

引用格式:李娇,蔡升,郭润龙,等. 一种具有路径多样性的自适应 3DNoC 路由算法 [J]. 微电子学与计算机,2019,36(2):46-52. [LI J, CAI S, GUO R L, et al. A path-diversity routing algorithm with adaptive strategy for 3D network-on-chip [J]. Microelectronics & Computer,2019,36(2): 46-52.]

一种具有路径多样性的自适应 3DNoC 路由算法

李 娇^{1,2}, 蔡 升¹, 郭润龙¹, 冉 峰^{1,2}

(1 上海大学 微电子研究与开发中心, 上海 200072;

2 上海大学 新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海 200072)

摘 要: 针对当前三维片上网络(3DNoC)路由算法中路径单一且不能适应性调节负载而引起的网络性能受限的问题, 本文提出一种具有路径多样性特征的自适应路由算法。首先, 对现有的路由算法进行分析, 总结出最优路由路径范围并对路由策略进行建模, 使得数据包能够以最短路径路由到目的 IP。随后, 对三维片上网络路由器的负载进行分析, 得到不同位置路由器负载的规律。最后根据路由器负载态势对路由策略模型进行优化, 使网络在路径多样化条件下降低网络拥塞。实验结果表明, 在各种网络负载情况下时, 该算法大幅提高吞吐量, 并能降低数据包延时。随着网络负载的提高, 该算法依然具有优势。

关键词: 三维片上网络; 路径多样性; 自适应; 路由算法

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2019)02-0046-07

A Path-Diversity Routing Algorithm with Adaptive Strategy for 3D Network-on-Chip

LI Jiao^{1,2}, CAI Sheng¹, GUO Run-long¹, RAN Feng^{1,2}

(1 Microelectronics R&D Center, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2 Key Laboratory of Advanced Display and System Application, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The previous routing algorithm in three-dimensional network-on-chip (3D NoC) without load adjust adaptability and path diversity will degrades performance. Aiming at this problem, this paper propose a path-diversity routing algorithm with load adjust strategy. Firstly, analysing existed routing algorithm, summarize the range of optimal path and build the model of routing strategy, for data packets can be routed to the destination IP with the shortest path; Then, analysis the load of three-dimensional network-on-chip and find the law of router load in different positions. Finally, according to the router load situation, the routing strategy model is optimized to reduce the network congestion under diversified path conditions. Experimental results show that the proposed algorithm has higher throughput rate and lower latency in average than other algorithm when the network load is low. with the increasesment of load, the present algorithm still has advantages.

Key words: three-dimensional network-on-chip; path diversity; adaptability; routing algorithm

1 引言

三维片上网络是二维片上网络架构的发展, 带

来更低的连线延时与片内通信带宽的同时, 也增加了片内数据传输复杂性, 从而使网络性能受限。改进路由算法是一种提升 3DNoC 性能的有效途径^[1]。

在三维片上网络路由算法的设计中,首先需要为了提高数据路由路径的多样性,有一些路由算法选取了多条路径作为数据通路.文献[2]提出了一种去定性路由算法,会得出两个合适的路径:ZXYZ 路径与 ZYXZ 路径.文献[3]提出的一种多路径路由算法会得出三类路径:ZXXYZ 路径,XYZXY 路径和 YZXZY 路径.其中,每类路径被选择的几率是相等的.与传统的确定性路由算法一样,此类算法在网络负载较低的情况下能获得较低的延迟.而当网络负载增大或者通信情况变的复杂时,性能表现有一定提升.但这些算法的缺陷在于路径仍然较为集中,通信负载较大时仍会出现拥塞现象,片内可用路径也没有得到充分利用,还有较大改进空间.本文针对此问题进行研究.

2 路由路径分析

图1是基于 mesh 架构的三维片上网络,其中 ABC 等圆形结构表示路由器,路由器之间的连线为通信线路.在实际应用中,路由器还会与专用的计算 IP 核相连.

