

# 基于 2D Mesh 的 NoC 路由算法设计与仿真

欧阳一鸣, 董少周, 梁华国

(合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009)

**摘要:**在研究 Turn Model 模型的基础上, 提出一种基于 2D Mesh 结构的 XY-YX 路由算法, 是一种确定性的无死锁的最短路径路由算法。给出无死锁的证明, 通过片上网络(NoC)模拟仿真实验平台 NIRGAM, 将该算法在一个 4×4 的 2D Mesh 网络中进行仿真, 并与 XY 路由算法及 minimal OE(odd-even)路由算法进行比较, 结果显示在转置模式和热点模式下具有良好的性能。

**关键词:**片上网络; 路由算法; 死锁; 仿真

## Design and Simulation of NoC Routing Algorithm Based on 2D Mesh

OUYANG Yi-ming, DONG Shao-zhou, LIANG Hua-guo

(Institute of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

**【Abstract】** An XY-YX routing algorithm of 2D Mesh structure is presented, which is based on researching the turn model. The algorithm is deterministic, minimal and deadlock-free. Proof of deadlock freedom is presented. The algorithm is simulated on 4×4 2D Mesh network to evaluate the performance through NIGAM experimental platform. By comparing the algorithm with XY routing algorithm and minimal odd-even routing algorithm, it shows that the algorithm had a good performance in the uniform pattern and the hot spot pattern.

**【Key words】** Networks on Chip(NoC); routing algorithm; deadlock; simulation

### 1 概述

随着半导体技术的发展, 人们不断追求高性能的高速处理机, 越来越多不同类型的处理机以及重复利用的 IP 核被集成到单个 SoC(System-on-a-Chip)芯片上。当单个芯片上集成的 IP 核数目成百上千时<sup>[1]</sup>, 基于传统总线架构的片上系统可扩展性差的问题越来越突出, 有限的地址资源将成为扩大电路规模的瓶颈。另外, 传统共享总线无法支持一对以上的用户同时通信, 基于总线结构的片上系统的时间资源利用率很低。在此基础上研究人员提出了一种基于网络和路由通信的片上网络(Networks on Chip, NoC)体系结构, 其核心思想是将计算机网络技术移植到芯片设计中, 从体系结构上彻底解决总线架构带来的问题。

NoC 不仅具有良好的空间可扩展性, 还提供了很好的并行通信能力, 提高了数据吞吐率及网络整体性能。目前拓扑结构和相关路由算法的研究是 NoC 相关研究中比较重要的 2 个方面。

### 2 NoC 相关研究

NoC 是由一组 router 和一些连接这些 router 的通道按照一定的网络拓扑组成的通用片上互连结构。图 1 显示的是基于经典 2D Mesh 拓扑结构的 NoC 模型, 其中, 每个 router 与本地资源节点 IP 核相连接, 除边缘节点外, 每个节点都与其他 4 个节点相连接。本文在 2D Mesh 结构的基础上进行路由相关方面的研究。对于确定拓扑结构的 NoC 网络, IP 核之间的数据通信方式会极大地影响网络性能, 因此, 路由算法是 NoC 网络通信研究中的关键问题。根据不同特征, 路由算法的分类也各不相同, 可以是确定性的或自适应性的。确定性路由算法是一种静态路由算法, 它在源和目的节点间定义

了唯一的一条路由通路, 如 XY 路由算法和 e-cube 路由算法, 这些算法简单且容易实现, 自适应性路由算法则在源和目的节点间提供了多条路径。自适应性是一种良好的特性, 它增大了数据包绕开热点(hot spot)及故障节点的概率, 但是硬件开销很大。目前大多数基于 FPGA 或 ASIC 的 NoC 模型都采用确定性路由算法。

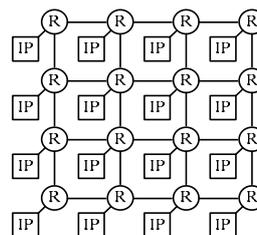


图 1 Mesh 结构的 NoC

路由算法也可以分为最短路径路由算法和非最短路径路由算法, 最短路径路由算法只选择最短路径, 从而可以降低时延。而在一些特殊情况下, 如存在故障节点时, 必须采用非最短路径路由策略, 但容易产生活锁。活锁和死锁是设计路由算法时需要考虑的 2 个关键因素。活锁是指数据包一直在网络中传输但总是到达不了目的节点的情况, 通过采用最短路径算法即可避免活锁的产生。死锁是指网络中数据包 A

