

基于内建自测技术的 Mesh 结构 NoC 无虚通道容错路由算法

姚 磊², 蔡觉平¹, 李 赞², 张海林², 王韶力²

(1. 宽带隙半导体国家重点实验室, 陕西西安 710071;

2. 西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 在 Zhang's 算法绕行思想的基础上, 提出了一种 2D-Mesh 结构片上网络无虚通道容错路由算法, 用于解决多故障节点情况下片上网络的无虚通道容错路由问题. 算法利用内建自测试机制获取故障区域的位置信息, 通过优化绕行策略来均衡故障区域周围链路的负载并减少部分数据的绕行距离. 针对 8×8 的 2D-Mesh 网络的仿真表明, 与 Chen's 算法相比, 在故障区域大小为 2×2 , 网络时延为 70 cycles 的情况下, 随着故障区域位置的变化所提算法可提高 1.2% 到 4.8% 的网络注入率. 且随着故障区域面积的扩大, 所提算法在减少通信时延, 提高网络吞吐量方面的作用更为明显.

关键词: 容错; 片上网络; 虚通道; 内建自测

中图分类号: TP302

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2012) 05-0983-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.05.019

A Fault-Tolerant Routing Algorithm Based on BIST for 2D-Mesh Network-on-Chip without Using Virtual Channels

YAO Lei², CAI Jue-ping¹, LI Zan², ZHANG Hai-lin², WANG Shao-Li²

(1. Wide Bandgap Semiconductor Technology Disciplines State Key Laboratory, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. State Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: To solve fault-tolerant problem in 2D-Mesh Network-on-Chip (NoC) with more than one fault node, a novel fault-tolerant routing algorithm without virtual channels is proposed on the basis of Zhang's algorithm. The algorithm use Built-in Self Test (BIST) mechanism to get fault nodes' location information. Then, by optimizing the fault-tolerant strategy, the traffic loads on the boundaries of fault region can be balanced and the transmission distance of the packets routing around the faults is shortened. Simulation results in 8×8 2D-Mesh NoC show that, as the change of fault block in position, the proposed algorithm can improve network injection rate by 1.2% to 4.8% compared to Chen's algorithm when the fault region is 2×2 , network latency is 70 cycles. Moreover, with the increase in area of the fault region, proposed algorithm provides a better performance in reducing communication latency and increasing network throughput.

Key words: fault tolerance; network-on-chip (NoC); virtual channels; built-in self test (BIST)

1 引言

在深亚微米和纳米工艺下, 由于串扰、耦合、电磁干扰等因素导致的软错误以及由电转移、生产工艺和测试挑战等引发的电路老化导致的永久错误使得 NoC 芯片的可靠性降低^[1,2]. 具有容错能力的 NoC 路由算法能够有效降低 NoC 对软错误和永久错误的敏感性, 进而提

高芯片的成品率, 减少制造成本, 成为当前研究的热点技术之一. NoC 容错路由算法可分为两类: 使用虚通道技术的路由算法^[3,4]和无虚通道的路由算法^[5~7]. 使用虚通道技术的路由算法虽然可以解决片上网络的容错和死锁问题, 但是虚通道技术的引入使得 NoC 路由节点复杂度上升, 芯片成本和功耗随之增加. 文献[8]研究表明使用虚通道技术后的路由节点所需的逻辑门数目

增加了 1 到 2 倍,建立时延增加了将近 1 倍,因此无虚通道路由算法更适用于对功耗、成本要求较严格的 NoC 芯片中。

Chen 在文献[5]中提出一种 Mesh 结构 NoC 多故障节点无虚通道容错路由算法(简称为 Chen's 算法),R Holsmark 在文献[6]中对其进行了完善.该算法将数据分为 Row-First, Column-First, Row-only 三种类型来避免路由中形成死锁,遇到故障时按一定规则绕行通过. Chen's 算法存在绕行规律性不强,绕行环(链)路上负载较重的问题,严重影响了网络性能。

Z. Zhang 在文献[7]中提出了一种 2D-Mesh 结构 NoC 单故障节点的无虚通道容错算法(简称为 Zhang's 算法),该算法在无故障区域内使用 XY 路由算法,在绕过故障节点时通过禁止在绕行环路东北角的转弯来避免死锁. Zhang's 算法绕行规律性较强,算法复杂度低,但只适用于单个故障节点容错,且绕行环(链)路上负载较重。

针对这两种容错算法存在的问题,本文提出一种基于 BIST 技术的无虚通道容错算法,该算法结合 Zhang's 算法的故障绕行思想和 Chen's 算法中故障区域的概念,在 BIST 获取的故障区域信息的基础上通过