在三维片上网络路由过程中,根据已知目的节点与源节点的位置信息,可以计算出 X 方向,Y 方向,Z 方向路由要经过的跳数.各个方向的路由顺序可以自由选择,前提是路由算法能够确保将数据包发送到目的节点.

在图1中,假设 S 与 D 节点为一组正在进行数据交换的 IP 核.在某个时间段内,S 为初始节点,D 为目的节点.根据源节点与目的节点的位置信息,可以计算得出数据包要分别在 X,Y,Z 方向上路由 1,2,1 个跳数才能达到目的节点.路由的路径是多样化的,既可以遵从传统的 XYZ 或 ZXY 算法选择 SCEHD 路径或者 SAJID 路径,也可以交替选择各个维度上的路径,比如选择 SAFID 通路.

如图1所示,无论选择哪条数据通路,只要数据包在 X,Y,Z 三个方向上路由经过的跳数满足目的节点位置与源节点位置的差值,数据包均能以最短路径路由到目的节点.在上述情况中,最短路径的集合是以源节点和目的节点连线为对角线的长方体,如图1虚线部分所示.数据包的路由选择应在此范围之内,否则会因额外的路径路由增加延时,降低网络的吞吐率.

传统的三维片上网络路由算法只能机械的选择固定的一条或者多条路径,显然不能充分利用最短路径范围内的所有数据通路.在确定路由算法基础

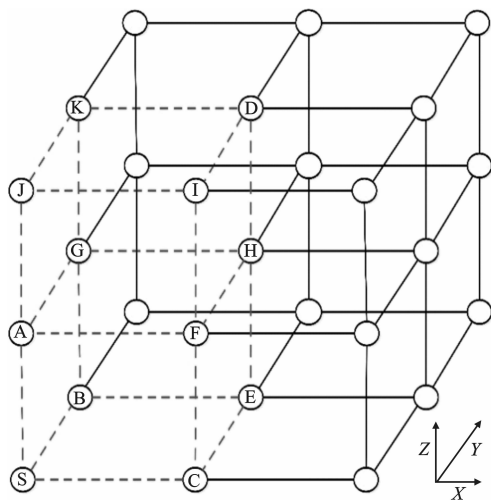


图1 最短路径范围

上发展而来的,基于转向模型的三维片上网络路由算法,由于禁用了部分或者某个方向上的路由^[4],根据源节点与目的节点的相对位置,也存在不能充分使用路径的情况.典型的算法有 XYZ 路由算法,West South First 路由算法,North Up last 路由算法等.

XYZ 路由算法首先在行(X)方向上路由数据包,随后在列(Y)方向上路由数据包,最后通过层间(Z)路由到达目的节点. West South First 路由算法首先适应性的向西(W)方与南(S)方向路由数据包,最后适应性的向下(D),向东(E),向北(N),向上(U)路由数据包,如图2所示. North UP Last 算法首先适应性的向西(W),向南(S),向下(D),向东(E)路由数据包,随后向北(N),向上(U)路由数据包.

XYZ 等路由算法只能在最短路径范围内得出一条或者多条数据通路.转向模型算法,如图2所示,由于禁止部分转向,只能在三维片上网络的某些位置达到路径多样化.

图2是转向模型算法示意图,根据图示可知,对于 West First 路由算法,只有目的节点 X 坐标大于等于源节点 X 坐标,目的节点 Z 坐标大于源节点 Z 坐标时,路由过程中才不会触发禁止转向操作.否则,路由算法会用多次的转向操作等效被禁止的转向功能,此时的路径便会成为非最小路径^[5].同理对于 North UP Last 算法,只有目的节点的 X 坐标小于等于源节点 X 坐标,目的节点的 Z 坐标小于等于源节点的 Z 坐标,路由路径才是最短的.对于 Negative First 算法,只有目的节点的 X,Y,Z 坐标分别小于源节点的 X,Y,Z 坐标或同时大于源节点

