

基于 2D Mesh 的负向优先容错路由算法研究

周 阳 吴 宁 葛 芬 李信超

(南京航空航天大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 210016)

[摘要] 针对片上网络路由节点简单、网络的通信协议不宜复杂的特点, 分析研究了 2D Mesh 拓扑结构下的 NoC 常见的路由算法。基于对转弯模型算法的研究, 提出了一种负向优先容错路由算法。该算法具有较好的自适应性、无死锁特性、灵活的绕道机制。最后对负向优先容错路由算法与其他算法的性能进行了对比分析。实验表明, 负向优先容错路由算法的时延、吞吐量优于维序路由算法。

[关键词] 片上网络 路由算法 转弯模型 负向优先容错

[中图分类号] TP302.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2012) 03-0076-04

The Negative-First and Fault-Tolerant Routing Algorithm Based on 2D Mesh in NoC

Zhou Yang, Wu Ning, Ge Fen, Li Xinchao

(College of Electronic Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the characteristics that the router in NoC is simple and network communication protocol should be simplified, this paper analyzes several routing algorithms based on 2D Mesh Topology of NoC. Based on the Turn model algorithm, this paper proposes a Negative-first and Fault-tolerant routing algorithm with the characteristics of well adaptability, deadlock-free, flexible bypass protocol. Finally, we analyze the performance of Negative-first and Fault-tolerant routing algorithm by comparison with XY routing algorithm and DyXY routing algorithm. Results show that the throughput and latency of negative-first and fault-tolerant routing algorithm are better than those of the XY dimension order routing algorithm.

Key words: NoC, routing algorithm, turning model, negative-first and fault-tolerant

片上网络(Network on chip)^[1]已经成为微电子学科研究的热点问题之一。片上网络的特点是将宏观计算机网络的技术应用到芯片设计中,它由一组路由节点(R)和一组资源节点(IP)以及一些连接这些节点的链路按照一定的网络拓扑组成。典型的基于规则 2D Mesh 拓扑结构的片上网络如图 1 所示。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,而路由算法决定着数据通信方式。本文在 2D Mesh 结构的基础上进行路由算法的相关研究,提出一种具有容错无死锁的转弯模型路由算法,该算法既具有良好的自适应性、无死锁性、同时具有灵活的容错绕道机制。

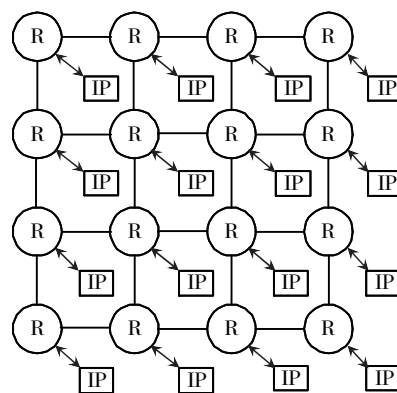


图 1 2D Mesh 片上网络结构图

Fig.1 The NOC structure of 2D Mesh

1 路由算法

路由算法是数据包在网络中传输所遵守的协议,决定数据包的传输路径。文献[2]中详细介绍了各种

收稿日期: 2012-07-14.

基金项目: 江苏省科技支撑计划(BE2010003)、航空科学基金(20115552031)。

通讯联系人: 吴宁 教授, 博士生导师, 研究方向: 数字系统理论与技术、电子系统集成与专用集成电路设计。E-mail: wunee@nuaa.edu.cn

路由算法的分类. 一般, 可以将路由算法分为确定性路由与自适应路由. 确定性路由是指源节点与目标节点间的路由路径是固定的, 没有容错能力^[3], 如 XY 路由和 e-cube 路由, 这些算法简单而且容易实现, 在 Mesh 结构中广泛应用^[4]. 自适应路由是指在源节点与目的节点之间的路由路径不固定, 可以动态地改变路由路径. 自适应路由具有增加网络吞吐率、避免死锁等特性, 但其路由算法复杂、硬件开销很大、难于实现. 常用的自适应路由算法包括伪自适应 XY 路由、转弯模型、DyXY 路由等.

路由算法必须考虑两个因素: 活锁和死锁. 活锁, 即根据路由算法, 源节点永远无法到达目的节点, 通过选择最短路径路由可以避免. 死锁是指数据包 A 由节点 1 传给节点 2 的条件是数据包 B 由节点 2 传给节点 3, 而数据包 B 由节点 2 到节点 3 传输的条件是数据包 C 由节点 3 传给节点 4, 依次类推, 形成一个循环相关链, 如图 2 所示. 要避免死锁, 需去除通道间的所有循环相关链. 目前避免死锁主要有两种方法: (1) 根据转弯模型^[5], 限制模型中一些转弯方向, 避免循环相关链的产生; (2) 采用虚通道技术, 增加节点之间的通道, 当一个通道被占用时, 可以用相邻的通道进行数据传输, 避免死锁发生.

