

# 基于对角互连网格拓扑结构的片上网络

欧阳一鸣, 朱兵, 梁华国, 冯伟

(合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009)

**摘要:** 对二维网格拓扑结构进行改进, 给出对角互连的 DMesh 结构和对角互连且边界节点互连的 DTorus 结构, 针对 2 种拓扑结构分别提出 DXY 路由算法和 TDXY 路由算法。仿真实验结果表明, DMesh 和 DTorus 结构可以节省网络节点间的路由通道数, 减少平均传输延迟, 增加吞吐量, 使路由路径更加多样化。

**关键词:** 片上网络; 拓扑结构; 路由算法

## Networks on Chip Based on Diagonal Interlinked Mesh Topology Structure

OUYANG Yi-ming, ZHU Bing, LIANG Hua-guo, FENG Wei

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

**【Abstract】** This paper improves the 2D mesh topology structure. DMesh which connects the diagonal of the 2D mesh and DTorus which connects the diagonal and subtense of 2D mesh are presented. Corresponding routing algorithms named DXY and TDXY are proposed. Experiments are obtained by simulating the routing process and the results demonstrate that DMesh and DTorus topology economizes the amount of routing path, decreases average communication delay, increases throughput and enriches the routing paths.

**【Key words】** Networks on Chip(NoC); topology structure; routing algorithm

### 1 概述

在片上网络(Networks on Chip, NoC)中,网络拓扑结构起着决定性的作用,决定了一款 NoC 芯片的性能,并且深刻影响其通信架构的传输能力。

NoC 的研究通常涉及以下几种拓扑结构:蜘蛛网(spidergon),肥胖树(fat tree),环(ring),网格(mesh)以及带环网格(torus)等。NoC 中拓扑结构的选择必须综合考虑各种因素。首先要权衡芯片架构复杂度与成本、芯片本身的处理特性与应用目标等。在通信架构方面,必须斟酌拓扑结构的路径平均距离、可扩展性、节点数量、网络直径等。总之, NoC 拓扑结构的选择对产品的最终性价比具有决定性的影响,选择正确的拓扑结构能有效地缩短各种应用的设计及验证时间<sup>[1-2]</sup>。

从某种意义上说,网络拓扑结构决定了网络的路由算法, NoC 中针对不同的网络拓扑结构采用不同的路由算法,文献[3]把 NoC 中的路由算法归结为 2 大类:

(1)确定性路由(deterministic routing)。路径完全由源地址和目地址决定。这种路由方式的优点是路由器设计简单,网络不拥塞时具备低延迟和无死锁。但是,在网络环境复杂和网络负载加重的情况下,由于不能动态适应网络环境,因此吞吐量会下降。

(2)自适应路由(adaptive routing)。每个包的路径是依据动态的网络环境确定的。自适应路由的优点是能够避免拥塞和提高吞吐量。然而,该路由算法需要更多的逻辑资源,从而导致延迟的增加。

NoC 中最基本的路由算法是 XY 路由算法,这是一种确定性路由算法。在 XY 路由算法中,数据包首先在 X 轴方向

传输,然后在 Y 轴方向传输,直到目的地。XY 路由算法在负载较轻的条件下良好地工作;但在负载加重时,性能会变差。对于网络负载加重的情况,文献[4]提出了一种自适应路由模式,这种在不同网络状况下分别采用 XY 路由模式和自适应路由模式的路由算法称为 DyAD routing。

通常,路由算法分为通用网络的路由算法和专用网络的路由算法,前者对某种专用网络效率不高,后者利用专用网络拓扑的特性来提高路由效率。

由于 NoC 与宏观网络的差异,许多研究者对以前存在的路由算法进行了改进,从而形成了专门针对 NoC 的路由算法,以便更好地适应 NoC 的特性。在设计 NoC 的路由算法时,应该考虑宏观网络与 NoC 的差异,即在 NoC 上硬件实现时,要求设计出比宏观网络更简单的路由器,实现路由和交换等功能,并且能满足节约硅片资源和降低延迟的要求<sup>[5]</sup>。