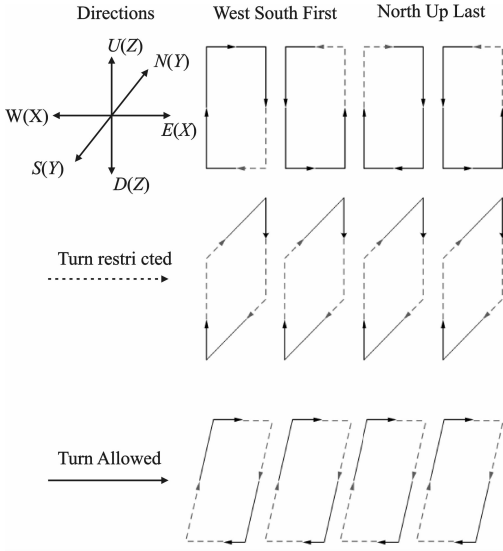


图2 基于转向模型的算法

的相应坐标时,路由路径才是最短的。

为了充分利用三维片上网络内部数据通路,需要对路由路径的多样性进行分析^[6],总结出路径选择的合理策略.首先定义路由路径的自由选择程度 PD(Path Diversity),它由路由算法,三维片上网络的结构,目的节点与源节点的距离组成三个因素决定.我们可以简单的用公式表示 PD:

$$PD = f(R, T, D(\text{local node, destination node})) \quad (1)$$

式中, R 是确定性路由算法或者转向模型算法中未用到的路径; D 是当前每组通信节点在 X, Y, Z 三个方向上的距离; T 是三维片上网络的结构与尺寸.从这个式子来看,对转向禁止程度较小的路由算法会提供较高的 PD , 相对距离较远的一组通信节点比相对距离较近的一组节点有更高的 PD , 从而有了更高的路径多样性.为了最大化路径多样性,有些路由算法使用了随机选择下一个节点的策略.如图3所示, S 节点为起始节点, D 为目的节点.根据 S 与 D 的相对位置可知 A, B, C 为三个可以选择的下一个路由节点, 被选中的概率分别为 $1/3$. 假设数据包在初始的两跳始终选择向 Z 向路由, 直到 Z 轴坐标与目标相同(即到达 J). 此时, 根据目的节点与源节点的相对位置, 可以路由的下个节点是 I 与 K , 被选中的概率为 $1/2$. 当数据包按图中所示路径选择 I 节点, 即数据包所在路由器的 X 轴, Z 轴坐标与目的节点相同时, 路由路径只有一种选择. 这种路由选择策略极大的增加了路径多样性, 但并没有给与每条路径同等的选择概率. 为简化后续分析, 用 PD 代替路

径多样性进行推导.

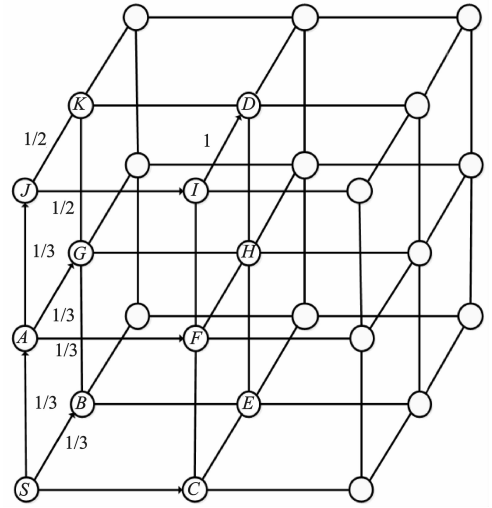


图3 等概率选择的路由算法

当数据包与目的节点未在同一平面上, 且路由所需跳数大于 3 时, 比如源节点 S . 其路径多样性 (PD), 可以用下一步可选择路由节点的路径多样性之和表示:

$$PD_S = PD_A + PD_B + PD_C \quad (2)$$

A, B, C 点的路径多样性, 可选择路径条数为:

$$PD_A = PD_G + PD_J + PD_F = 6 \quad (3)$$

$$PD_B = PD_E + PD_G = 3 \quad (4)$$

$$PD_C = PD_F + PD_E = 3 \quad (5)$$

当数据包与目的节点在同一平面, 且路由跳数大于 2 时, 比如节点 C . 其路径多样性 (PD), 也可以用以下式子表示为:

