟的实现过程. 主要在资源网络接口(RNI)中实现,即被测核与片上网络之间的时钟解耦在 RNI 中完成,通过 RNI 来确定并控制被测核的时钟频率. 图 4 为本文所设计的时钟控制流程:

(1)数据接收模块

接收模块中,当路由器将数据包转交给 FIFO 后,针对多时钟实现问题,片上时钟信号分为 2 路,一路继续保持 f_T 的频率,另一路经过二倍频电路生成 $2f_T$. 然后通过功率与时间计算单元得出标志信号 s . 将三路信号分别连接到二选一数据选择模块,若 $s = 1$,则通过 MUX 之后,核的测试时钟变成 $2f_T$; 若 $s = 0$,则继续保持以片上时钟 f_T 的频率对核进行测试.

(2)数据发送模块

发送模块中,当核的测试数据通过包生成器生成数据包交付路由器之前,通过一个时钟判断选择模块,若模块输出为 f_T ,则直接将数据包以 f_T 的频率交付路由器; 否则,若模块输出为 $2f_T$,则经过二分频电路,将时钟信号转换成片上时钟 f_T ,再将数

据包交付路由器.

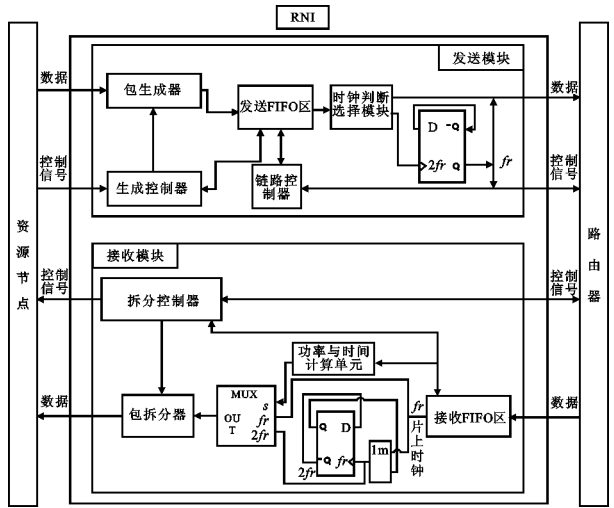


图 4 多时钟实现过程示意图

5 仿真实验结果及分析

本文实验环境为 Windows7 64 位操作系统, CPU 运行速度 2.50 GHz, 8 GB 内存, 采用 Microsoft Visual Studio 2013 编写程序. 采用 ITC' 02 SOC Test Benchmarks 中的 d695, g1023, p93791 标准电路作为实验对象.

由于标准测试集中的 d695 电路相对于其他电路给出的信息更加全面,故本文采用将多个 d695 电路进行组合(2 * d695, 3 * d695, 4 * d695)来对大规模系统进行仿真实验,将各电路按层间测试时间和功耗相近原则映射到 4 * 4 * 3 的 3D NoC Mesh 结构中. 以 2 * d695 为例,核的位置分布如表 1 所示. 说明:其中 1-9 表示第一个 d695 电路的第 9 个核; 2-8 表示第二个 d695 电路的第 8 个核.

表 1 核的分布情况

基准电路	层次结构	核的位置
2 * d695	第 1 层	{1-9, 1-8, 1-5, 1-2, 2-9, 2-8, 2-5, 2-2}
	第 2 层	{1-3, 1-6, 1-7, 2-3, 2-6, 2-7}
	第 3 层	{1-10, 1-4, 1-1, 2-10, 2-4, 2-1}

实验设定 TAM 固定带宽为 32, 每个核的测试数据传输带宽及相应的测试时间均采用文献[3]的数据.

(1)路由设计实施验证

为验证本文设计的路由的正确性和有效性,在 3 条 TAM 下,以 2 * d695 电路为例,采用基于改进粒子群算法的带分复用和多时钟策略的 3D NoC 测试规划对设计的路由进行验证. 图 5 展示的是 50%

功耗约束下的其中一种测试划结果.