1.1 XY 路由算法

XY 路由算法是片上网络目前最常用的一种路由算法, 该算法属于静态维序路由算法, 适用于二维网格型的拓扑结构. XY 维序路由算法的设计思路是: 数据包从源节点发送到目的节点的过程中, 若在 X 维方向需要路由则一直沿 X 维方向路由直到当前节点与目标节点在同一列, 然后沿 Y 维方向路由到达目的节点. XY 路由选择如图 3 所示, 数据包从 S1 传到 D1, 因 S1 与 D1 不在同一列, 因此 S1 先向 X+ 方向路由直到数据包在 C1 处与 D1 在同一列, 之后就向 Y- 方向路由, 直到路由到目的节点 D1.

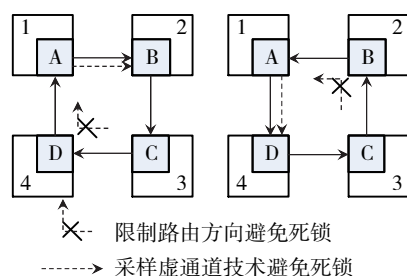


图 2 死锁及死锁的避免

Fig.2 DeadLock and DeadLock-free

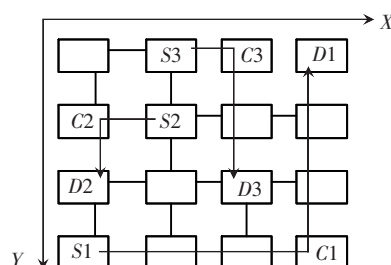


图 3 4x4 2D Mesh 路由算法示例图

Fig.3 Examples of XY routing in a 4x4 2D Mesh

1.2 DyXY 路由算法

DyXY (Dynamic XY routing)^[6] 路由算法是针对 XY 路由算法的一种改进型算法, 具有一定的自适应性. 该算法的路由决策是基于监视当前路由节点邻节点的拥塞程度, 只允许数据包在源、目节点之间选择一条最短路径传输. 如果当前节点和目的节点之间的最短路径有多条, 当前节点根据邻居节点的拥塞情况, 选择拥塞压力值最小的那个邻居节点将分组发送出去. 由于该算法限制了每一个包传输时, 只能选择一条最短路径, 避免了死锁和活锁的发生.

1.3 转弯模型路由算法

转弯模型是由 Glass 和 Ni 提出的, 提供在给定网络条件下开发最小和非最小部分自适应路由算法的系统方法^[7]. 该模型常用于 Mesh 网络无死锁路由算法的开发. 其基本思想是分析数据包在网络中可能的转向以及这些转向可能形成的环, 通过禁止一定数量的转向来破坏信道的环形依赖关系, 从而破坏死锁的形成条件. 如图 4(a) 所示, 2D Mesh 网络中有 8 种中可能的转弯以及两个可能的抽象环. 上一节中提到的 XY 路由算法通过禁止图 4(b) 所示的 4 种转弯防止死锁, 剩余的 4 个转弯不能形成环, 避免了死锁的发生. 图 4(c) 是负向优先路由算法, 通过禁止 ES 和 NW 方向的转弯, 打破 2D Mesh 结构中的两个抽象环, 避免死锁. 通过在转弯模型中禁止特定数目的转弯, 还得到了西向优先、北向最后、XY-YX 等路由算法.

2 负向优先容错路由算法

上一节分析了 2D Mesh 中常见的几种路由算法, 可以看出, XY 维序路由算法因算法简单容易实现而得到广泛应用, 但从转弯模型中也看出, 它限制了更多的转弯情况, 容易造成拥塞, 在遇到故障点时也无法灵活地避开. 而 DyXY 算法在 XY 路由算法基础上增加了监视拥塞情况, 提高了算法的自适应性, 但也增

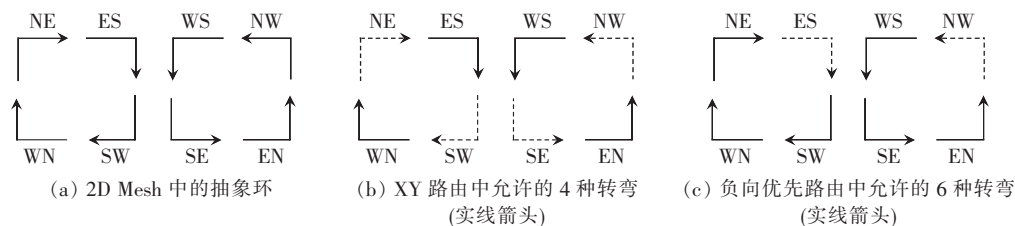


图4 2D Mesh 中的转弯模型

Fig.4 Turn Model in 2D Mesh

加了算法实现复杂度,难于实现.综合考虑下,本文以转弯模型路由算法为基础,对负向优先路由算法进行容错改进,实现无死锁容错路由.

