

网环步进码片上网络自适应路由算法设计

肖翔, 董渭清, 文敏华

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对片上系统使用过多虚拟通道带来大量的缓存面积及能耗开销问题,提出了一种网环步进码(TSC)片上网络自适应路由算法.将网环网络中 2 个虚拟通道划分为按编码“0”或“1”数量递减或者递增的 2 个子网络,按 TSC 编码为网环拓扑结构中的网络节点进行编码,每个节点与相邻节点有且仅有一位不同,由此可以减小网络开销,避免片上死锁.实验结果表明:在均匀传输模式下,算法可为 94%的数据包提供自适应路由选择,并在不增加虚拟通道数量的前提下,提高路由算法在网络负载增大时的适应能力.

关键词: 自适应路由;二维网环;虚拟通道;步进码编码

中图分类号: TP302 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)12-0070-05

TSC Adaptive Routing Algorithm for Network on Chip

XIAO Xiang, DONG Weiqing, WEN Minhua

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A TSC(torus step coding)adaptive routing algorithm is proposed to solve the area cost and energy dissipation problems caused by using a lot of buffers in NoC (network on chip) design. Virtual channels in torus network are divided into two subnets with increasing or decreasing quantum of 0 and 1 in coding. The nodes in torus network are coded with TSC coding, and the code of one node and the code of any its adjacent node have one and only one bit different. This can reduce network overhead and avoid deadlock on chip. Experimental results show that adaptive packet routings are provided to 94% data packets under uniform transparent network, and that the algorithm can improve adaptability without using more virtual channelgs when network load increases.

Keywords: adaptive routing; 2D-torus; virtual channel; step coding

近年来,借鉴计算机网络通信技术的片上网络技术(Network on Chip, NoC)逐渐成为 SoC(System on Chip)通信技术的发展方向.路由算法是 NoC 设计中关键的组成部分,是决定 NoC 传输性能的重要因素.确定性路由的路由方式简单,其硬件容易实现,是 NoC 设计常用路由方式.随着片上节点数目和通信量的不断增长,适用于 NoC 通信的自适应路由算法已成为研究的热点.

保证路由算法无死锁是自适应路由算法要解决的首要问题,虚拟通道是解决死锁的常用方法.由于 SoC 硬件和能耗开销受限,使用较少虚拟通道实现

路由算法无死锁日渐成为新的研究课题,如网环拓扑结构下每条物理通道包含 2 个虚拟通道的确定性路由算法^[1],网环拓扑结构中使用 3 个虚拟通道的转弯模型自适应路由算法^[2].在 NoC 设计中,新增缓存会给片上节点的设计增加面积开销和运行能耗.文献[3]验证了系统中的虚拟通道缓存所占面积以及运行能耗分别占到总量的 43.93%和 44.01%,是路由功能模块中开销最大的部分.因此,本文设计了一种使用 2 个虚拟通道的 NoC 二维网环自适应路由算法.

1 算法设计

为了简化 NoC 路由算法的设计和实现,文献[4]提出基于步进码的二维网环结构编码.步进码编码方式保留了格雷码编码计算简单、高效的优点,且编码特点与二维网环拓扑结构相符,通过采用与拓扑结构相适应的节点编码方式,能够设计出具有更高效率的路由算法.本文算法采用了步进码的节点编码方式.

1.1 TSC 编码规则

网环步进码(TSC)编码规则:在大小为 $m \times n$ 的网环拓扑结构中,设任意节点的 x - y 二维坐标为 (x, y) ,其中 $x \in [0, m-1], y \in [0, n-1]$.在 x 和 y 方向,节点坐标需要用 $s_x = m/2$ 和 $s_y = n/2$ 表示.若 $x < m/2$,节点的 x 坐标步进码为 $(\underbrace{00 \cdots 0}_{(m/2)-x} \underbrace{11 \cdots 1}_x)$;若 $x \geq m/2$,则坐标步进码为 $(\underbrace{11 \cdots 1}_{m-x} \underbrace{00 \cdots 0}_{x-(m/2)})$.同理,可以得到 y 坐标步进码及节点网环步进码编码($S_{s_y-1} S_{s_y-2} \cdots S_0 S_{s_x-1} S_{s_x-2} \cdots S_0$).

1.2 TSC 编码的无环子网

按 TSC 编码为网环拓扑结构网络节点进行编码,每个节点与相邻节点有且仅有一位不同.本文将网环网络中 2 个虚拟通道划分为按编码“0”或“1”数量递减或递增的 2 个子网络.设 N_0 表示在 TSC 编码前 s_x 位中“0”的个数, c_0 和 c_1 分别表示子网 0 和子网 1 的通道.在 x 维上,对于任意两相邻节点 a 和 b ,若 $N_0(a) > N_0(b)$,则存在从 b 到 a 的虚拟通道 c_{0_ab} .同理,可得 y 维上任意两相邻节点的虚拟通道.所有的虚拟通道 c_0 和所有的虚拟通道 c_1 组成网环结构中的子网 0 和子网 1. 4×6 的网环结构子网分别如图 1 和图 2 所示.