$$PD_C = PD_F + PD_E \quad (6)$$

$$PD_F = 2 \quad (7)$$

$$PD_E = 1 \quad (8)$$

上述情况下, 要使每条路径被选几率相同, 数据包向 E, F 点路由的比例应为 $1:2$. 所以, 等可能的选择数据包下一步路由节点, 并不能给与每条可用路径相同的选择概率. 数据包与目的节点的相对位置决定了可用路由节点的选择比例.

设 C_x, C_y, C_z 为当前节点的坐标, D_x, D_y, D_z 为目的节点的坐标. N_x, N_y, N_z 为数据包从源节点到目的节点所要路由的跳数. 三维 mesh 结构的片上网络中, 可以遍历的最短路径数量 PD 的计算公式为:

$$PD_x = \frac{(N_x + N_y + N_z)!}{N_x! N_y! N_z!} \quad (9)$$

假设数据包从源节点路由到目的节点, 在 XYZ 方向, 下一节点的路径多样性为.

$$PD_z = \frac{(N_x + N_y + (N_z - 1))!}{N_x!N_y!(N_z - 1)!} \quad (10)$$

$$PD_y = \frac{(N_x + (N_y - 1) + N_z)!}{N_x!(N_y - 1)!N_z!} \quad (11)$$

$$PD_x = \frac{((N_x - 1) + N_y + N_z)!}{(N_x - 1)!N_y!N_z!} \quad (12)$$

要想给与每条路径相同的选择概率,数据包向 X, Y, Z 方向路由概率的比例($P_x:P_y:P_z$)为:

$$\frac{PD_x}{PD_y} = \frac{((N_x - 1) + N_y + N_z)!}{(N_x - 1)!N_y!N_z!} \cdot \frac{N_x!(N_y - 1)!N_z!}{(N_x + (N_y - 1) + N_z)!} = \frac{N_x}{N_y} \quad (13)$$

$$\frac{PD_z}{PD_y} = \frac{(N_x + N_y + (N_z - 1))!}{N_x!N_y!(N_z - 1)!} \cdot \frac{N_x!(N_y - 1)!N_z!}{(N_x + (N_y - 1) + N_z)!} = \frac{N_z}{N_y} \quad (14)$$

$$P_x:P_y:P_z = N_x:N_y:N_z = (D_x - C_x):(D_y - C_y):(D_z - C_z) \quad (15)$$

当数据包所在当前节点与目的节点在同一平面时(假设同在 XY 平面). 从上可知,数据包路由可用的下一节点的路径多样性为:

$$PD_x = \frac{((N_x - 1) + N_y)!}{(N_x - 1)!N_y!} \quad (16)$$

$$PD_y = \frac{(N_x + (N_y - 1))!}{N_x!(N_y - 1)!} \quad (17)$$

该情况下,要使剩余路径被相同的几率选中,数据包向 X, Y 方向的路由概率为:

$$\frac{PD_x}{PD_y} = \frac{((N_x - 1) + N_y)!}{(N_x - 1)!N_y!} \cdot \frac{N_x!(N_y - 1)!}{(N_x + (N_y - 1))!} = \frac{N_x}{N_y} = \frac{D_x - C_x}{D_y - C_y} \quad (18)$$

$PD_{(1,1,0)} = PD_{(1,1,1)} + PD_{(2,1,0)} + PD_{(1,2,0)}$ 当数据包当前所在节点与目的节点在同一直线上时,路由方向的选择是确定的.

$$PD_{(0,2,0)} = PD_{(0,2,1)} + PD_{(1,2,0)} \quad PD_{(2,0,0)} = PD_{(2,0,1)} + PD_{(2,0,2)} = PD_{(1,0,2)} + PD_{(2,0,1)}$$

图4为总结得出路由概率选择模型,源节点为 S 点,目的节点为 D 点. 假设 S 点坐标为 $(0,0,0)$. 对于 A 点,它的下一步可路由节点为 G, F, J 点. 经计算可得:

$$PD_J = PD_I + PD_K = 6 \quad (19)$$

$$PD_G = 12 \quad (20)$$

$$PD_F = 12 \quad (21)$$

显然路由选择模型能够正确的表示下一步路由方向的选择概率.