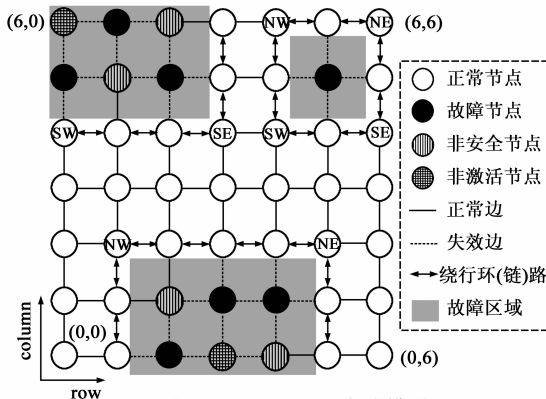


图1 2D-Mesh NoC容错模型

优化数据绕行策略来均衡故障区域周围链路负载,减少部分数据的绕行距离,具有绕行规律性强的特点和多故障容错的能力,可有效减少 NoC 通信时延,提高网络吞吐量.仿真结果证明了所提算法的有效性。

2 2D-mesh NoC 容错分析模型

2D-MeshNoC 的容错模型如图 1 所示,该模型由节点及连接边组成.节点分为正常节点,故障节点,非安全节点和非激活节点四种^[5]。

矩形故障区域周围的正常节点及正常节点间连接边构成的环路称之为绕行环路,其作用是为数据提供一条绕过故障区域的规则路径.当故障区域位于 2D-Mesh 网络的内部时,绕行环路为封闭的环. NE, NW, SE, SW 分别表示绕行环(链)路的东北、西北、东南、西南四个顶点. C, S 和 D 分别代表当前节点,源节点和目的节点。

数据到达绕行环(链)路后,根据 C, D 和绕行环(链)路的相对位置决定绕行方向.为了描述容错环(链)路的位置,引入参考节点的概念,取绕行环(链)路东北角上的节点为参考节点,绕行链路在网络的东北角时,参考节点为 Mesh 网络的顶点 NE,如图 2。

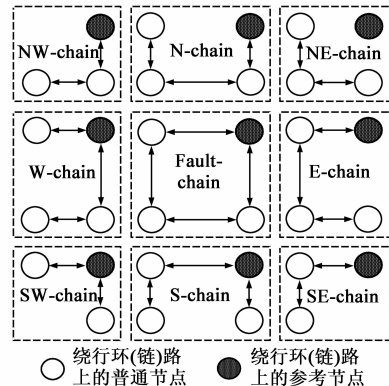


图2 绕行环(链)路的参考节点位置

3 基于 BIST 的容错路由算法

3.1 Zhang's 算法及其扩展

Zhang's 算法的绕行思想类似于转弯模型(Turn model),通过禁止数据包在绕行环路东北角的转弯来避免死锁的形成。

将 Zhang's 算法对单个故障节点的绕行思想扩展到绕过矩形故障区域后,如图 3 和图 4 所示,阴影部分是大小为 $m \times n$ 的故障区域. S_x, N_x 为绕行环(链)路南边上的第 x 个节点, $1 < x < n$; E_y, W_y 为绕行环(链)路东边上的第 y 个节点, $1 < y < m$. OP 为无故障情况下的传输路径, NP 为绕行路径.我们将图 3 和图 4 所示的绕行路线称之为 Zhang's 算法的扩展.虽然 Zhang's

算法的扩展能够实现了对故障区域的容错,但扩展算法并没解决 Zhang's 算法存在的绕行环路负载不均衡的问题.随着故障区域的扩大,该问题会严重影响 NoC 系统的通信性能。

3.2 基于 BIST 的容错路由算法

本文所提算法的思想是,利用 BIST 技术提供的故障信息,优化绕行环(链)路上数据包的分布,并缩短数据包的数据包的绕行距离,达到均衡故障区域周围链路负载和降低通信时延的效果.算法的分为数据沿 X 轴方向的绕行优化和沿 Y 轴方向的绕行优化。