1.3 基于 TSC 编码的自适应路由算法设计

TSC 自适应路由算法(简称 TSC 路由算法)由 2 个模块完成.模块 1 完成数据包在发送源节点根据源-目的节点相对位置确定数据包传送过程中使用的虚拟子网通道类别(见图 3), y 方向确定路由子网类别的算法同理.模块 2 根据数据包当前所在节点的位置和存储在数据包中的路由子网类别信息确定下一跳的传输通道(见图 4).

本文用 H 表示使用子网 1,用 L 表示使用子网 0,用 LH 表示先使用子网 0 再使用子网 1,其分界点是 x 维坐标为 $\underbrace{00 \cdots 0}_m$ 的节点.

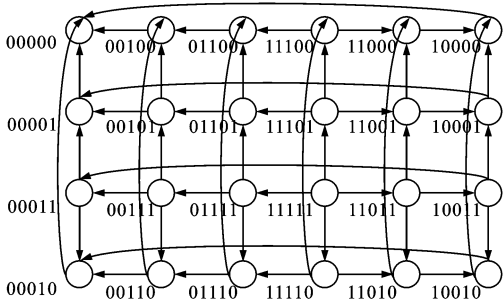


图 1 TSC 子网 0

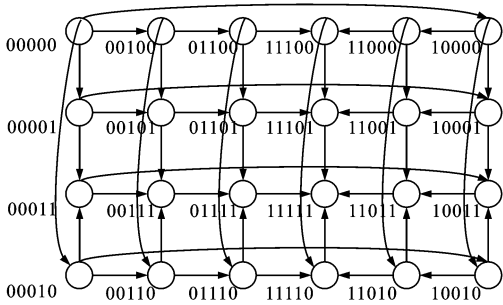


图 2 TSC 子网 1

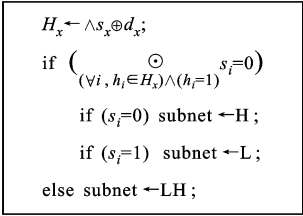


图 3 模块 1

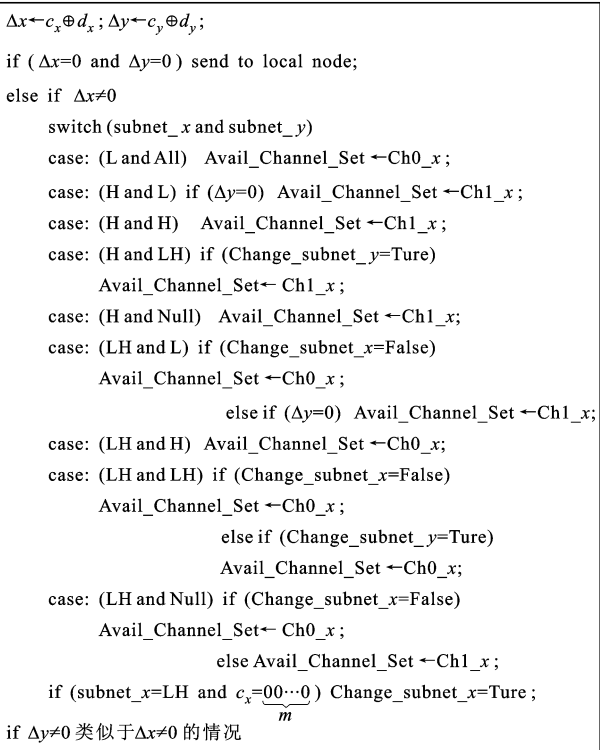


图 4 模块 2

在模块 1 中,对源-目的节点编码进行异或运算所得结果为 1 的位对应源节点编码中所有位进行同或运算的算式为

$$(\forall i, h_i \in H_x) \wedge (h_i = 1) \bigodot s_i = 0 \tag{1}$$

式中: h_i 表示源-目的节点编码进行异或运算所得结果中的任意位; s_i 表示源节点编码中第 i 位的值. 若式(1)成立,表示数据包传输过程中只需占用一类子网通道即可到达目的节点;若式(1)不成立,数据包传输需占用两类子网. 模块 1 在数据包发送源节点即可计算得到数据包路由子网类别,并将结果记录在数据包中.

算法限制数据包从子网 1 转向子网 0,因此 x 维和 y 维路由子网类别组合可能存在不同路由限制. 在 16 种子网类别组合中,只在一个方向传输的数据包无自适应性,剩余 9 种情况的路由限制及对应自适应性如表 1 所示.

