

引用格式:苑乔,张华健,朱进宇,等. 基于包交换技术的可重构片上网络混合路由器设计[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(3):49-54. [YUAN Q, ZHANG H J, ZHU J Y, et al. Design a reconfigurable router based on hybrid packet/circuit-switching for NoC [J]. Microelectronics & Computer, 2020, 37(3):49-54.]

基于包交换技术的可重构片上网络混合路由器设计

苑 乔¹, 张华健^{1,2}, 朱进宇¹, 闫 峥¹, 宋宇鲲³, 刘学毅¹

(1 航天恒星科技有限公司, 北京 100027; 2 清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084;

3 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 在非密集计算任务下, 分布式路由片上网络表现出良好的性能. 然而当片上网络布局密度接近 1 时, 受算法制约, 高链路拥塞率会严重降低分布式路由网络执行大批量数据传输任务的性能. 考虑到片上网络需传输数据的密集/非密集特征, 由此设计集成有可定向传输事务的混合式路由, 通过配置路由节点分配两种路由策略的权限, 在片上网络中构建点对点高权限专用数据链路, 避免分布式路由自寻链路带来网络长时拥塞、事务处理延迟问题, 保证事务并行度, 提高网络节点挂载计算核布局的容忍度. 同时论文在 8×8 Mesh 结构下对集成有混合路由网络性能进行了测试, 结果表明采用混合路由有效提高了传输带宽和链路成功率等网络性能指标.

关键词: 片上网络; 包电路交换; 可重构; 集总式路由; 分布式路由

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2020)03-0049-06

Design a reconfigurable router based on hybrid packet/circuit-switching for NoC

YUAN Qiao¹, ZHANG Hua-jian^{1,2}, ZHU Jin-yu¹, YAN Zheng¹,
SONG Yu-kun³, LIU Xue-yi¹

(1 Space Star Technology Limited Corporation, Beijing 100027, China;

2 Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3 Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Under non-intensive computing tasks, NoC based on distributed routing shows good performance. However, when performing intensive and complex computing tasks, distributed routing lacks of complex high-performance algorithms and link congestion has to be meeting. Especially when the network layout density is close to 1, with high-volume data transmission, a high link congestion rate will seriously degrade the overall performance of the NoC. Considering the variety of the data size transmission on the NoC (dense/non-dense), designing and encapsulating the lumped routing of reconfigurable directional transport transactions, setting the routing node port, setting the port detection mechanism to assign two routing strategies. At the same time, the performance of 8×8 Mesh of hybrid routing network show that hybrid routing can improve transmission bandwidth and link success rate effectively.

Key words: network-on-a-chip; packet/circuit-switch; reconfigurable; distributed routing; lumped routing

1 引言

随片上系统性能提升,处理器核间互连必须具有低延迟、高吞吐率和良好的可扩展性^[1].传统基于总线的互连架构已难以满足现今性能需求,而基于报文交换的片上网络具有良好的地址空间可扩展性,较强的并行处理能力^[2]成为片上多核间通讯的首选互连架构^[3].

近年研究工作^[4-6]均在一种路由策略上展开,所设计的混合路由器不能兼顾集总式/分布式路由策略优势领域.本文在复用路由节点硬件资源前提下,设计一种封装以上两种路由策略具有链路可重构能力的混合路由器,增强片上网络对各类映射事务的兼容度.

2 系统概述

本文设计的混合路由片上网络是基于包电路交换技术^[7]的2维网格结构,节点配置网络对其下发配置信息示意图如图1所示.

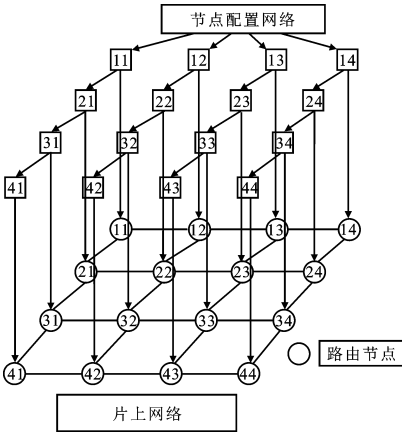


图1 节点配置网络向片上网络下发配置信息

包电路交换技术根据不同源端的路由请求,按照优先级顺序动态选取网络节点建立传输链路,链路内路由节点的入端口和出端口被锁定,形成链路独占,其他源端只能等待链路被释放或使用未被锁定的端口;若源端所有可请求端口均被锁定占用,则在接收到链路建立失败信号后,重复请求建立链路操作,直至所请求端口空闲,完成数据传输.