3.2.1 数据沿 X 方向的绕行优化方法

S 与 D 的相对位置如下列情况时,数据会沿 X 方向遇到绕行环路:(1) S 和 D 分别位于故障区域东西两

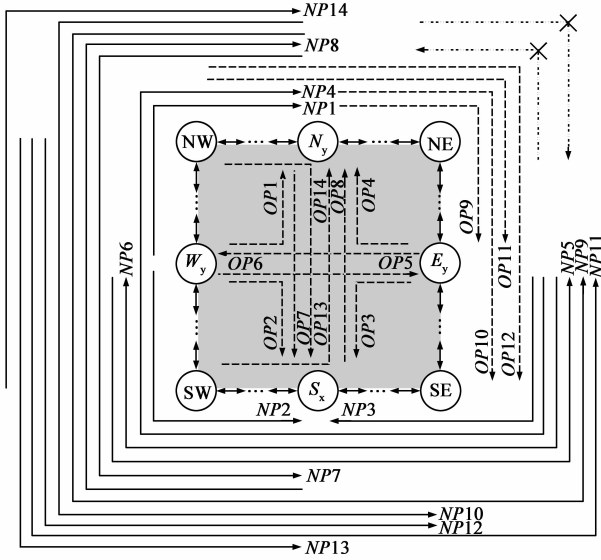


图3 NoC内部故障节点的绕行方法

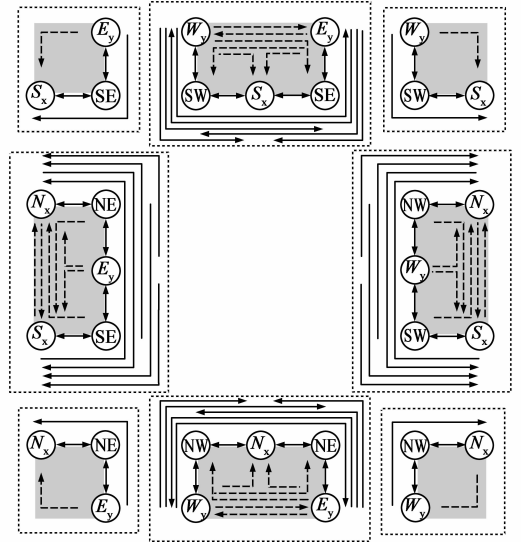


图4 NoC边沿故障区域的绕行方法

侧 ($X_D < X_{SW} < X_{SE} \leq X_S$ 或 $X_S \leq X_{SW} < X_{SE} < X_D$), 且 S 位于故障区域所在行 ($Y_{SW} \leq Y_S \leq Y_{NW}$); (2) S 位于故障区域所在行, D 位于故障区域所在列 ($X_{SW} \leq X_D \leq X_{SE}$).

对于第一种情况, 按 Zhang's 算法的扩展, 数据绕过故障区域后要到达 S 所在行, 再按照 XY 算法传输到 D , 如图 5 中 S_1 到 D_3 和 D_4 , S_2 到 D_5 和 D_6 的传输路线 (实线箭头所示), 这种路由方式使得数据在绕行距离

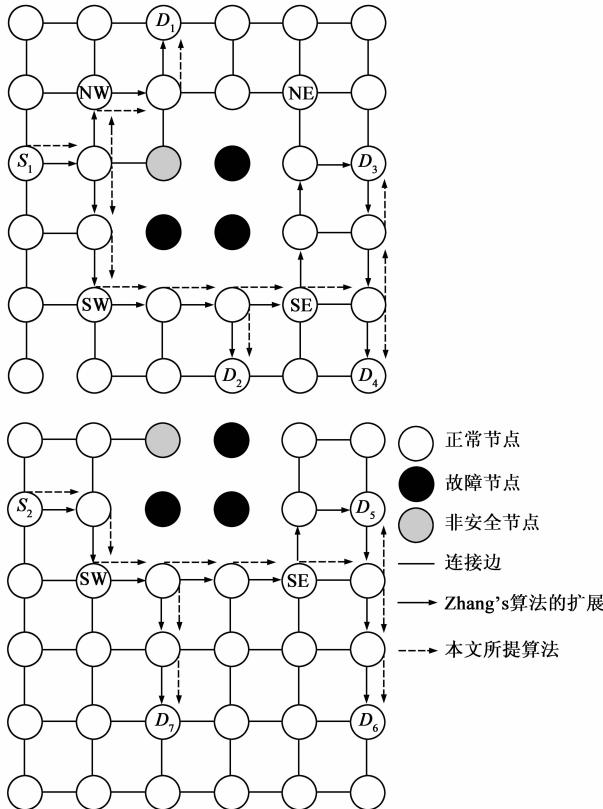


图5 数据沿X方向的绕行线路

较长, 增加了数据的路由距离, 加剧了绕行环 (链) 路上的拥塞. 针对此问题, 本文所提算法的优化如下: 数据包沿 X 方向到达绕行环路后按照 Zhang's 算法的扩展传输, 在到第二个顶点时沿 X 轴方向脱离绕行模式, 以 XY 路由方式向 D 传输, 图 5 中 S_1 到 D_3 和 D_4 , S_2 到 D_5 和 D_6 虚线所示的传输路线. 通过优化数据在绕行距离减少 ($Y_S - Y_{SE}$) 跳, 当 $Y_D \geq Y_S$ 时, 数据的路由距离不变; 当 $Y_D < Y_S$ 时, 路由距离减少了 $2(Y_S - Y_{SE})$ 跳.