基于上述分析,本文给出了 DMesh 结构和 DTorus 结构,并针对这 2 种拓扑结构提出了相应的 DXY 路由算法和 TDXY 路由算法。

### 2 DMesh 与 DTorus 结构

NoC 的拓扑结构多种多样,其中 Mesh 是最常见的之一。

**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;朱兵,硕士研究生;梁华国,教授,博士生导师;冯伟,硕士研究生

**收稿日期:** 2009-04-19 **E-mail:** oyymbox@163.com

Mesh 结构规则简单、易扩展，但只适合小型网络。因其结构决定通信路径较长，其路由算法多采用 XY 路由算法，如图 1 所示。

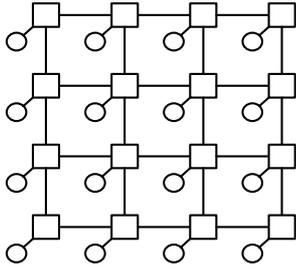


图 1 Mesh 结构模型

DMesh 结构将 Mesh 结构中在对角线位置上的节点通过对角线互联，如图 2 所示。

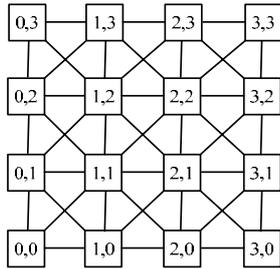


图 2 DMesh 结构模型

DTorus 结构将 DMesh 结构中位于边界位置上的节点通过连线互联，如图 3 所示。

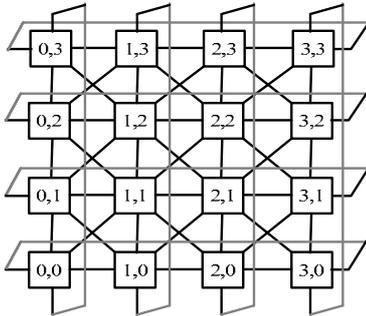


图 3 DTorus 结构模型

表 1 给出了一些典型规则拓扑结构的特性，这些参数通常用于评估网络的复杂性、通信效率和成本等，是选择网络拓扑的重要依据； $N$  是网络节点数。其中，网络直径为网络中任意 2 个节点之间最短路径的长度。从通信的角度分析，为了减少时延，网络直径应尽可能小。节点度为一个节点与相邻节点连接通道的数目。成本(链路数)为网络中连线的数量。

表 1 网络拓扑参数比较

网络	网络直径	节点度	成本(链路数)
Mesh	$2(\sqrt{N}-1)$	4	$2(N-\sqrt{N})$
DMesh	$(\sqrt{N}-1)$	8	$2(N-\sqrt{N})+2(\sqrt{N}-1)^2$
DTorus	$(\sqrt{N}-1)$	8	$2N+2(\sqrt{N}-1)^2$

### 3 DXY 与 TDXY 路由算法

为了方便描述路由算法，假定当前节点坐标为  $c(X_c, Y_c)$ ，目标节点为  $d(X_d, Y_d)$ ， $Xoffset = X_d - X_c$ ， $Yoffset = Y_d - Y_c$ ，分别表示当前节点与目标节点在 X 轴方向和 Y 轴方向的坐标偏移量。假设网络中节点均无故障。

#### (1)DXY 路由算法

DXY 路由算法尽量先沿对角线方向路由，再沿 X 轴方向路由，最后沿 Y 轴方向路由。对角走完的条件是当前节点与目标节点的 X 轴方向的坐标偏移量为 0 或者 Y 轴方向的坐标偏移量为 0。DXY 路由中 Router 的 8 个转发端口方向如图 4 所示。

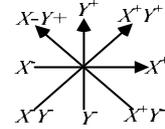


图 4 8 个端口方向

DXY 路由算法描述如下：

```

IF( $X_c \neq X_d$ ) && ( $Y_c \neq Y_d$ ) THEN
  若  $X_d > X_c$  且  $Y_d > Y_c$ ，则沿  $X^+ Y^+$  方向转发；
  若  $X_d > X_c$  且  $Y_d < Y_c$ ，则沿  $X^+ Y^-$  方向转发；
  若  $X_d < X_c$  且  $Y_d > Y_c$ ，则沿  $X^- Y^+$  方向转发；
  若  $X_d < X_c$  且  $Y_d < Y_c$ ，则沿  $X^- Y^-$  方向转发；
ELSE IF ( $X_c \neq X_d$ ) && ( $Y_c = Y_d$ ) THEN
  若  $X_d > X_c$ ，则沿  $X^+$  方向转发；
  若  $X_d < X_c$ ，则沿  $X^-$  方向转发；
ELSE IF ( $X_c = X_d$ ) && ( $Y_c \neq Y_d$ ) THEN
  若  $Y_d > Y_c$ ，则沿  $Y^+$  方向转发；
  若  $Y_d < Y_c$ ，则沿  $Y^-$  方向转发；
ELSE 转发至本地 PE；

