

面向功耗的三维片上网络路由协议

秦云海, 李 丽, 虞 潇, 王佳文, 潘红兵, 张宇昂

(南京大学 电子学院 微电子设计研究所, 江苏 南京 210093)

摘 要: 建立了一个适合 3D-NoC 片上实现的路由器功耗模型, 并且结合奇偶拐弯模型提出了一种面向功耗的 3D-NoC 路由协议. 根据网络的功耗状况动态路由, 优化网络功耗分布, 有效避免局部功耗过大. 实验结果显示, 该协议能够明显改善网络功耗分布, 其最大功耗和功耗方差在最优情况下可分别优化 11.57% 和 24.61%.

关键词: 3D 片上网络; 功耗分布; 功耗模型; 路由协议

中图分类号: TN47

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)10-0006-04

A Power Adaptive Routing Protocol for 3D-Network on Chip

QIN Yun-hai, LI Li, YU Xiao, WANG Jia-wen, PAN Hong-bing, ZHANG Yu-ang

(Institute of VLSI Design, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: This paper establish a 3D power model, and a 3D power adaptive routing protocol is proposed which combined with the turn routing model. This 3D routing protocol can make dynamic routing decisions to optimize the power distribution in the network, and avoid the hotspot effectively. Experiments demonstrate this routing protocol can effectively regulate network power distribution, maximum and variance of power can decrease by 11.57% and 24.61% at best respectively.

Key words: 3D NoC; power distribution; power module; routing protocol

1 引言

在三维片上网络(3D-NoC)中功耗问题日益严峻, 如何有效避免局部热点的生成, 成为设计中面临的最重要问题之一^[1]. 选择和设计面向功耗的路由协议是解决功耗分布优化问题的一种方法. 在 2D-NoC 路由协议的研究中, 涌现出了众多科研结果. 文献[2]研究奇-偶拐弯模型路由方法, 能有效避免路由中的死锁问题. 文献[3]提出并研究 DyXY 路由方法, 能有效提高路由的自由性. 文献[4]是从动态功耗管理方面讨论并研究了功耗在 2D 网络的影响. 文献[5]是研究了 3D-NoC 中消息的交换方法. 文献[6]提出 3D-NoC 中基于热功耗映射方法对 3D-NoC 中网络性能表现方法的研究. 文献[7]在奇偶拐弯的基础上提出了一种面向功耗的 2D 路由算法, 能够有效的基于功耗进行优化. 由于功耗问题对

于 NoC 芯片来说是至关重要的, 有时避免局部过热比改善通信效率还要重要.

本文提出一种面向功耗的 3D-NoC 路由协议, 它能动态地控制路由选择, 确保 NoC 网络具有相对平衡的功耗分布.

2 面向功耗的路由协议

本文提出的面向功耗的 3D 自适应路由协议, 选择优先在竖直方向上传输, 而在每一层的平面上基于奇-偶拐弯模型进行传输, 即平面上它允许数据包沿着源和目的地之间的最小路径进行传输, 为了防止死锁, 对平面上传输过程中的特定方向拐弯进行限制: 在每个平面上奇数列禁止北-西拐弯(NW)和南-西拐弯(SW); 偶数列禁止东-北拐弯(EN)和东-南拐弯(ES); 禁止 180 度拐弯. 在满足上述限制规则的情况下引入功耗优化机制, 即若存在多条可

收稿日期: 2012-03-15; 修回日期: 2012-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(61176024, 61006018)

选路径,路由器会根据网络的功耗状况做出选择.协议的简单实现流程如图1所示.

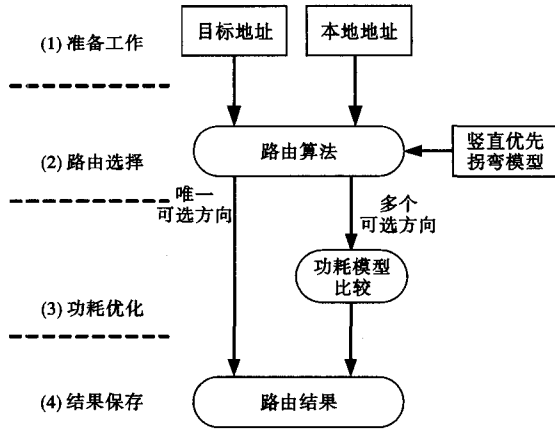


图1 面向功耗的路由协议实现流程示意图

以下描述协议的具体实现:

定义:本地路由器地址 (x_l, y_l, z_l) ,目标路由器地址 (x_t, y_t, z_t) ,列差值 $\Delta x = x_t - x_l$,其中 x 表示列号, y 表示行号, z 表示平面号.