本设计的片上网络含节点配置网络和片上网络两部分.节点配置网络是配置路由策略的多播网络,递次下发配置信息至片上网络的路由节点,配置信息格式如图2所示.

集总式路由的配置信息包括选定路由节点的网

4 bit	4 bit	1 bit	1 bit	3 bit	3 bit	1 bit	1 bit	3 bit	3 bit	1 bit	1 bit	3 bit	3 bit
Y	X	0	0	1N	OUT	1	0	1N	OUT	1	0	1N	OUT

图2 配置信息格式

络坐标 YX、出/入端口编码 OUT/IN、通道开启“10”/关闭“00”等.网络坐标匹配对应路由节点,通道开启/关闭信号和对应出/入端口组合,表示通道开启代表当前路由节点的该端口组合为有效/无效配置.

3 路由器设计

片上网络的混合路由器模块封装了分布式路由和集总式路由,节点配置网络下发的配置信息经过解析和端口检测机制传入集总式路由模块,集总式路由模块根据通道开启/关闭信号和集总配置端口是否空闲决定当前路由节点采用分布式路由策略还是集总式路由策略,其结构如图3所示.

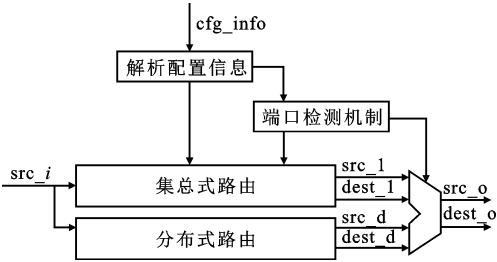


图3 可重构混合路由器结构

片上网络是单端口网络,其五个方向端口为:本地入/出端口、东向入/出端口、南向入/出端口、西向入/出端口和北向入/出端口.分布式路由采用XY维序路由^[8],根据当前路由节点的节点坐标(Y,X)与目的路由节点的节点坐标(DY,DX)比较选择路由方向,路由机制如下:

- (1)当 $DX > X$,路由方向为东方向;
- (2)当 $DX < X$,路由方向为西方向;
- (3)当 $DX = X, DY > Y$,路由方向为南方向;
- (4)当 $DX = X, DY < Y$,路由方向为北方向;
- (5)当 $DX = X, DY = Y$,路由方向为本地方向;

分布式路由源端携带的目的端节点坐标与当前路由节点坐标,选择节点的入端口和出端口;分布式路由是片上网络默认路由策略,在未选定任何节点配置集总式路由情况下,所有节点均为分布式路由,在有选定节点进行集总路由情况下,剩余节点和选定节点剩余端口仍为分布式路由.

集总式路由利用解析的配置信息,锁定当前路由节点中被选定的入端口和出端口的路由方向,事务由该入端口进入,从锁定的出端口输出.每个路由节点具有五个方向,即具有五对入端口和出端口,入端口和出端口可自行选择组合方式和组合数量,但同一方向入端口和出端口通常不组合.

混合路由的端口检测机制的工作流程如下:

- (1)检测当前路由节点各端口在分布式路由下的状态是否与集总式路由所选取端口组合冲突;
- (2)只有待锁定两端口均空闲,端口检测机制才允许集总式路由锁定该端口组合构成的通道;
- (3)此时分布式路由将没有权限继续使用该端口组合的入端口和出端口;
- (4)而未经集总配置的端口的使用权限仍然交由分布式路由.

4 路由策略分析

片上网络可重构混合路由器可以单独工作在分布式路由策略下或单独工作在集总式路由策略下,也可以工作在二者混合的路由策略下.