```

#### (2)TDXY 路由算法

TDXY 路由算法是在 TXY 路由算法的基础上进行的改进。因为 DTorus 结构在 DMesh 结构基础上增加了边界上的回边，所以在路由过程中须通过比较源节点到目的节点的正向和反向坐标偏移量来判断是否走回边。正向坐标偏移量为  $Xoffset = X_d - X_c$  和  $Yoffset = Y_d - Y_c$ ，反向坐标偏移量为  $n - Xoffset$  和  $n - Yoffset$ ， $n = \sqrt{N}$ 。该算法能很好地节省路由路径，同时增加的开销也不大。此外，为了保证不出现死锁，TDXY 算法设置了 2 个虚通道(Virtual Channel, VC)。

TDXY 路由算法描述如下：

```

IF (abs(Xoffset)>n/2) THEN
  IF (Yoffset=0) THEN
    若(Xoffset>0)，则沿  $X^+$  方向转发且 VC=1；反之， $X^+$  方向转发且 VC=0；
  ELSE IF (abs(Yoffset)<n/2) THEN
    若(Xoffset>0)且(Yoffset>0)，则沿  $X^- Y^+$  方向转发且 VC=0；
    若(Xoffset>0)且(Yoffset<0)，则沿  $X^- Y^-$  方向转发且 VC=1；
    若(Xoffset<0)且(Yoffset>0)，则沿  $X^+ Y^+$  方向转发且 VC=0；
    若(Xoffset<0)且(Yoffset<0)，则沿  $X^+ Y^-$  方向转发且 VC=1；
  ELSE IF (abs(Yoffset)>n/2) THEN
    若(Xoffset>0)且(Yoffset>0)，则沿  $X^- Y^-$  方向转发且 VC=1；
    若(Xoffset>0)且(Yoffset<0)，则沿  $X^+ Y^+$  方向转发且 VC=0；
    若(Xoffset<0)且(Yoffset>0)，则沿  $X^+ Y^-$  方向转发且 VC=1；
    若(Xoffset<0)且(Yoffset<0)，则沿  $X^- Y^+$  方向转发且 VC=0；
  ELSE IF (Xoffset  $\neq$  0) THEN
    IF(Yoffset = 0) THEN
      若(Xoffset>0)，则沿  $X^+$  方向转发且 VC=0；反之， $X^-$  方向转发且 VC=1；
    ELSE IF (abs(Yoffset)<n/2) THEN
      若(Xoffset>0)且(Yoffset>0)，则沿  $X^+ Y^+$  方向转发且 VC=0；
      若(Xoffset>0)且(Yoffset<0)，则沿  $X^+ Y^-$  方向转发且 VC=1；
      若(Xoffset<0)且(Yoffset>0)，则沿  $X^- Y^+$  方向转发且 VC=0；

```

```

若(Xoffset<0)且(Yoffset<0), 则沿 X-Y-方向转发且 VC=1;
ELSE IF (abs(Yoffset)>n/2) THEN
若(Xoffset>0)且(Yoffset>0), 则沿 X+Y+方向转发且 VC=1;
若(Xoffset>0)且(Yoffset<0), 则沿 X+Y-方向转发且 VC=0;
若(Xoffset<0)且(Yoffset>0), 则沿 X-Y+方向转发且 VC=1;
若(Xoffset<0)且(Yoffset<0), 则沿 X-Y-方向转发且 VC=0;
ELSE IF (abs(Yoffset)>n/2) THEN
若(Yoffset>0), 则沿 Y+方向转发且 VC=1; 反之, Y-方向转发且
VC=0;
ELSE IF (Yoffset ≠ 0) THEN
若(Yoffset>0), 则沿 Y+方向转发且 VC=0; 反之, Y-方向转发且
VC=1;
ELSE 转发至本地 PE;

```

#### 4 仿真实验分析

本文基于 SystemC 语言分别构建了 4 个 4×4 的 NoC 模型, 分别为 Mesh 结构、DMesh 结构、Torus 结构、DTorus 结构。所有模型均采用虫孔交换机制, 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速率确定。仿真实验所采用的通信模式为转置通信模式。在转置通信模式下, 对于一个 n×n 的 NoC, 位于 (i, j) (i, j ∈ [0, n-1]) 的 IP 核只能发送数据包至位于 (n-i-1, n-j-1) 的 IP 核。仿真实验对 Mesh 结构与 DMesh 结构以及 Torus 结构与 DTorus 结构的网络性能进行了比较, 比较了其平均传输延迟和吞吐量。