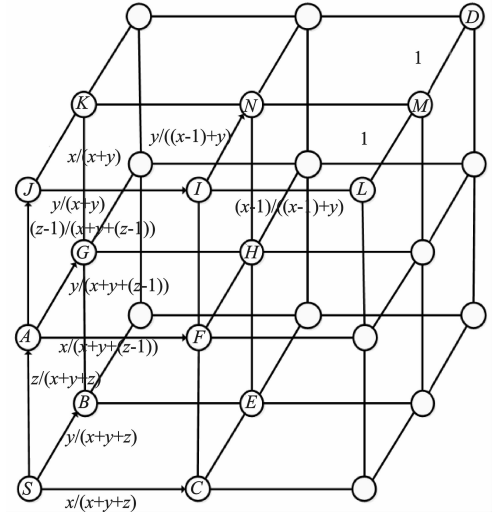


图4 路由概率选择模型

3 路由器负载分析

在三维片上网络路由算法的设计中,路由器的负载是需要关注的问题. 当NoC内部多对IP核进行通信时,传统的确定性路由算法仅提供较少的路径,当通信负载较大时,数据包路由路径较易发生较多重合. 相关路由器会工作在高负荷状态,容易因过热保护而降频,甚至引发永久性的电路故障^[7]. 数据包也极易发生阻塞与冲突,使得网络性能受限. 上述路由策略等可能的选择可用了路径,但也使得部分路由器节点承受了较大的负载,需要进一步改进路由模型.

如图4所示,设相互通信的一组IP核节点是 $S(0,0,0)$ 与 $D(2,2,2)$. 当数据包从 S 往 D 发送时: 其中:

$$PD_{(0,0,0)} = PD_{(0,1,0)} + PD_{(1,0,0)} + PD_{(0,0,1)} \quad (22)$$

$$PD_{(0,1,0)} = PD_{(0,1,1)} + PD_{(0,2,0)} + PD_{(1,1,0)} \quad (23)$$

$$PD_{(0,0,1)} = PD_{(0,0,2)} + PD_{(0,1,1)} + PD_{(1,0,1)} \quad (24)$$

$$PD_{(1,0,0)} = PD_{(2,0,0)} + PD_{(1,0,1)} + PD_{(1,1,0)} \quad (25)$$

$$PD_{(0,1,1)} = PD_{(1,1,1)} + PD_{(0,2,1)} + PD_{(0,1,2)} \quad (26)$$

$$PD_{(1,0,1)} = PD_{(1,1,1)} + PD_{(1,0,2)} + PD_{(2,0,1)} \quad (27)$$

$$PD_{(1,1,0)} = PD_{(1,1,1)} + PD_{(2,1,0)} + PD_{(1,2,0)} \quad (28)$$

$$PD_{(0,0,2)} = PD_{(1,0,2)} + PD_{(2,0,1)} \quad (29)$$

$$PD_{(2,0,0)} = PD_{(2,1,0)} + PD_{(2,0,1)} \quad (30)$$

$$PD_{(0,2,0)} = PD_{(0,2,1)} + PD_{(1,2,0)} \quad (31)$$

综上可得:

$$PD_{(0,0,0)} = 6PD_{(1,1,1)} + 3(PD_{(0,2,1)} + PD_{(0,1,2)} + PD_{(2,1,0)}) + 3(PD_{(1,2,0)} + PD_{(1,0,2)} + PD_{(2,0,1)}) \quad (32)$$

显然,在越靠近源节点与目标节点连线的路由器节点其负载较大.造成这种情况的原因是:根据路径最大化的路由选择策略与数据包当前位置,尽管会在X,Y,Z方向给出不同的选择概率,当数据包路由到最短路径范围的边缘时,仍然有很大几率向最短路径范围内部路由.特别是靠近源节点与目的节点对角线附近的节点,路由到目的节点所需经过的X,Y,Z跳数非常接近,数据包向内路由的概率非常大.