4.1 分布式路由策略

单独工作在分布式路由策略时,即为 XY 维序路由,片上网络核间事务数据传输,先沿 X 方向传输 X 坐标相同,再沿 Y 方向传输,直至数据到目的端,如图 4 所示.

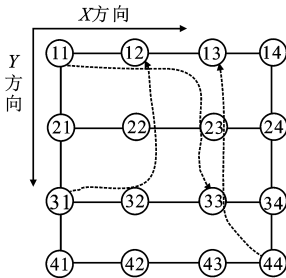


图 4 分布式路由的路由机制示意图

4.2 集总式路由策略

单独工作在集总式路由策略时,节点配置网络下发集总配置信息,锁定需要配置节点对应端口,构建数据链路.片上网络为单端口网络,每个路由节点含有五个方向,最多同时可构建五组入/出端口组合,其中一种组合方式如图 5 所示,以路由节点(2,2)为例,集总配置五条通道用以构建链路.

路由节点(2,3)、(3,2)、(2,1)、(1,2)、(2,2)为数据源端,路由节点(2,2)、(2,1)、(1,2)、(2,3)、(3,2)为数据目的端.(2,3)向(2,2)发送事务数据,(2,

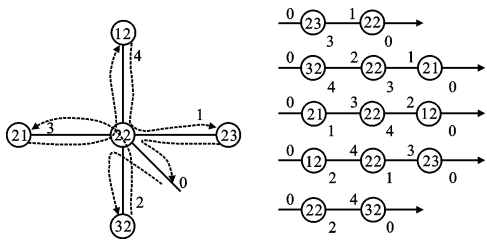


图 5 单路由节点集总链路配置示意图

2)向(3,2)发送事务数据,(3,2)向(2,1)发送事务数据,(2,1)向(1,2)发送事务数据,(1,2)向(2,3)发送事务数据.

在集总式路由策略下,每条数据链路所经过的路由节点均需提前锁定事务数据入路由节点的端口和出路由节点的端口.例如,(3,2)向(2,1)发送事务数据,事务数据从数据源端路由节点(3,2)的 0 端口(本地方向)入,从 4 端口(北向)出,传输至路由节点(2,2),并从路由节点(2,2)的 2 端口(南向)入,从 3 端口(西向)出,传输至路由节点(2,1),并从路由节点(2,1)的 1 端口(东向)入,从 0 端口(本地方向)出,实现完整的数据传输过程.

4.3 混合路由策略

混合路由网络工作在混合路由策略时,集总式路由对路由节点的使用权限高于分布式路由,但仅限于对集总配置信息包含的节点端口组合,剩余端口的使用权限交由分布式路由使用,规则如下:

- (1)集总路由链路建立数为 0,分布式路由链路建立数最多为 5;
- (2)集总路由链路建立数为 1,分布式路由链路建立数最多为 4;
- (3)集总路由链路建立数为 2,分布式路由链路建立数最多为 3;
- (4)集总路由链路建立数为 3,分布式路由链路建立数最多为 2;
- (5)集总路由链路建立数为 4,分布式路由链路建立数最多为 1;
- (6)集总路由链路建立数为 5,分布式路由链路建立数最多为 0.

如图 6 所示混合路由策略链路和端口使用权限分配具有三类情况:

情况 1:集总路由链路建立数为 0 时,图 6(a),分布式路由拥有所有端口的最高使用权限;

情况 2:集总路由链路建立数为 1 至 4 时,如图 6(b)~(e),集总路由拥有建立链路出/入端口的最高使用权限,分布式路由拥有剩余端口的使用权限;