2 算法分析

2.1 TSC 最短路径

在模块 1 中,若式(1)成立,表示数据传输不跨越子网,最短传输路径长度为源-目的节点对的海明距离($s \oplus d$);若式(1)不成立,表示数据包需跨越子网,其中一部分数据包的传输距离大于其源-目的节点的海明距离. 设 D_x 为数据包先在子网 0 传输然后再在子网 1 传输的距离的 x 维分量,则有

$$D_x = \text{Hamming}(s_x \oplus \underbrace{00 \cdots 0}_m) + \text{Hamming}(d_x \oplus \underbrace{00 \cdots 0}_m) \tag{2}$$

式中: s_x 表示源节点 x 维分量; d_x 表示目的节点 x 维分量. y 维方向分量同理.

2.2 死锁和活锁分析

如图 1 和图 2 所示,数据包在单一子网中不可能形成环路,因此对于单一子网中能完成传输的数据包不会产生死锁. 如果数据包传输需要跨越子网,

只存在从子网 0 转向子网 1 的通道,不存在从子网 1 转向子网 0 的通道,不会因形成环路而产生死锁. 当传输只需在单一子网中完成时,数据包按最小路径长度寻径传输,不会产生活锁,当数据包传输需要跨越子网时,数据包沿 TSC 最短路径传输,不会产生活锁. 所以,TSC 路由算法可避免死锁和活锁.

2.3 自适应性分析

如表 1 所示,只有一个维上路路由的源-目的节点对的 x 维路由子网和 y 维路由子网没有交集,并存在严格的路由先后顺序,此源-目的节点对按 TSC 路由算法进行路由不具有自适应性. 在 $m \times n$ 的网环拓扑结构中,均匀传输模式下的此类数据包所占比例为

$$\eta = \left\{ 2 \left[\sum_{i=1}^{m/2-1} i + \left(\frac{m}{2} - 1 \right) \right] \times 2 \left[j + \left(\frac{n}{2} - 1 \right) \right] \right\} / P_{mn}^2 \times 100\% \tag{3}$$

式中: $P_{mn}^2 = mn(mn-1)/2$. 在 4×6 的网环结构中, $\eta = 6.34\%$,表明这种情况下的 TSC 路由算法可为大多数数据包提供自适应性.

2.4 TSC 最短路径路由包所占比例分析

在 TSC 路由算法中,部分数据包传输会以 TSC 最短路径传输,在均匀流量模型中其所占比例为

$$\eta' = \left\{ \left[n^2 \left[2 \left[\left(\frac{m}{2} - 1 \right) - 1 \right] \right] + m^2 \left[2 \left[\left(\frac{n}{2} - 1 \right) - 1 \right] \right] - 2 \left[\left(\frac{m}{2} - 1 \right) - 1 \right] \times 2 \left[\left(\frac{n}{2} - 1 \right) - 1 \right] \right] \right\} / P_{mn}^2 \times 100\% \tag{4}$$

在 4×6 的网环结构中, $\eta = 5.79\%$,表明在 TSC 路由算法中大部分数据包能按最小传输距离传输.

2.5 具有源路由特性的分布式路由

TSC 路由算法由 2 个模块组成,模块 1 和模块

表 1 x 维和 y 维路由子网组合的路由限制及自适应性分析

子网_x	L	L	L	H	H	H	LH	LH	LH
子网_y	L	H	LH	L	H	LH	L	H	LH
路由限制	无限制	先 x 维路由,再 y 维路由	当 x 维路由到达,可在子网 1 中进行 y 维路由	先 y 维路由,再 x 维路由	无限制	y 维路由到达子网 1, x 维开始路由	当 y 维路由到达,可在子网 1 中进行 x 维路由	x 维到达子网 1, y 维开始路由	x 维和 y 维同时转向子网 1
自适应性	完全	无	部分	无	完全	部分	部分	部分	完全

2 分别在源节点和中间节点实现,该算法兼具了源路由和分布式路由的特点,与传统分布式路由相比,它简化了 NoC 分布式路由的复杂度和硬件实现难度.

3 实验与结果分析

3.1 模拟环境和参数

本文在 NIRGAM1.0 片上的网络模拟器上实现了路由算法并完成了性能参数收集.实验采用 4×6 的二维网环拓扑结构,虚拟通道数为 2.数据注入率 r_{Flit} 定义为每个节点在单位时钟周期内发送的数据片数, $0 \leq r_{\text{Flit}} \leq 1$.传输延迟

$$T_{\text{Latency}} = \sum_{i=1}^{N_1} t_i / N_1 \tag{5}$$

式中: N_1 为传输数据片数; t_i 为每个数据片的传输时间.吞吐率

$$r_{\text{Throughput}} = \frac{n_{\text{Received}}}{N_{\text{Node}} t_{\text{C}}} \tag{6}$$

式中: n_{Received} 为网络接收到的总数据包数; t_{C} 为完全一次网络传输任务的仿真时间; N_{Node} 为网络中节点的数量.