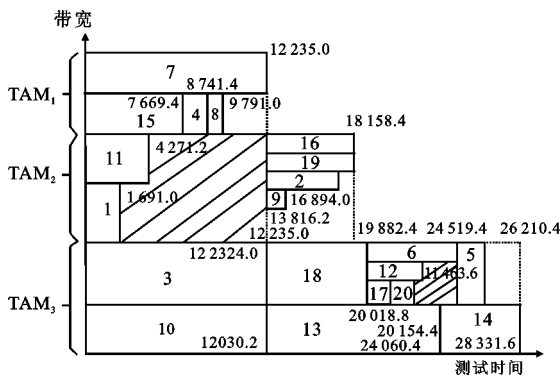


图 5 测试规划下的路由验证结果(2 * d695 电路)

由图 5 可知,图中横坐标代表 IP 核的测试时间,可以看出每条 TAM 传输的所有 IP 核的测试开始时间和结束时间,纵坐标表示不同的 TAM 及带宽.在基于改进粒子群算法的带分复用和多时钟策略的 3D NoC 测试规划下,被分配到 TAM₁ 上的核 7、15 的数据包以并行方式按照本文采用的融合多播技术的 XYZ 路由策略被路由,到达目的地后完成测试,当核 15 测试完之后,核 4、8 的数据包在满足约束条件的情况下相继被路由,可以发现 TAM₁ 测试过程中没有因为资源冲突问题而造成的测试等待过程.对于 TAM₂ 和 TAM₃,可以看到当核 11、1 并行测试完成之后,由于资源冲突,被分配到 TAM₂ 上的核 16、19、2、9 的数据包必须等到该段测试资源释放之后才能被路由;同理,当 TAM₃ 上的核 12、17、20 的数据包传输完成之后,由于核 6 还在占用该段测试资源,因此核 5 的测试数据包必须等到核 6 数据包路由完成之后才能开始传输.

(2)基于路由策略和多时钟策略的测试规划结果

基于本文设计的路由策略,并结合基于改进粒子群算法的带分复用和多时钟策略,对 3D NoC 进行测试规划,规划结果如表 2 所示.

表 2 带分复用与多时钟策略下的测试规划结果

基准 电路	测试时间 (50%功耗约束)		测试时间 (30%功耗约束)	
	是否加入多时钟策略		是否加入多时钟策略	
	否	是	否	是
d695	13 589.4	11 754.8	14 747.8	12 169.2
g1023	22 625.4	17 776.8	28 525.4	21 247.8
P93791	486 358.0	361 352.0	517 424.0	364 784.0
2 * d695	28 331.6	16 121.4	30 407.8	19 722.0
3 * d695	44 014.0	25 279.0	46 659.4	31 802.0
4 * d695	59 457.8	34 169.8	60 727.8	41 746.2

按照本文设计的路由策略,并由表 2 加入多时

钟前后的测试时间的对比可知,采用基于改进粒子群算法的融合多时钟的带分复用策略的 3D NoC 测试规划时间明显比未加入多时钟策略的测试时间要小,且随着被测核数量的增加,其优化效果更加明显.原因如下:鉴于片上网络的全局异步-局部同步通信机制,在功耗限制下,当某些核的测试时钟比片上时钟快时,其测试时间相比于原来使用片上时钟的测试时间会缩短,随着被测核数量的增加,使用快时钟的核的数量也相应增加,随着片上网络规模越来越大以及大量 IP 核自身的测试时间的减少,对整体片上网络的测试时间的影响也会随之增大.由此可以看出,针对 3D NoC 的测试规划问题,测试规划结果证明了本文设计的路由策略是正确的、有效的.