对于第二种情况, 本文所提算法的绕行方法与 Zhang's 算法的扩展一致.

算法流程如图 6.

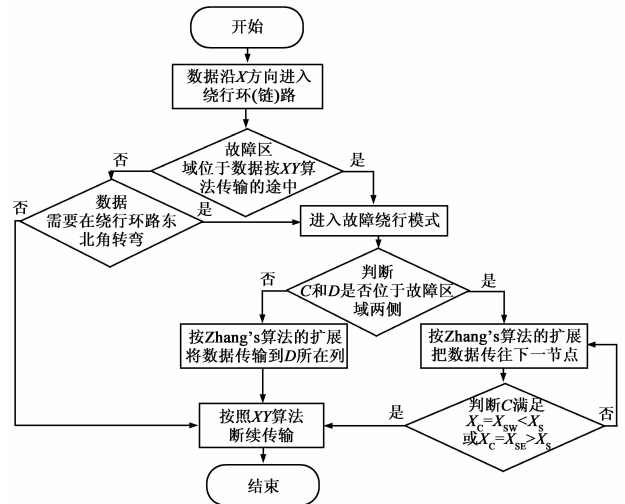


图6 数据沿X方向的绕行优化算法流程图

3.2.2 数据沿 Y 方向的绕行优化方法

S 与 D 的相对位置关系如下时, 数据会沿 Y 方向遇到绕行环路: D 和 S 分别位于故障区域南北两侧 ($Y_S > Y_{NW}$, $Y_D \leq Y_{SW}$ 或 $Y_S < Y_{SW}$, $Y_D \geq Y_{NW}$), 且 D 位于故障

区域所在列.

数据沿 Y 方向进入绕行环路时,按 Zhang's 算法的扩展,数据先沿着 X 方向到达目的节点所在列,再沿 Y 方向到达绕行环(链)路并顺其左半周绕过故障区域,如图 7 中实线箭头所示传输路线,数据沿着 X 方向多次进行 180 度转向,增加了其绕行距离,且绕行环(链)路左半周负载较重.

针对此问题,本文所提算法的优化如下:由绕行环(链)路上的节点将绕行环(链)路顶点的坐标信息向同列的所有正常节点传输,并存储在故障存储器内.数据在路由过程中,若发现 C 的故障存储器为空或有绕行环路但并不影响数据按 XY 算法向 D 传输,则继续按 XY 算法路由;否则路由方式变为:(1)若 C 位于绕行环(链)路以北,数据先按 XY 算法向最近的一个顶点传

输,再按 Zhang's 算法的扩展绕行,如图 7(a)和(c)所示.若 C 离顶点 NW 近,优化后数据的绕行距离减少了 $(X_D - X_{NW})$ 跳,路由距离在 $X_S < X_D$ 时可减少 $2(X_D - \max(X_{NW}, X_C))$ 跳,在 $X_S \geq X_D$ 时保持不变.若 C 离顶点 NE 近,优化后可减轻绕行环(链)路左半周的负载,数据的绕行距离减少了 $2(X_D - X_{NW}) - (X_{NE} - X_D)$ 跳,路由距离在 $X_S < X_{NE}$ 时可减少 $2(X_D - X_{NW}) - 2(X_D - \max(X_D, X_C))$,在 $X_S \geq X_{NW}$ 时可减少 $2(X_D - X_{NW})$ 跳;(2)若 C 位于故障区域以南,由于算法禁止在东北角的转弯,数据先用 XY 算法向 SW 节点,再按 Zhang's 算法的扩展绕行.如图 7(b)所示.通过优化数据的绕行距离减少了 $(X_D - X_{NW})$ 跳,路由距离在 $X_S < X_D$ 时可减少 $2(X_D - \max(X_{NW}, X_C))$ 跳,在 $X_S \geq X_D$ 时保持不变.

算法流程如图 8.