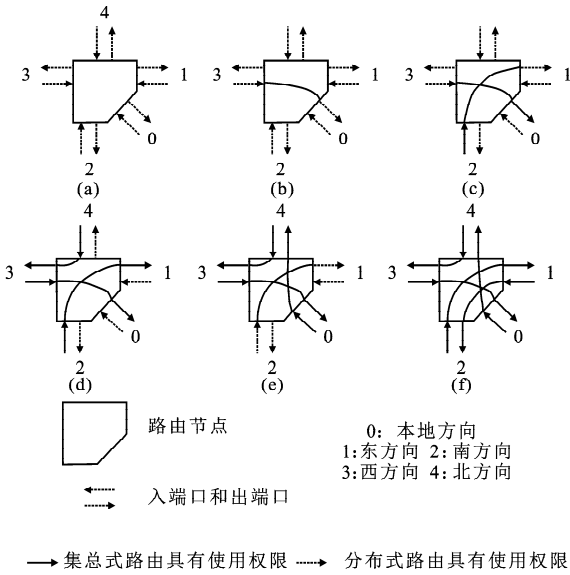


图 6 混合路由策略链路和端口使用权限分配情况

此时,如果分布式路由的寻径结果恰好是集总路由锁定端口,该端口将会向分布式路由返回端口占用链路“建立失败”信号,以示分布式路由重新路由,直至路由结果是其使用权限内的端口,或集总路由权限被释放;

情况 3:集总路由链路建立数为 5 时,如图 6 (f),集总路由拥有路由节点所有入端口和出端口的最高使用权限,任何方向的分布式路由都将返回链路“建立失败”信号,直至节点配置网络释放集总路由的权限。

5 路由冲突与链路重构

5.1 路由冲突解决机制

混合路由策略在分布式路由策略和集总式路由策略之间分配端口权限的关键是,当二者间出现路由冲突时,如何保证事务数据的安全性,避免事务数据丢失或冗余传输等。

本文可重构混合路由器设计动态各方向各端口是否空闲的端口检测机制解决上述问题。

端口检测机制将动态检测如下 4 个条件:

- (1)通道信号是否为开启状态“10”;
- (2)路由节点各方向数据传输状态;
- (3)路由节点各入端口与出端口锁定状态;
- (4)集总配置使用出/入端口是否均空闲。

当以上 4 个条件均满足,端口检测机制断定当前集总配置的一组端口组合生效,集总式路由策略获得该端口组合的使用权限,任何分布式路由策略下的事务数据都将无法通过该出/入端口。

当以上任一条件不满足时,表示集总配置的端口组合正被其他路由事务占用,集总式路由将继续等待,直至当前分布式路由事务数据传输完成。

端口检测机制保证具有高权限的集总式路由策略不会直接中断分布式路由事务传输,保证事务数据的安全性,避免分布式路由事务因事务中断而丢失或冗余发送事务数据。

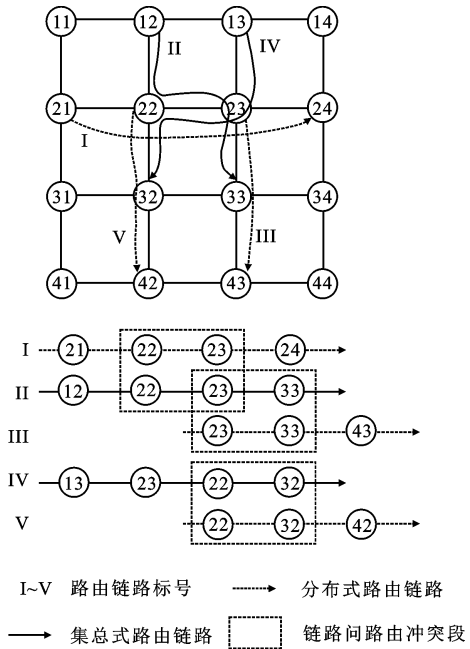


图 7 路由冲突示例

假定存在如图 7 所示的路由冲突情况,5 条事务链路分别是虚线箭头代表的分布式路由链路和实线箭头代表的集总式路由链路,两种路由链路在虚线框内的路由节点存在路由冲突:

I 和 II 路由链路在路由节点(2,2)1 方向(东向)出端口冲突,在路由节点(2,3)3 方向(西向)入端口冲突;II 和 III 路由链路在路由节点(2,3)2 方向(南向)出端口冲突,在路由节点(3,3)4 方向(北向)入端口冲突;IV 和 V 路由链路在路由节点(2,2)2 方向(南向)出端口冲突,在路由节点(3,2)4 方向(北向)入端口冲突。