其算法思路是:

定义1 节点路由方位坐标如下图5所示,坐标系中正方向是 $Y+$ (北), $X+$ (东), 负方向为 $X-$ (西方向), $Y-$ (南方向).

定义2 当前节点坐标 $Current_Node$ 的坐标为 (C_x, C_y) , 目的节点 Des_Node 坐标为 (D_x, D_y) , $\Delta X = D_x - C_x$, $\Delta Y = D_y - C_y$.

(1) 无故障点时,算法按照负向优先路由算法进行路由,即不允许从北向西或从东向南转弯.如图6(a)所示,数据包从 $S1$ 到 $D1$,先向西路由,后向北路由,避免了从北向西转弯的情况;而数据包从 $S2$ 到 $D2$,先向南路由,后向东路由,避免了从东向南转弯的情况;而图中 $S3$ 向 $D3$ 路由方式出现了从东向南转弯情况、 $S4$ 向 $D4$ 路由方式出现了从北向西转弯的情况,都是禁止出现的.

(2) 遇到故障点时,分情况进行绕道.

① 如果 $X < 0$ 或者 $Y < 0$,数据包在路由的时候,首先将数据包沿着西向($X-$)或者南向($Y-$),路由发送到目的节点或者途径比目的节点还要偏西或偏南的节点处,打破目的节点维序边界;如图6(b)所示, $S0$ 到 $D0$ 路由, $X < 0$,路由到 $A0$ 处遇到故障点 M ,选择向南绕道进行路由,避免向北绕道出现从北向西转弯情况.类似地, $S1$ 到 $D0$ 路由, $X < 0$,在 $B0$ 处遇到故障点,选择向西绕道进行路由,避免向东绕道出现从东向南转弯情况;图6(c)中的 $S3$ 到 $D3$ 路由, $Y < 0$,路由到 $B0$ 处遇到故障,选择向西绕道,避免向东绕道出现从东向南转弯情况.

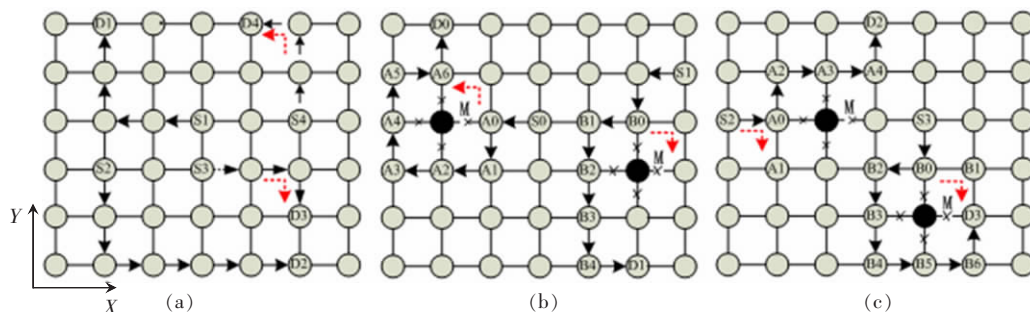


图6 负向优先容错路由算法示例

Fig.6 Example of negative-first and fault-tolerant routing algorithm

② 如果 $\Delta X > 0$ 且 $\Delta Y > 0$,将数据包沿着东($X+$)和北($Y+$)方向路由到目的节点,尽量不打破目的节点维序边界.如图6(c)所示,数据包从 $S2$ 路由到 $D2$, $\Delta X > 0$ 且 $\Delta Y > 0$,途径 $A0$ 遇到故障点 M ,因从东向南转弯被禁止,选择向北转弯路由,避开故障点.

由于本算法是在负向优先路由算法上进行绕道改进,并且绕道改进仍遵守负向优先算法的禁止转弯情况,因此,本算法仍然是无死锁的.

3 实验结果

在 NOC 设计应用中,平均延时和吞吐量是衡量 NOC 网络性能的两个重要参数,本文通过应用 NOXIM

仿真平台 构建了 4×4 2D Mesh 的网络结构. 通过调整注入率模拟不同的网络通信状态, 运行 200 000 个时钟周期, 得到 3 种算法的平均延时和吞吐量, 结果如图 7 和图 8 所示.