3.2 TSC 路由算法的自适应性分析

由表 2 可知,在不同网络负载环境中,按 TSC 路由算法进行路由,无自适应性数据包的比例基本稳定,保持在较低水平,且与理论分析值相符.

表 2 TSC 路由算法在不同数据注入率下的无自适应性数据比例

$r_{\text{Flit}} / \text{s}^{-1}$	0.24	0.174	0.138	0.114	0.102
n_{Send}	2880	2088	1656	1368	1224
$n_{\text{Non-Adv}}$	189.6	139.4	105.8	92.4	81.4
$\eta / \%$	6.58	6.68	6.39	6.75	6.65

注: n_{Send} 为发送的数据包数; $n_{\text{Non-Adv}}$ 为无自适应性的平均数据包数.

3.3 路由算法性能分析

图 5 和图 6 是在均匀传输模式下,TSC 路由算法和传统二维网环 XY 路由算法(传统算法)的数据传输延迟和网络吞吐率与数据注入率之间的关系.可以看出,在均匀传输模式下,传统算法的网络传输性能优于 TSC 路由算法,这是数据传输模式和传统算法相匹配的结果.图 7 和图 8 分别是 10%热点模块传输模式下,TSC 路由算法和传统算法的数据传输延迟和网络吞吐率与数据注入率之间的关系.可

以看出,在这种更为实际的非均匀传输模式下,TSC 路由算法能获得更好的网络传输性能.

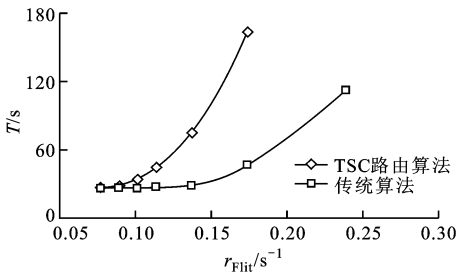


图 5 均匀传输模式下的延迟比较

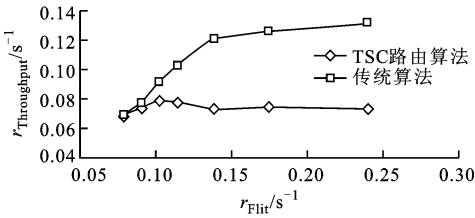


图 6 均匀传输模式下的吞吐率比较

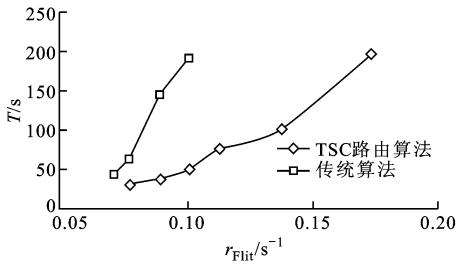


图 7 10%热点模块传输模式下的延迟比较

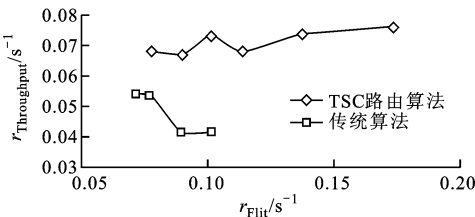


图 8 10%热点模块传输模式下的吞吐率比较

4 结束语

本文设计了一种二维网环 NoC 自适应路由算法.该算法使用较少的虚拟通道避免路由死锁问题;采用步进码为网络节点编码,利用节点编码和网环拓扑结构的匹配特点设计路由子网;结合了源路由和分布式路由的特点,使得路由过程效率更高,硬件的实现更为简单.与传统算法相比,TSC 路由算法可在不增加虚拟通道的条件下实现部分自适应性,由此提高了路由性能.

参考文献:

- [1] DALLY W J, SEITZ C L. Deadlock-free message routing in multiprocessor interconnection networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 1987, 36(5): 547-553.
- [2] 顾华玺,刘增基,王琨,等. Torus 网络中分布式自适应路由算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(3): 352-358.
- GU Huaxi, LIU Zengji, WANG Kun. Distributed adaptive routing algorithms in Torus networks[J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(3): 352-358.
- [3] ZHANG Min, CHOY C S. Low-cost VC allocation design for virtual channel wormhole routers in networks on chip [C]//2nd IEEE International Symposium on Networks-on-Chip. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 207-208.
- [4] YANG Xiaoqiang, DU Huimin, HAN Jungang. Research on node coding and routing algorithm for network on chip [C]//ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2008: 198-203.

(编辑 苗凌)