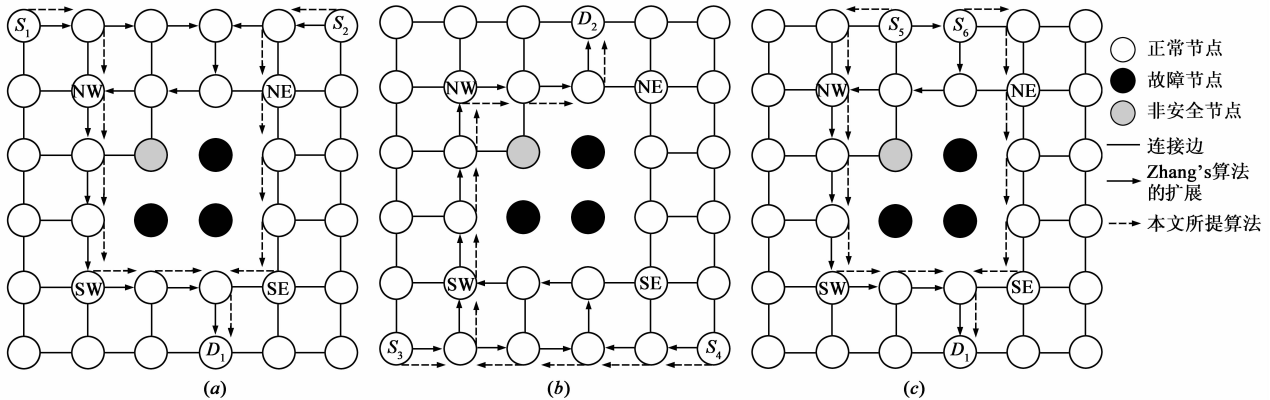


图7 数据沿 Y 方向的绕行线路

3.3 算法步骤

本文所提算法的步骤为:

(1)NoC 系统启动或复位后,网络通过 BIST 机制检测故障节点的位置,再确定出非安全节点以及非激活节点,至此故障区域形成.将与故障区域相邻的节点定义为绕行环(链)路中的节点,有两个临节点在绕行环(链)路上的节点为顶点,顶点确定后绕行环(链)路完全形成.

(2)绕行环(链)路上的节点将顶点坐标信息向其所在列的所有正常节点传输,并存储在故障存储器内.

(3)数据按 XY 算法路由过程中,每到达一个节点后先检测当前节点是否为目的节点,若为目的节点,则将路由结束.若不是目的节点,则检测该节点是否为绕行环(链)路上的节点,若是则按照数据沿 X 方向的绕行优化方法路由.如果当前节点非目的节点也非绕行环(链)路上的节点,且故障存储器内的坐标信息显示故障区域位于源节点和目的节点的传输路径上,则按数据沿 Y 的绕行优化方法路由.若存储器内的坐标为

空或不影响数据从当前节点到目的节点的传输,则数据包继续按照 XY 路由传输.

4 算法无死锁证明

Dally 在文献[9]中提出了通道依赖图(Channel Dependency Graph, CDG)的概念,并证明了算法 R 在网络 I 中无死锁的充要条件是其对应的 CDG 中无环路.

为证明本文所提算法是无死锁的,我们利用文献[10]中给出的证明工具(ODI),该工具根据不同的数据类型 T 将路由算法 R 分成若干子算法 R_i ,针对每个 R_i 据构建 CDG,若 R_i 的所有强连通分量非环路,则该网络在该算法下是无死锁的.

以 4×4 的 Mesh 网络为例,其连接图如图 9(a)所示,无故障时本文所提算法和 XY 算法相同,禁止数据从 Y 到 X 的转弯,通道依赖图如图 9(b).在 CDG 中不存在环路,因此在无故障情况下 Mesh 网络采用本文所提算法路由是无死锁的.