在转置通信模式下, Mesh 结构和 DMesh 结构的平均传输延迟和吞吐量随数据包注入速率的变化曲线如图 5、图 6 所示。

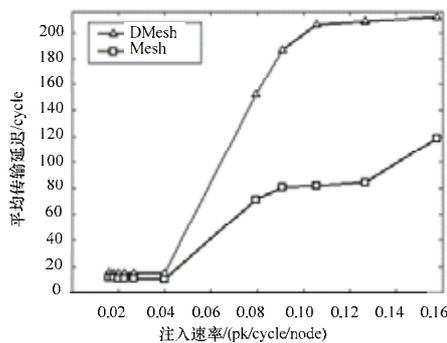


图 5 转置模式下平均延迟比较

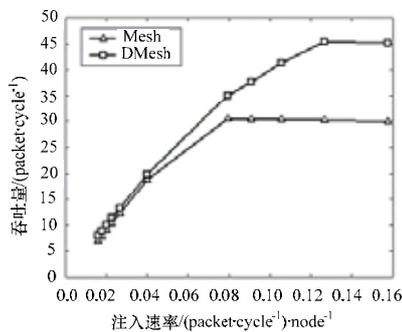


图 6 转置模式下吞吐量比较

在转置通信模式下, Torus 结构和 DTorus 结构的平均传输延迟和吞吐量随数据包注入速率的变化曲线如图 7、图 8 所示。从仿真结果来看, 在转置通信模式下, DMesh, DTorus 结构与 Mesh, Torus 结构相比, 在平均传输延迟上具有明显的优势。这主要是因为前者在后者的基础上互连对角, 增加了

对角连线, 节省了通信路径, 从而达到了减少平均传输延迟的目的。从吞吐量来看, DMesh, DTorus 结构较 Mesh, Torus 结构也具有较明显的优势, 因为前者比后者提供了更多的通道选择, 降低了拥塞和冲突的概率。

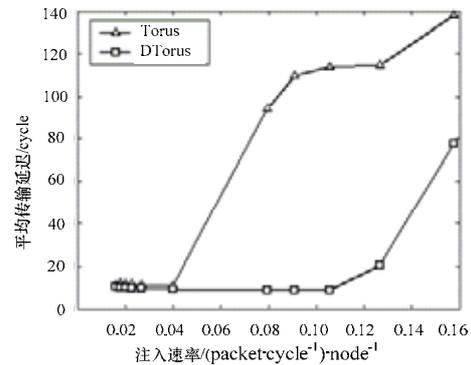


图 7 转置模式下平均延迟比较

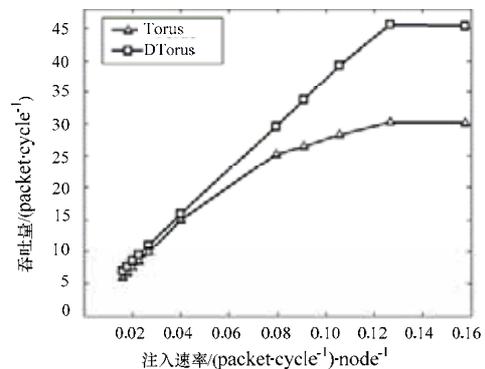


图 8 转置模式下吞吐量比较

#### 5 结束语

在 NoC 中, 网络的拓扑结构至关重要, 它决定了整个网络通信的效率和性能, 针对 NoC 中 IP 核的通信特点设计合适的拓扑结构和对应的路由算法是非常值得研究的问题。本文给出了 DMesh 结构和 DTorus 结构, 然后针对这 2 种拓扑结构提出相应的 DXY 路由算法和 TDXY 路由算法。仿真实验结果表明, 在 Mesh 结构和 Torus 结构的基础上互连对角增加了路径, 节省了通信路径, 减少了平均传输延迟, 增加了吞吐量, 丰富了路径选择, 降低了并发通信时的路由路径冲突, 提高了网络的总体通信效率。

后续工作中将加强对容错方面的研究。

#### 参考文献

- [1] Benini L, Micheli G D. Networks on Chips: A New SoC Paradigm[J]. IEEE Computer, 2002, 35(1): 70-80.
- [2] Li Yanjing, Zhang Jie. An Augmented Concentrated Mesh Network On Chip[EB/OL]. (2007-07-25). <http://www.stanford.edu>.
- [3] Rantala V. Network on Chip Routing Algorithms[R]. TUCS Technical Rep.: 779, 2006-10.
- [4] Hu Jingcao. DyAD—Smart Routing for Networks-on-chip[C]// Proc. of 2004 Design Automation Conference. San Diego, USA: [s. n.], 2004.
- [5] Daly W J, Towles B. Route Packets, Not Wires: On-chip Interconnection Networks[C]//Proc. of 2001 Design Automation Conference. Las Vegas, USA: [s. n.], 2001.

编辑 张正兴