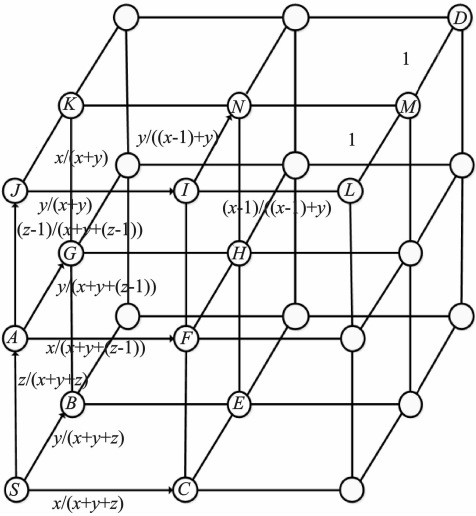


图4 路由模型的改进

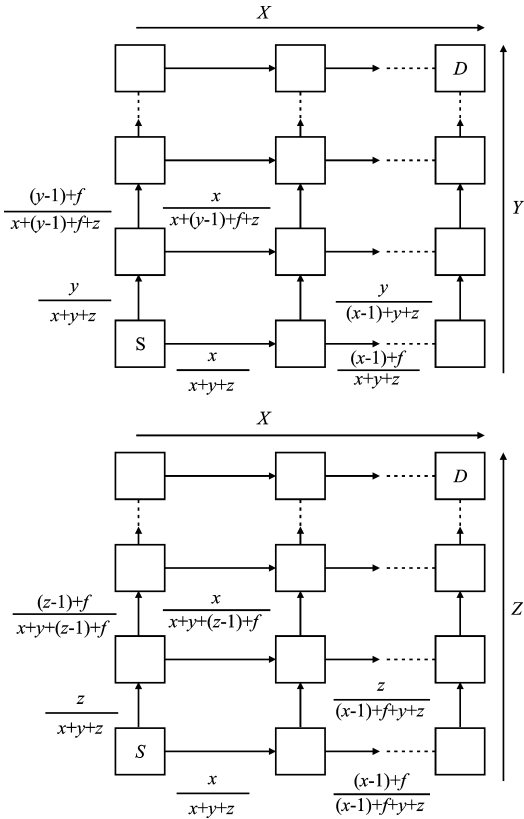


图5 改进的路由模型

4 路由模型的改进

为了改善上述情况,需要适当的减少数据包向最短路径范围内部传输的几率.即当数据包传输方向与最短路径范围的表面平行时,以更大的概率朝着与范围表面平行的方向传输.如图5所示,当数据包从原点出发时,数据包依据 $x:y:z$ 的概率向X,Y,Z方向路由.在其它节点,存在三种情况:当数据包从X方向进入路由器节点时,路由概率则变为 $(x+f):y:z$;当数据包从Y方向进入路由器时,数据包根据 $x:(y+f):z$ 的概率分别向X,Y,Z方向进行路由.当数据包从Z方向向进入路由器节点时,依据 $x:y:(z+f)$ 的概率向X,Y,Z方向进行传输.直观上来看,当 $f=0$ 时,每条路由路径被选择的几率是相同的.随着 f 的增加,数据包不会进行过多的转弯,即向内转弯的几率变小,沿着最短路径范围边缘传输的几率变大.大部分数据包路径从源节点与目的节点连线附近转移到了最短路径范围的边缘.当 f 趋向于无穷大时,路由路径会完全集中在最短路由范围的边缘.

f 参数对路由器负载的影响如图6所示.较小的 f 参数能够提供较多的路径多样性,大部分数据包路由路径接近源节点与目的节点的连线,也会增加路由范围中心位置数据包的冲突与拥塞.同时,路由范围边缘的数据通路很少被使用,利用率很低.较大的 f 会减少路由范围内部路径的使用率,同时增加路由范围边缘的数据包拥塞与冲突.最短路由范围内的路由器数量随着源节点与目的节点相对距离的增加而增长,而且越接近路由范围的边缘,路由器的数量越多.需要合理的定义 f 参数的选取规律,适应不同的通信情况.