当故障区域位于网络内部时,假设故障节点为 n_6 和 n_7 ,网络的连接关系如图 10(a)所示.为了解决绕过

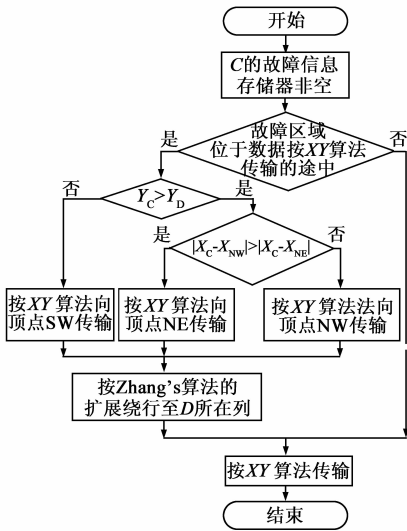
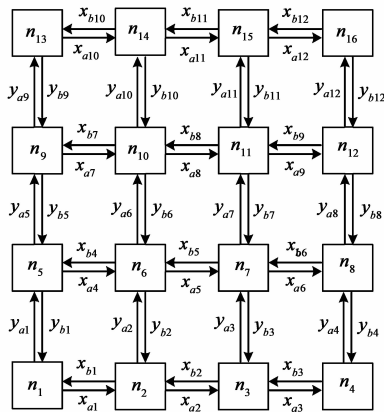
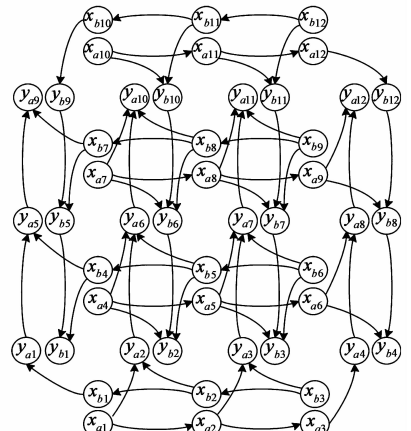


图8 数据沿Y方向的绕行优化算法流程图



(a) 网络连接图



(b) 通道依赖图

图9 无故障时的网络连接图与本文所提算法对应的CDG

故障区域的问题,需在绕行环路上增加 y_{a5} 到 x_{b7} , y_{b1} 到 x_{a1} , y_{b4} 到 x_{b3} 的转弯,同时为了避免环路的出现取消了东北角处 x_{a9} 到 y_{b8} 的转弯.采用本文所提算法后的 CDG 如图 10(b),由于断开了东北角处 X 到 Y 方向的转弯,通道依赖图中没有形成环路,因此本文所提算法是无死锁的.

当故障区域位于网络边沿时,假设故障节点为 n_2 和 n_3 ,网络的连接关系如图 11(a)所示.为了使数据绕过故障区域在绕行环路的顶点增加从 Y 方向到 X 方向的转弯.采用本文所提算法后的 CDG 如图 11(b),由于绕行环路为一条非循环的链路,CDG 中没有形成环路,即采用本文所提算法是无死锁的.

当故障区域的大小,位置以及 NoC 的大小改变时,同理可证.即当 $M \times N$ 的 Mesh 结构 NoC 中存在 $M_1 \times N_1$ ($0 \leq M_1 \leq M - 1, 0 \leq N_1 \leq N - 1$) 的故障区域时,采用本文所提是无死锁的.

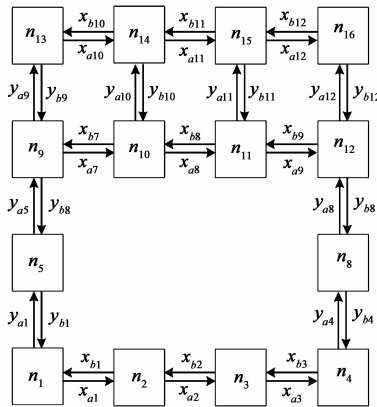
5 算法仿真和性能分析

为了验证算法的可行性和有效性,本文采用了 OPNEC-Sim^[11]进行仿真.该软件以 OPNET 引擎为基础,针对 NoC 的特点在进程域,节点域和网络域建模,是一个用于 NoC 网络性能仿真的专用平台.本文的仿真基于以下假设:

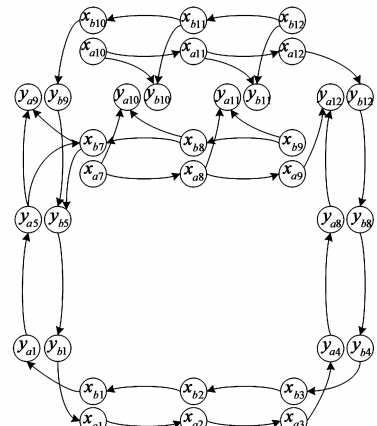
(1)网络使用虫孔交换方式进行数据包的传递,每个数据包由 M 个微片(flut)组成.

(2)数据包的目的节点服从均匀分布.

(3)网络中每个节点发送的数据包相互独立,且服从泊松分布.