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(60876028); 国家自然科学基金资助重点项目(60633060); 安徽省自然科学基金资助项目(090412034)

**作者简介:**欧阳一鸣(1963 - ), 男, 副教授, 主研方向: 嵌入式系统, 片上网络; 董少周, 硕士研究生; 梁华国, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2009-04-21 **E-mail:** ooyymbox@163.com

在节点 1 的缓冲区申请节点 2 的缓冲区,而此时节点 2 的缓冲区被数据包 B 所占用,数据包 B 又在同时申请节点 1 中数据包 A 所占用的缓冲区,两者都不释放自己占用的资源,且相互等待对方释放资源,结果产生资源依赖环,A、B 都被阻塞,即产生了死锁,如图 2 所示。

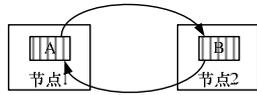


图 2 死锁

目前避免死锁的方法主要有 3 种 (1)在设计路由算法时,限制一些路由方向,破除可能的资源依赖环,进而避免死锁;(2)通过虚通道技术避免死锁;(3)通过检测发现死锁的产生,再强制破坏资源依赖环。目前大多采用前 2 种方法或者两者结合的方式来避免死锁,本文采用方法(1)设计路由算法来避免死锁。

### 3 路由算法

#### 3.1 Turn Model 模型

基于虫孔交换机制的路由算法容易产生死锁,产生死锁的原因是虫孔交换机制在传输过程中不释放节点资源,很容易形成环路。文献[2]提出了一种 Turn Model 模型,其思想是分析数据包在网络传输中存在的转向以及因转向而可能形成的环路,然后禁止网络中特定的转向来消除网络传输中的环路,从而避免死锁,最终在该模型上实现各种确定性或者自适应性的路由算法。

Turn Model 是把与每个路由节点相连接的 4 个通道分别用 N(北)、S(南)、W(西)、E(东)进行标识(边缘节点按照实际情况进行标识)。如图 3 所示。如果没有明确的区分,本文规定基于 2D Mesh 结构的 Turn Model 模型的默认转向指的是 90° 的转向。根据数据在网络中所有可能的情况,传输有 8 种转向,规定数据自东向北传输的转向标识为 EN,依此类推,自南向西的转向表示为 SW,剩下的 6 种转向分别为 ES, WN, WS, NE, NW, SE。这 8 个转向可以构成 2 个基本环:ES, SW, WN, NE 构成一个基本环;WS, SE, EN, NW 构成另一个基本环。如图 4 所示,基于 2D Mesh 结构的 Turn Model 模型通过限制这 2 个基本环中的特定转向来破坏环路,从而避免死锁。

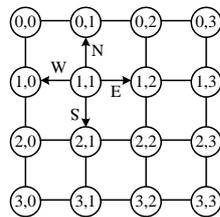


图 3 2D Mesh 节点的通道

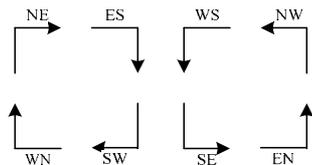


图 4 Turn Model 模型

下面以 XY 路由算法进行具体说明,XY 路由算法属于维序路由算法,先 X 维,后 Y 维,所以,它是无死锁的。如果从 Turn Model 的角度分析,XY 路由算法只用到了 Turn

Model 中 8 个转向中的 WS, EN, WN, ES。数据始终按照这 4 个转向传送数据永远不会造成死锁,如图 5 所示。其中,实线表示 XY 路由算法允许走的转向,虚线表示 XY 路由算法不允许走的转向。

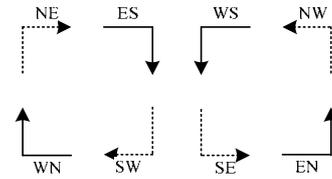


图 5 XY 路由对应的 Turn Model 模型

#### 3.2 XY-YX 路由算法

XY 路由算法的思想是先 X 方向,然后 Y 方向,虽然它是无死锁的,但是容易造成阻塞,因为数据在到达任何一个目的节点前都先从 X 方向开始,要么是 E 通道,要么是 W 通道,如果多个数据同时处在同一 X 方向上传输,对 X 方向的 E 通道和 W 通道容易造成阻塞。本文提出的 XY-YX 路由算法思想是数据并不总是先 X 方向,后 Y 方向,而是根据目的节点和当前节点的位置来选择。当目的节点 Y 方向的值小于当前节点 Y 方向的值时,即目的节点在当前节点的北边,选择先 Y 后 X;当目的节点 Y 方向的值大于当前节点对应的值时,即目的节点在当前节点的南边,选择先 X 后 Y,从而减轻 XY 路由算法在 X 方向产生的阻塞。