(1) 准备工作:从包头提取目标地址 (x_t, y_t, z_t) ,从本地路由器获取本地地址 (x_l, y_l, z_l) ;

(2) 路由选择:根据路由算法进行路由,并得出结果;

(3) 功耗优化:若步骤(2)路由结果中存在两个(或3个)可选传输方向时则选择指标Stress值较小的方向,否则选择唯一可行传输方向;

(4) 结果保存:保存步骤(3)结果.

在面向功耗的路由协议中,Stress为功耗参数,将在功耗模型中定义.每个路由器在时钟上升沿更新Stress值,并将该值传递其近邻路由器,同时也将来自于近邻路由器的Stress值保存到一个功耗寄存器表中供路由决策使用.Stress值通过专用端口传递.

3 路由器功耗模型

数据在NoC中传输时将会产生动态功耗,我们在此引入文献[7]中的功耗模型方法,并在此基础上建立本路由协议所用模型,得到简化的路由器功耗模型,如式(1)所示.

$$P_{\text{total}} = C_{w-\text{flit}} \times N_{\text{flit}_{wr}} + C_{rd-\text{flit}} \times N_{\text{flit}_{rd}} \quad (1)$$

其中, $C_{rd-\text{flit}}$ ($C_{w-\text{flit}}$)是路由器读(写)单个数据片(flit)操作的平均功耗系数,主要取决于设计采用的工艺和设计本身,并在一定程度上受到应用特征的影响.可以根据具体情况来调整权重参数.

为了具体实现本方案提出的3D功耗模型,将该模型应用于七端口结构的3D路由器中.该路由器具有七个双向端口:上(Up)、下(Down)、北(North)、东(East)、南(South)、西(West)和本地(Local).每个端口具有输入(InChanel)和输出通道(OutChanel).输入通道包含缓存和路由逻辑,输出通道包含仲裁逻辑.本地端口负责路由器和本地子系统的通信,其它端口负责路由器与近邻路由器的通信.为了支持面向功耗的路由,路由器还包含一个功耗估计模块(Power estimation)和一个功耗表寄存器(Power budget register),功耗估计模块用于计算本地路由器的功耗指标,功耗表寄存器用于保存近邻路由器上一时刻的功耗指标.路由器结构如图2所示.

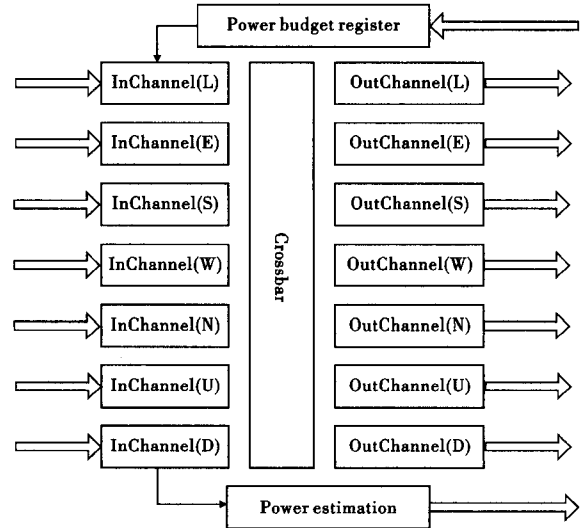


图2 功耗统计功能的路由器结构

结合路由器的具体结构,以时钟来计时(T 约定为当前时刻 t 之前的 m 个连续时钟周期),则路由器功耗简化模型转变成式(2).

$$P_{\text{simple}}(t) = \sum_{i=1}^t \left(C_{w-\text{flit}} \times \sum_{i=1}^7 n(i, t1)_{\text{flit}_{wr}} + C_{rd-\text{flit}} \times \sum_{i=1}^7 n(i, t1)_{\text{flit}_{rd}} \right) \quad (2)$$

式中, $n(i, t)_{\text{flit}_{rd}}$ ($n(i, t)_{\text{flit}_{wr}}$)是 t 时钟周期第 i 个输入通道读(写)操作的次数,其值为0或1; m 是采样时间窗,只有特定时间段内产生的功耗才对芯片温度变化具有意义, m 在不知道具体热耗散参数的情况下,取1是一种保守的方法.由此可见,路由器功耗简化模型可以用缓存读(写)操作次数和 $C_{rd-\text{bit}}$ 、 $C_{w-\text{bit}}$ 、 m 三个参数近似表示,复杂度低,适合于片上实现.路由协议中用到的参数Stress即为

$P_{\text{simple}}(t)$.