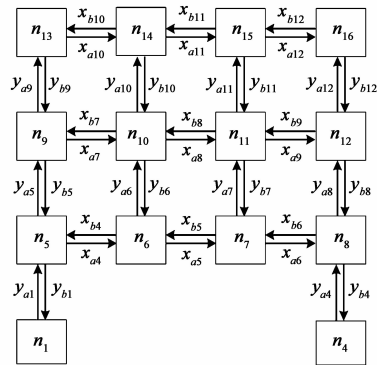


(a) 网络连接图

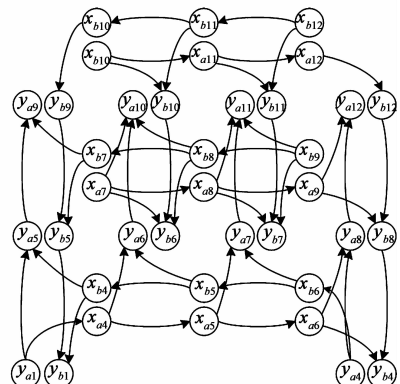


(b) 通道依赖图

图10 故障区域位于网络内的网络连接图与本文所提算法对应的CDG



(a) 网络连接图



(b) 通道依赖图

图11 故障区域位于边沿时的网络连接图与本文所提算法对应的CDG

(4)每个节点在本地输入方向上的缓存无限大,目的节点能够快速处理收到的数据包。

(5)NoC 具有 BIST(内建自测)功能。

(6)相邻节点用两条单向无虚通道的信道相连。

仿真在 8×8 的 2D-Mesh 网络中进行,每个输入信道的缓存大小为 4flit,每个数据包由 4 个 flit 构成.对于每个注入率,仿真时间持续 30000cycles,前 10000cycles 的不计入仿真结果.在仿真中以 Chen's 算法为参照对象。

5.1 故障区域位于 NoC 不同位置时的性能仿真

为了体现故障区域位置对算法性能的影响,对故障区域位于网络内部(参考节点坐标(5,5)),边沿(参考节点坐标(5,7))和顶点(参考节点坐标(7,2))三种情况分别进行仿真,故障区域为 2×2 的矩形,仿真结果如图 12 所示。

随着故障节点位置的变化,两种容错算法的变化趋势是相同的.当故障区域位于网络内部,边沿和顶点时算法的时延依次减小.由于故障区域从网络中心部分转移到网络边沿再到网络顶点的这个过程中,受故障影响的节点数目依次减少,网络时延逐步降低。

对比两种算法可以发现,无论故障区域位置如何变化,本文所提算法的时延性能均优于 Chen's 算法.当故障区域位于网络内部,边沿和顶点,且网络时延为

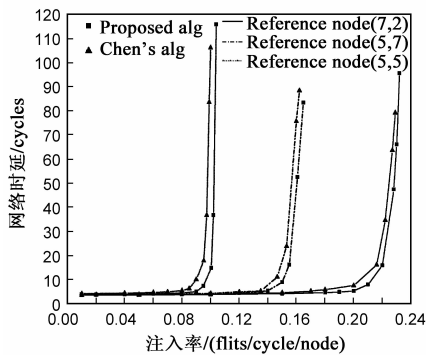


图12 故障区域位置变化时的时延比较曲线

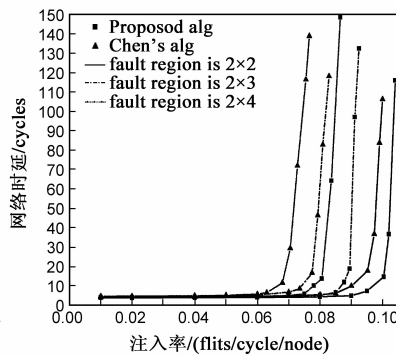


图13 故障区域大小沿横向变化的时延比较曲线

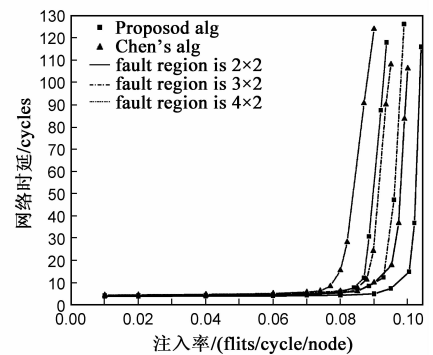


图14 故障区域大小沿纵向变化的时延比较曲线

70cycles 时,与 Chen's 算法相比,本文所提算法可将注入率分别提高 4.8%,1.8% 和 1.2%.即故障区域位于网络内部时本文所提算法的优势最明显,因为故障区域位于网络内部时满足优化条件的结点数目最多,优化效果明显。

5.2 故障区域大小对算法性能的影响仿真

保持网络参数不变,增加故障区域面积,仿真结果如图 13 和图 14 所示.图 13 是故障区域分别为 2×2 (参考节点坐标为(5,5)), 2×3 (参考节点坐标为(5,5)), 2×4 (参考节点坐标为(6,5))(面积沿横向增加)时的时延曲线比较;图 14 是故障区域为 2×2 (参考节点坐标为(5,5)), 3×2 (参考节点坐标为(5,5)), 4×2 (参考节点坐标为(5,6))(面积沿纵向增加)时的时延曲线比较。