假设源节点为 (S_x, S_y, S_z) ,目的节点为 (D_x, D_y, D_z) ,整个三维片上网络结构在X,Y,Z方向上的路由器个数为 N_x, N_y, N_z .则最短路径范围在X,Y,Z方向上的路由器个数为 $D_x - S_x + 1, D_y - S_y + 1, D_z - S_z + 1$.参数 f 可以用源节点与目的节点坐标信息,片上网络结构信息表示为:

$$f = f_{scale} \cdot \left(\frac{(D_x - S_x + 1) \cdot (D_y - S_y + 1) \cdot (D_z - S_z + 1)}{N_x \cdot N_y \cdot N_z} \right) \quad (33)$$

式中, f_{scale} 为自定义的缩放参数,根据图7图8所示的实际实验结果,选择为1.此参数选择策略能够较好的平衡路由范围边缘路由使用率与内部路由数据冲突这两个因素,具有一定的自适应性.

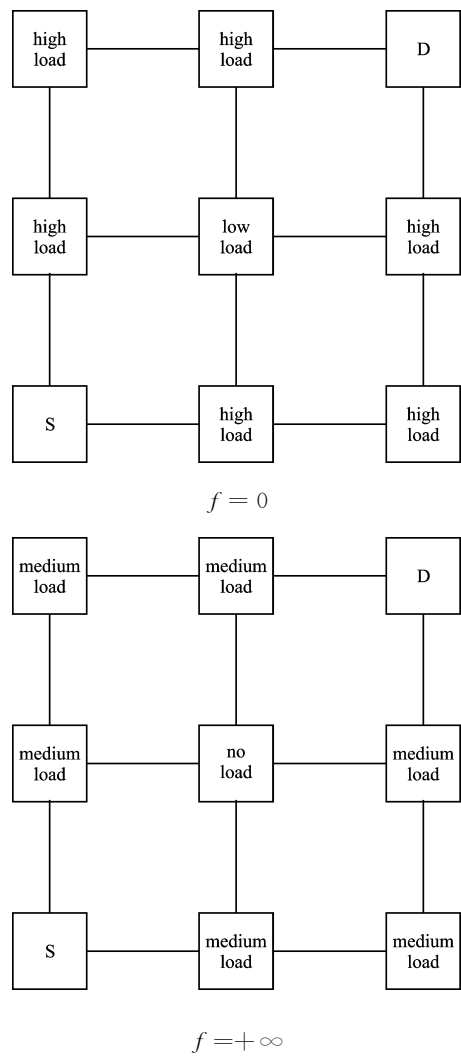


图 6 f 参数对路由器负载的影响

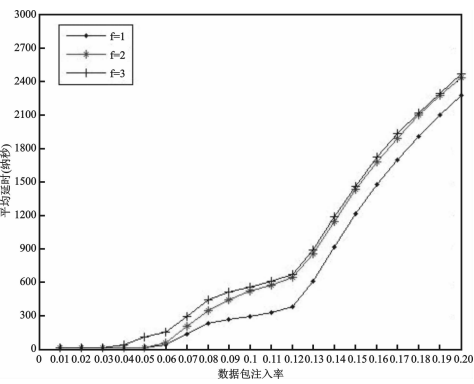


图 7 f 不同时平均延时比较

5 实验结果与分析

为了测试本文提出的算法,采用 AccessNoxim 仿真器进行了仿真验证. AccesNoixm 是一种基于 System C 的片上网络仿真器,源代码开放,拓展性好,可以对二维或者三维片上网络进行仿真,得出指