6 结束语

本文对 3D NoC 测试规划过程中数据包的路由展开研究.针对传统数据包格式不适用于片上网络这一问题,本文将传统的数据包格式在结合 NoC 结构特点的基础上进行改进,使之能够更好的适用于片上网络通信;针对 NoC 测试过程中的多数据包传输路径问题和资源冲突问题,本文采用 XYZ 路由算法并引入多播技术,并设计了资源冲突等待机制,使得多数据包路由过程中能够有序、有效地进行传输.选取 ITC'02 标准电路验证本文设计路由的正确性和有效性.实验结果表明,本文设计的路由对于 3D NoC 的测试规划问题是有效的,并且在路由策略下,基于改进粒子群算法的带分复用和多时钟策略的 3D NoC 测试规划时间明显减少.

参考文献:

[1] Cota É, Liu C. Constraint-Driven test scheduling for NoC-based systems[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2006, 25(11): 2465-2478.

[2] Cota É, Carro L, Wagner F. Power-aware NoC reuse on the testing of core-based systems[C]//International Test Conference Proceedings. Sophia Antipolis, France, 2003: 612-621.

[3] 许川佩, 刘洋, 莫伟. 带分复用的三维片上网络测试规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 35(9): 2120-2128.

[4] Gallagher P, Chickermane V, Gregor S. A building block BIST methodology for SOC designs: a case study[C]//International Test Conference Proceedings. New York: IEEE, 2001: 111-120.

retical Computing and Communication Technology, Tumkuru, Karnataka, India, IEEE, 2017:469-473.

[5] Salvador Gonzalez, Victor Ramos. A delay tolerant broadcast protocol for VANETs [C]//International Conference on Broadcast Technology and Multimedia Communication[s.l.]. 2010.

[6] Qi W, Song Q, Wang X, et al. Trajectory data mining-based routing in DTN-enabled vehicular Ad Hoc networks[J]. IEEE Access, 2017 (99):24128-24138.

[7] Rashid S, Ayub Q, Abdullah A H. Reactive weight based buffer management policy for DTN routing protocols[J]. Wireless Personal Communications, 2015, 80(3): 993-1010.

[8] Sati S, Probst C, Graffi K. Implementing forward and drop policies for improving PROPHET's routing per-

formance[C]// International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks. Chengdu, China, IEEE, 2017:236-242.

作者简介:

段宗涛 男,(1977-),博士,教授. 研究方向为服务计算、交通信息处理与泛在交通信息服务.

杨 阳 男,(1993-),硕士研究生. 研究方向为交通信息通信技术.

樊 娜 女,(1978-),博士,副教授. 研究方向为无线传感器网络安全技术.

朱依水(通讯作者) 女,(1981-),博士,讲师. 研究方向为交通信息服务技术. E-mail:yszhu@chd.edu.cn.

(上接第 49 页)

[5] Cong H, Zhi L, Chuanpei X. Test scheduling for network-on-chip using XY-direction connected subgraph partition and multiple test clocks[J]. Journal of Electronic Testing,2016,32(1): 31-42.

[6] Iyengar V, Chakrabarty K, Marinissen E J. Test wrapper and test access mechanism CO-Optimization for system-on-chip[J]. Journal of Electronic Testing, 2002,18(2): 213-230.

[7] 许川佩, 李克梅. 基于粒子群算法的多约束 3DNoC 协同测试规划[J]. 仪器仪表学报,2017,38(3): 765-772.

[8] 谭营, 郑少秋. 烟花算法研究进展[J]. 智能系统学报, 2014,8(5): 515-528.

[9] 王勇臻, 陈燕, 于莹莹. 求解多旅行商问题的改进分组遗传算法[J]. 电子与信息学报,2017,17(1): 198-205.

[10] Ahn J H, Kang S. Test scheduling of NoC - based SoCs using multiple test clocks [J]. ETRI Journal, 2006,28(4): 475-485.

作者简介:

许川佩 女,(1968-),博士,教授. 研究方向为集成电路测试、自动测试总线与系统.

郭 荣(通讯作者) 女,(1993-),硕士研究生. 研究方向为集成电路测试. E-mail:guorong_chn@163.com.