可以看出,无论故障区域的面积如何变化,本文所提算法的网络时延均优于 Chen's 算法.当网络时延为 70cycles 时,与 Chen's 算法相比,在故障区域面积横向增加时,本文所提算法可将注入率分别提高 4.8%,12% 及 15%;在故障区域面积纵向增加时,可将注入率分别提高 4.8%,5.2% 及 5.7%.这是由于故障区域横向扩大时,满足沿 Y 方向绕行优化的节点增多,在这种情况下本文所提算法不仅能够减少数据的绕行长度,还能够均衡绕行环路的负载,从而使得故障区域面积沿横向增加时本文所提算法的网络时延性能更突出。

6 结论

本文提出了一种基于 BIST 的 2D-Mesh 结构 NoC 无虚通道容错路由算法,通过获取故障区域的位置信息来优化数据传输线路,达到均衡绕行环(链)路负载,减少部分数据绕行距离的效果.仿真表明,本文所提算法在故障区域位置及大小变化的情况下均优于 Chen's 算法,能够降低网络的平均端到端时延,提高网络吞吐量。

参考文献

[1] 王宏伟,陆俊林,佟冬,等.层次化片上网络结构的簇生成

算法[J].电子学报,2007,35(5):916-920.

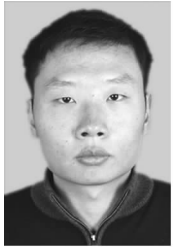
WANG Hong-wei, LU Jun-lin, TONG Dong, et al. Cluster generation algorithm for hierarchical networks-on-chip architecture [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(5): 916-920. (in Chinese)

[2] 王颀,单智阳,朱云涛,等.串扰约束下超深亚微米顶层互连线性能的优化设计[J].电子学报,2006,34(2):214-219.

WANG Qi, SHAN Zhi-yang, ZHU Yun-tao, et al. The optimal design of ultra deep sub-micron global interconnect under crosstalk constraint [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(2): 214-219. (in Chinese)

- [3] Seyrafi M, Asad A, et al. A new low cost fault tolerant solution for mesh based NoCs [A]. 2010 International Conference on Electronics and Information Engineering [C]. Piscataway: IEEE, 2010. 207 – 213.
- [4] Duan Xinming, Sun Xuemei. Fault-tolerant routing in A PRDT (2, 1)-based NoC [A]. 2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology [C]. Piscataway: IEEE, 2010. 506 – 510.
- [5] Chen Kuo-Hsuan, Chiu Ge-Ming. Fault-tolerant routing algorithm for meshes without using virtual channels [J]. Journal of Information Science and Engineering, 1998, 14(4): 765 – 783.
- [6] R Holsmark and S Kumar. Corrections to chen and chiu's fault tolerant routing algorithm for mesh networks [J]. Journal of Information Science and Engineering, 2007, 23(6): 1649 – 1662.
- [7] Z Zhang, A Greiner and S Taktak. A Reconfigurable Routing Algorithm for a Fault-Tolerant 2D-Mesh Network-on-chip [A]. Design Automation Conference [C]. Piscataway: IEEE, 2008. 441 – 446.
- [8] Chien A A. A cost and speed model for k-ary n-cube wormhole routers [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1998, 9(2): 150 – 162.
- [9] W Dally, C Seitz. Deadlock-free message routing in multiprocessor interconnection networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 1987, 36(5): 547 – 553.
- [10] S Taktak, E Encrenaz, J Desbarbieux. A tool for automatic detection of deadlock in wormhole networks on chip [J]. ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems, 2008, 13(1): 6: 1 – 22.
- [11] Cai Jueping, Huang Gang, et al. OPNEC-Sim: An Efficient Simulation Tool for Network-on-Chip Communication and Energy Performance Analysis [A]. International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology 2010 [C]. Piscataway: IEEE, 2010. 1892 – 1894.

作者简介



姚 磊 男, 1984 年出生于陕西省商洛市, 现为西安电子科技大学通信工程学院通信与信息系统专业硕博连读生, 主要研究方向为通信信号处理.

E-mail: lejiao@mail.xidian.edu.cn



蔡觉平 男, 1976 年出生于陕西省西安市, 先为西安电子科技大学微电子学院教授. 主要研究方向为纳米级大规模 SoC 设计和通信网络设计.