此时,如上文所述在每个冲突的路由节点,端口检测机制将在保证事务数据安全的情况下,切换路由策略。因此,冲突示例中所有冲突路由节点,都当且仅当分布式路由完成当前事务数据任务,路由策略才切换到集总式路由。当集总式路由事务数据传输完毕、集总式链路撤销之后,所有端口的使用权限将重新分配给分布式路由。

5.2 链路重构分析

混合路由策略和端口检测机制的组合,不仅能

在新建链路时避免路由冲突问题,也可以重构分布式路由拥塞严重的链路路径,打破分布式路由 XY 维序路由的限制,弥补分布式路由策略的不足。

分布式路由自寻链路的机制多数情况都遵循最短路径原则,即数据源端(Y, X)到数据目的端(DY, DX)的路径跳数最短,最短路径跳数 = $DY + DX - Y - X$ 。基于包交换技术的片上网络中,无论是 XY 维序路由、转向路由、回退转向路由,每条链路都满足最短路径原则。但是,封装集总式路由之后,将破上述限制,理想条件下,源端与目的端之间可以构建任意无死锁的链路,在重构分布式路由拥塞的链路时体现尤为明显。

在图 8 中,虚线箭头代表的分布式路由自寻链路在路由节点 (2, 2) 和 (2, 3) 之间存在拥塞冲突,导致传输链路无法建立,事务请求将频繁请求建立链路,这一过程持续十几个至上千个时钟周期,导致事务的并行度无法保证。此时,采用实线箭头代表的集总式路由重构分布式路由链路,将会有效缓解链路拥塞度和维持事务并行度。图 8 中显示当前存在 4 条可选重构链路,结合片上网络具体情况选择合适路径重构,绕开拥塞路径,避免分布式路由自寻链路带来网络长时拥塞、事务处理延迟问题。

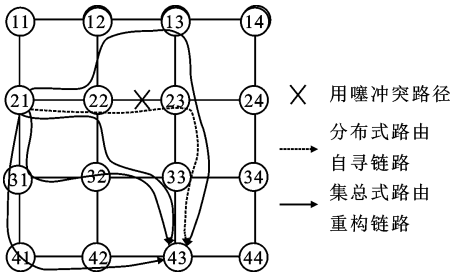


图 8 链路重构示意图

6 实验与分析

对混合路由器进行了理论上的结构和性能分析之后,本节主要对上述方案进行性能测试。测试工作在 8x8 的二维网格结构网络上展开,表 1 给出了待测试网络在 Xilinx XC6VLX240T FPGA 芯片上的资源消耗情况。

表 1 路由器资源消耗

	Used	Available	
Registers	2 473	301 440	0%
LUT	2 476	150 720	1%

首先,在 8×8 网络的 64 个路由节点上挂载数据收发单元,随机选出 48 个单元对网络上任意节点发起随机数据传递,此时网络路由全为分布式路由。接着对数据链路进行集总式分配,从 0 条开始每次增加 4 条集总链路,测试混合路由器网络数据传输性能。

图 9 横坐标表示集总式链路数量,纵坐标表示链路建立成功率,全部为分布式路由情况下,链路建立成功率仅为 41%。混合路由网络的链路建立成功率随着集总式配置链路的增加而明显增加,在集总式链路数量达到 20 条时,网络链路达到最高建立成功率 81%。随后随着集总式配置链路的增加,网络链路建立成功率开始下降。可见,集总式链路占总链路数 42% 时,链路建立成功率最高。

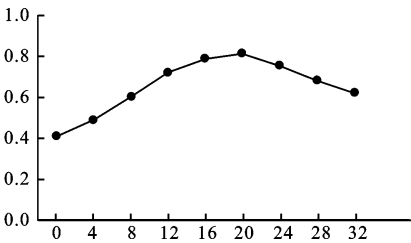


图 9 链路建立成功率

图 10 可知,在全部为分布式路由情况下,数据包平均延时约为 80 个周期。随着集总式链路分配的增加,平均延迟逐渐下降,在 24 条集总式链路情况下,数据包平均延迟降至约 50 个周期,后随着集总式配置链路增多,数据包平均延迟开始上升。