4 实验与分析

4.1 性能指标

本实验基于 $4 \times 4 \times 4$ 三维 Mesh 结构 NoC 模拟器模型,该模型由路由器(R)、链路和本地子系统(LS)组成,结构如图 3 所示。

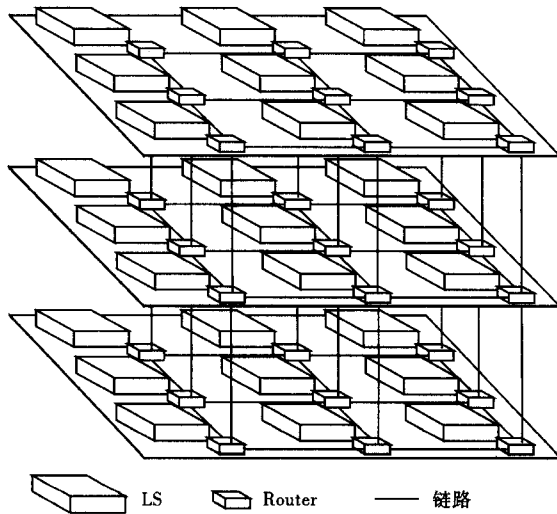


图 3 3D-NoC Mesh 结构示意图

每层平面结构见图 4。本地系统包括随机分布交通发生器(RTG)和网络接口(NI),负责数据包的发送和接收。NoC 中随机分布的通信流是通过 RTG 包注入实现的。系统参数设置为:缓存深度 16,轮转优先级仲裁规则,数据包长度为 3 个数据片(flit),数据片宽度为 35 位。功耗模型参数设置为: $C_{w-flit}=1$ 、 $C_{nd-flit}=1$ 和 $m=1$,每次模拟运行 20000 个时钟周期。

实验对象为面向功耗的路由协议(TURN-P)和面向拥塞的路由协议(TURN-C),为了使实验结果更具可比性,两种协议的路由算法载体均采用奇偶拐弯模型,都优先在竖直方向上进行传输。TURN-C 与 TURN-P 的区别仅在于 TURN-C 中的 Stress 为输入通道队列的长度,而非公式(2)定义的功耗指标,即面向拥塞的路由协议根据拥塞条件来决定路由方向。将 TURN-C 作为比较参考,一方面想说明 TURN-P 在功耗分布优化方面具有一定的潜力,另一方面想说明即使与面向拥塞的路由协议相比,TURN-P 在性能上也没有造成明显的代价。

4.2 性能指标

为了评估路由协议,本文引用文献[7]中对于功

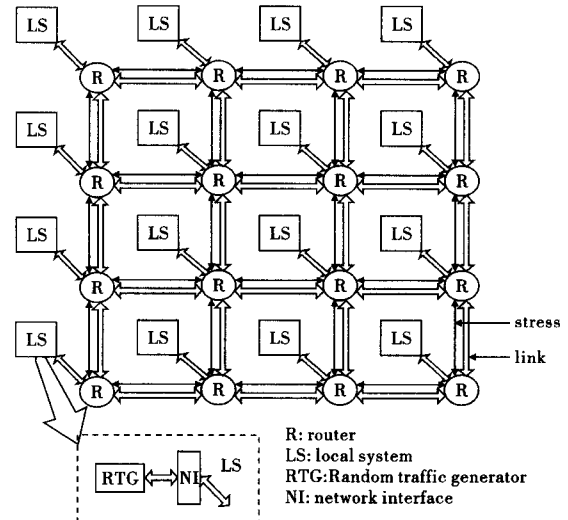


图 4 路由协议实验每层 NoC 模拟器结构

耗的评估标准,采用平均吞吐量(Throughput)、平均包延迟(Latency)和功耗(power)情况来评估网络性能。另外,为了评估面向功耗的路由协议对功耗分布优化所作的贡献,实验中具体采用的指标为功耗 $P_{\text{simple}}(t)$ 的平均值、最大值和方差:AVG-P,MAX-P 和 VAR-P。所有功耗参数的意义体现在空间维度上,在时间轴上取平均值。

4.3 实验结果

(1) 平均吞吐量

实验表明,TURN-P(P)吞吐量和 TURN-C(C)相比略低些,在低注入率和高注入率时候差距较小,在最大注入率时二者吞吐率只相差 8.65%。

(2) 平均包延迟

网络饱和前 TURN-P 的平均包延迟略高于 TURN-C,而饱和后二者几乎相等,即二者在包延迟方面几乎没有劣势。

(3) 功耗

TURN_P 和 TURN-C 相比平均功耗和最大功耗都明显要低,其中最大幅度可以低 11.57%。

图 5 显示:TURN-P 的功耗方差明显低于 TURN-C(最大低 24.61%)。功耗方差表征网络功耗分布的差异程度,其值越小说明分布越均匀,即 TURN-P 有更好的整体网络的功耗优化分布能力,能够有效的避免节点过热情况出现,提高整体网络的性能。