本算法的路由转向是选择 Turn Model 模型中的 NE, ES, WS, NW, 即路由过程只允许上述 4 个转向,见图 6。根据 Turn Model 模型,该算法所允许的转向没有依赖环的存在,所以是防死锁的。

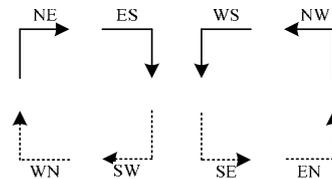


图 6 XY-YX 算法对应的 Turn Model 模型

对应模型的确定性路由算法如下(Mesh 结构节点编码参见图 3):

```

当前节点标识(xco, yco), 目的节点标识(dest_xco, dest_yco)
if(dest_xco == xco && dest_yco == yco)
return C; //将数据发向本地节点
else if(dest_xco < xco) //目的节点在北
return N; //将数据发向 N 通道
else if (dest_xco > xco) //目的节点在南
{
if (dest_yco == yco)
return S; //将数据发向 S 通道
else if (dest_yco > yco)
return E; //将数据发向 E 通道
else if (dest_yco < yco)
return W; //将数据发向 W 通道
}

```

证明算法的无死锁特性使用文献[3]提出的方法。该方法通过对网络中的通道进行特定编号,如果能使路由算法所经过的路径通道编码严格递减或递增,那么该路由算法是无死锁的。

**定理** XY-YX 路由算法是无死锁的。

证明:假设  $m \times n$  的 2D Mesh 网络的每个通道用一对数来标识,图 7 显示的是根据本文算法得到的  $m \times n$  的 2D Mesh 网络的节点通道编码。图 8 是  $4 \times 4$  2D Mesh 通道编码,通过该通道编码图可以验证 XY-YX 路由算法的无死锁特性,使用本文路由算法可以发现,任何一个节点的输出通道编码都比其输入通道编码小,也就是说数据包的路由路径是严格按照递减的顺序进行的,根据文献[3]的理论,可得出该算法是无死锁的。

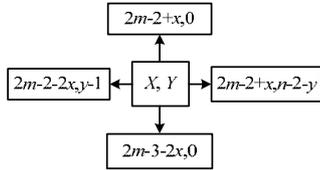


图 7 节点通道编码

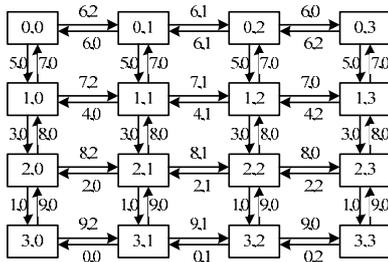


图 8  $4 \times 4$  2D Mesh 通道编码

#### 4 性能仿真分析

在 NoC 的设计应用中,衡量 NoC 网络性能的一个重要技术指标是端到端的延迟,即数据从源节点到目的节点所经历的平均时间。本设计的仿真验证是在英国南安普顿大学开发的 NIRGAM 仿真实验平台上进行的,NIRGAM 是一种基于 SystemC 语言的专门面向 NoC 研究的仿真平台,用户可以通过 NIRGAM 设置仿真的各种参数达到仿真效果,并且可以自己定制拓扑结构和路由规则实现仿真目的。

本路由算法的仿真采用  $4 \times 4$  的 Mesh 结构,交换机制采用虫孔交换机制,仿真环境中数据的最小单元是 Flit,每个数据包由 6 个 Flit 组成。仿真频率为 1 GHz,每个 Flit 之间的时间间隔为 2 ns,包之间的时间间隔由数据注入率确定。实验仿真通过 3 种模式对本文提出的算法和 XY 路由算法以及 minimal OE 路由算法<sup>[4]</sup>分别进行比较。3 种模式分别是一般模式、转置模式、热点模式。