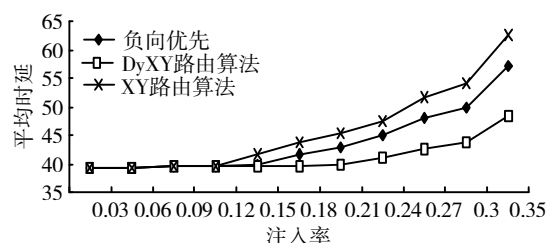


图 7 2D Mesh 路由算法延时对比分析

Fig.7 Latency of 2D Mesh in different routing algorithm

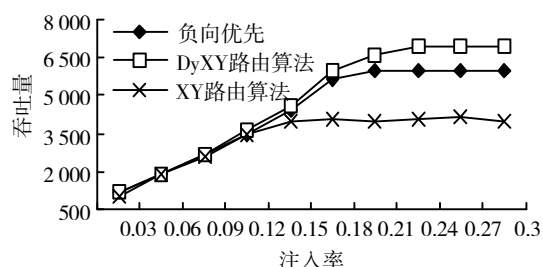


图 8 2D Mesh 路由算法吞吐量对比分析

Fig.8 Throughput of 2D Mesh in different routing algorithm

图 7 的实验结果表明, 网络注入率小于 0.12 时, 网络负载较轻, 3 种算法的延时相差不大; 当网络注入率大于 0.12 后, XY 路由算法的延时明显加大, 负向优先容错算法的延时有上升, 但相对 XY 算法较缓慢, 而 DyXY 算法则在注入率为 0.21 时才开始上升. 这是因为 XY 路由算法禁止了转弯模型中的 4 种转弯情况, 而负向优先容错算法只禁止了 2 种, 而 DyXY 对方向的选择更加灵活, 所以延时效果更好.

图 8 的实验结果表明, 负向优先容错算法的吞吐量饱和点相比 XY 路由算法要来的晚, 使负向优先容错路由算法的吞吐量要明显优于 XY 路由算法, 提高了网络负载能力, 负向优先容错算法的吞吐量与 DyXY 路由算法相比, 比较接近.

4 结语

本文分析了 NoC 中 2D Mesh 拓扑结构下的路由算法, 将无死锁的负向优先路由算法与容错特性相结合, 提出了负向优先容错路由算法. 该算法具有较好的自适应性, 并在无死锁的基础上进行容错绕道处理. 通过对负向优先容错路由算法进行性能测试, 结果表明, 负向优先容错路由算法的性能优于维序路由算法, 与 DyXY 算法相比, 也具备较好的竞争力.

[参考文献] (References)

- [1] Kumar S, Jantsch A, Soinen J P, et al. A Network on chip architecture and design methodology [C]// Proceedings of IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI. Pittsburgh, PA: IEEE Press, 2002: 105-112.
- [2] 王芳莉, 杜慧敏. 片上网络路由算法综述 [J]. 西安邮电学院学报, 2011, 16(1): 72-77.
Wang Fangli, Du Huimin. A review of Network-on-Chip routing algorithms [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunication, 2011, 16(1): 72-77. (in Chinese)
- [3] Sudeep Pasricha, Yong Zou, Dan Connors, et al. OE + IOE: A Novel Turn Model Based Fault Tolerant Routing Scheme for Networks-on-Chip [C]// Proceedings of Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES + ISSS). Scottsdale: IEEE Press, Arizona, 2010: 85-93.
- [4] 欧阳一鸣, 董少周, 梁华国. 基于 2D Mesh 的 NoC 路由算法设计与仿真 [J]. 计算机工程, 2009, 35(22): 227-229, 235.
Ouyang Yiming, Dong Shaozhou, Liang Huaguo. Design and simulation of NoC routing algorithm based on 2D mesh [J]. Computer Engineering, 2009, 35(22): 227-229, 235. (in Chinese)
- [5] Glass C J, Ni L M. The turn model for adaptive routing [C]// Proceedings of the 19th International Symposium on Computer Architecture. New York: ACM Press, 1992: 278-287.
- [6] Li Ming, Zeng Qingan, Jone Wenben. DyXY-a proximity congestion-aware deadlock-free dynamic routing method for network on chip [C]// Proceedings of 2006 Design Automation Conference. San Francisco, California: ACM Press, 2006: 849-852.
- [7] Jos'e Duato, Sudhakar Yalamanchili, Lionel M. Ni. Interconnection Networks: An Engineering Approach [M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2003.

[责任编辑: 刘 健]