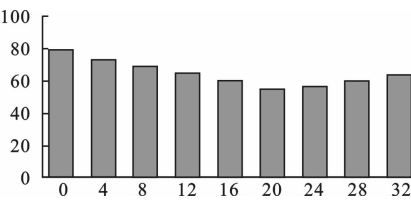


图 10 数据包平均延迟

图 11 表明,在全部为分布式路由情况下,网络吞吐率约达 80 包/100 周期。随着集总式链路分配增多,网络吞吐率逐渐上升,在 16 条集总式链路时,达到约 240 包/100 周期的最大值。

7 结束语

本文在基于包电路交换技术框架下,设计集总式路由并同分布式路由进行封装,构成可重构的混合路由器。针对两种路由策略切换可能带来的事务

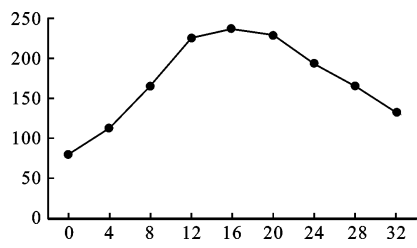


图 11 网络吞吐率

数据安全性问题,设计端口检测机制,动态分配路由权限,保证事务数据准确、完整传输. 本文设计的混合路由器有三种可选路由策略,特别是在混合路由策略下,集总式路由新建或重构链路的机制,均不受最短路径原则的限制,既为构建数据链路增加灵活性,又保证事务传输并行度,提高网络节点挂载计算核布局的容忍度.

参考文献:

[1] 许钊. 动态自适应片上网络的设计与评估[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.

[2] 朱兵. 基于片上网络的通信路由方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.

[3] MILLBERG M, NILSSON E, THID R, et al. The Nostrum Backbone-a Communication Protocol Stack for Networks Chip[C]// International Conference on Vlsi Design. Mumbai, India , 2004:693-696.

[4] ABBAS MAZLOUMI ; MEHDI MODARRESSI. A hybrid packet/circuit-switched router to accelerate memory access in NoC-based chip multiprocessors [C]//Design, Automation &. Test in Europe Conference &. Exhibition. Grenoble, France. 2015:908-911.

[5] MOHAMAD FALLAHRAD. CirKet: A Performance Efficient Hybrid Switching Mechanism for NoC Architectures[C]//Euromicro Conference on Digital System Design, [S. l], 2016:123-130.

[6] HUNG K. NGUYEN, XUAN-TU TRAN. Design and Implementation of a Hybrid Switching Router for the Reconfigurable Network-on-Chip[C]//International Conference on Advanced Technologies for Communications. Hanoi, Vietnam, 2016:328-333.

[7] SATHE S, WIKLUND D, LIU D. Design of a switching node (router) for on-chip networks[J]. DOI:10. 1109/ICASIC. 2003. 12774942003(1):75-78.

[8] DUATO J, YALAMANCHILI S, NI L. Interconnection Networks: An Engineering Approach[M]. IEEE Computer Society Press, 1997.

作者简介:

苑 乔 男,(1982-),硕士,高级工程师. 研究方向为面向高密度计算可重构片上系统实现技术、超低功耗通信终端实现技术、高通量卫星通信网络物理层技术、大容量物联网接入技术. E-mail:yuanqiao@spacestar.com.cn.

张华健 男,(1983-),硕士,高级工程师. 研究方向为卫星通信协议和系统设计.

朱进宇 男,(1985-),博士,高级工程师. 研究方向为卫星通信集成电路设计、射频/毫米波集成电路设计.

闫 峥 男,(1982-),硕士,高级工程师. 研究方向为卫星应用领域集成电路设计.

宋宇鲲 男,(1975-),博士,副研究员. 研究方向为面向高密度计算可重构片上多核系统实现、数字信号处理的 VLSI 实现.

刘学毅 男,(1986-),硕士,工程师. 研究方向为卫星通信领域集成电路设计.