从总体情况看,在网络负载较轻时 TURN-P 的各指标值(吞吐率和包延迟)与 TURN-C 非常相近,特别是在负载较重时二者更为接近;而在各种注入

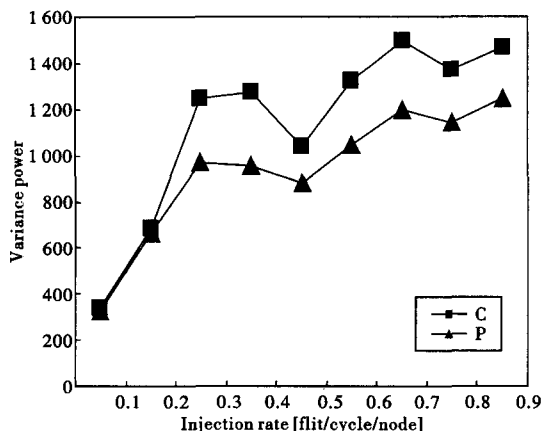


图5 功耗方差曲线

率的情况下 TURN-P 都显示出更为优化的功耗分布. TURN-P 的总体性能接近 TURN-C, 吞吐率略低(最大注入率时只下降 8.65%), 平均包延迟几乎没有下降, 但是 TURN-P 的功耗分布明显比 TURN-C 更为优化(最大功耗和功耗方差分别最大下降 11.57% 和 24.61%). 由数据对比可得功耗优化对比网络吞吐率下降要高, 说明此协议对于网络功耗分布进行了很好的优化.

5 结束语

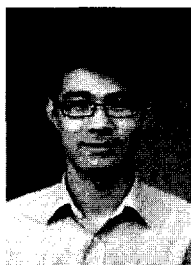
本文提出了一种面向功耗的 3D-NoC 路由协议, 对于网络功耗分布进行了很好的优化. 该协议在竖直方向上具有最高优先级, 在平面上基于奇-偶拐弯模型, 但其路由决定取决于网络功耗状况, 优先选择功耗低的路径选择路由, 而不是通常的网络拥塞状况. 为此, 采用文献[7]结果改进出 3D-NoC 路由器功耗模型. 最后, 设计了相应的路由器和 NoC 模拟器, 完成了相关实验.

实验结果显示, 与面向拥塞路由协议相比, 新协议能够明显地改善网络的功耗分布(最大功耗和功耗方差最大下降分别可达 11.57% 和 24.61%), 而网络性能的下降几乎可以忽略. 考虑到该功耗模型或许可以结合完全自适性路由算法进行优化, 下一步将对此进行更加深入地研究.

参考文献:

- [1] Boura Y M, Das C R. Efficient fully adaptive worm-hole routing in n-dimensional meshes[C]// Proc Int'l Conf Distributed Computing Systems. Taiwan: Taipei, 1994: 589-596.
- [2] Chiu C M. The odd-even turn model for adaptive routing [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2000, 11(7): 729-738.
- [3] Ming Li, Qing-An Zeng, Wen-Ben Jone. DyXY-a proximity congestion-aware deadlock-free dynamic routing method for network on Chip[C]//DAC 2006. San Francisco, California, USA, 2006.
- [4] Shang L, Peh L S, Jha N K. Powerherd: dynamic satisfaction of peak power constraints in interconnection networks[C]// ICS'03 San Francisco, California, USA, IEEE, 2003.
- [5] Claudia Rusu, Lorena Anghel, Dimiter Avresky. Message routing in 3D networks-on-Chip[C]// NORCHIP. Trondheim, 2009.
- [6] Charles Addo-Quaye. Thermal-aware mapping and placement for 3-D NoC designs[C]// SOC Conference. Proceedings IEEE International. Herndon VA, 2005: 25-28.
- [7] Sheng-guang Yang, Li Li, Yi Xu, et al. A power-aware adaptive routing scheme for network on a chip[C]// ASIC, ASICON '07. 7th International Conference on. China: Guilin, 2007.

作者简介:



秦云海 男, (1988—), 硕士. 研究方向为 3D 多核片上网络通信协议、片上网络功耗性能研究.

李丽 女, (1975—), 博士, 教授. 研究方向为多核处理器芯片体系结构及实现方法、SoC-IP 设计方法学.

虞潇 男, (1989—), 硕士. 研究方向为多核 3D 片上网络通信协议.