一般模式又称为随机模式,即网络中的每个源节点以同样的几率随机地向其他节点发送数据,每次发送的目标节点都是随机产生的。图 9 示出了一般模式下的仿真实验结果。从仿真结果可知,XY 路由算法具有最低的延迟,本文算法与 XY 路由算法比较接近,而 OE 算法具有比较高的延迟,且饱和点来得比较早。

转置模式是指节点  $(i, j)$  和节点  $(j, i)$  互为源节点和目标节点,相互向对方发送数据,图 10 示出了转置模式下的仿真实验结果,从图中可以看到,本文算法与 XY 路由算法的饱和点基本一致,但平均延时比 XY 路由算法稍小。在饱和点之前,本文算法和 XY 路由算法没有任何区别,随着包注入率的不断增加,超过饱和点时,XY 路由算法的延时就超过本文算法,因为与 XY 路由算法相比较,本文算法减少了 X 方向上的堵塞。minimal OE 算法显示出比较高的延迟,而且饱和点来得比较早,当数据注入率达到 0.3 时,平均延时开始迅速增长。

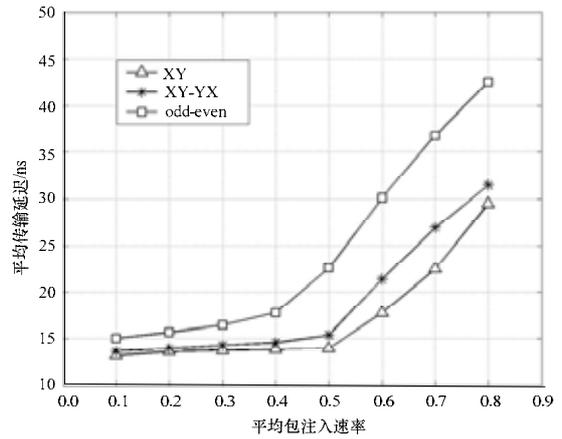


图 9 一般模式

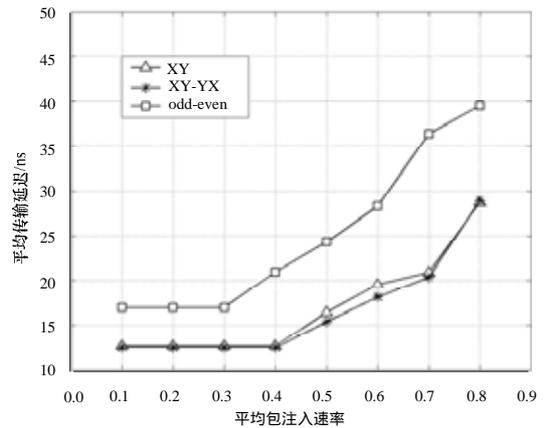


图 10 转置模式

热点模式即让某一个或几个节点成为热点,然后其他节点都向该节点发送数据。本仿真选中了 3 个热点,然后选中其他节点向热点发送数据。图 11 是热点模式下的实验结果,结果显示本文算法优于 XY 路由算法,在热点模式下,XY 路由数据注入率达到 0.4 时就进入饱和状态,而本文算法达到 0.6 才进入饱和状态。在热点模式下,目标节点固定,所以,对于确定性路由算法,路径是固定的,XY 路由算法总是从 X 方向开始,则更容易在 X 方向产生堵塞,而本文算法正是在该方面作了改进,与 XY 路由算法相比,具有更低的延迟,OE 算法在热点模式下略优于本文算法,因为 OE 算法具有一定的自适应性。

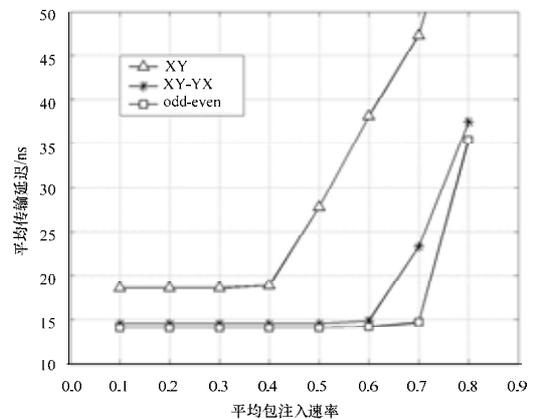


图 11 热点模式

(下转第 235 页)