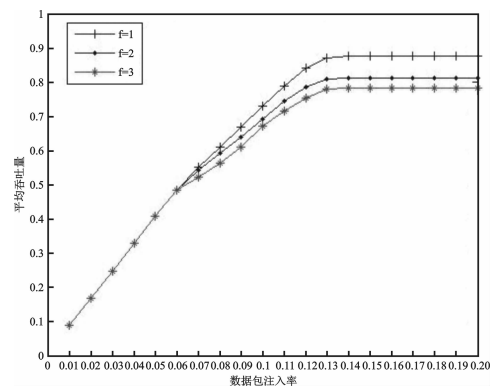


图 8 f 不同时平均吞吐量比较

定算法下片上网络的平均延时,吞吐量的性能指标. 仿真器的主要参数如表 1 所示:

表 1 仿真器参数配置表

Network parameter	Value
Topology	$4 \times 4 \times 4$ 3D Mesh
Selection strategy	random
Buffer depth	4 Flits
Packet size	8 Flits
Simulation time	10 000 Cycles

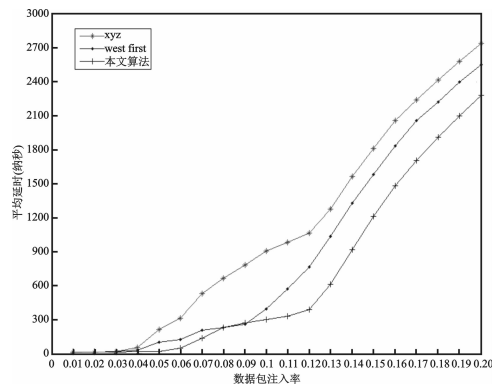


图 9 算法平均延时比较

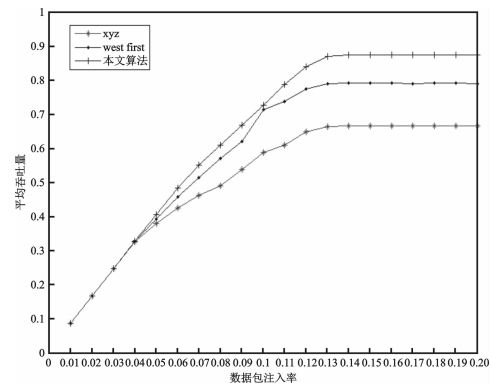


图 10 算法平均吞吐量比较

图 9 为本文算法与确定性算法的平均延时性能比较。总体上来看,确定性路由算法的平均延时性能最低。基于转向模型的算法有一定的适应性,平均延时较确定性路由算法有很大改善。在数据包注入率较低,即网络通信负载教低时,尽管确定性路由算法和转向模型算法会重用路由器节点,由于数据包数量较少,远低于路由器最大负载,各种算法性能区别不大。当数据包注入率上升,即网络通信增大时,确定性路由算法的延时急剧上升,具有部分适应性的转向模型算法的延时也随之上升。本文提出的算法在负载较大时仍然保持了较好的延时性能,相比以上基于转向模型的算法有 12% 的提升。

图 10 为本文算法与确定性路由算法和转向模型算法在不同数据包注入率下的吞吐量对比图。当数据包注入率小于 0.04 时,本文算法与对比算法的吞吐量性能差别不大。原因是尽管多对 IP 核之间数据包路由路径存在重合,但由于数据包数量较少,在重合路径上的路由器并未工作在最大负载条件下。当数据包注入率继续上升时,确定性路由算法的吞吐量并未随着数据包数量的提升而增加,反而最早出现了大幅下降的情况。基于转向模型的部分自适应算法的吞吐量性能下降程度较少,相比确定性路由算法有较大改善。本文由于具有路径多样性与平衡路由器负载的特点,在较宽的注入率范围内,其吞吐量一直随着数据包注入率的上升而提高。在数据包注入率超过 0.13 后,三类算法的吞吐量区域平缓,达到了上限。本文算法相对于确定性路由算法和转向模型算法分别有了 29%,10% 的提高。

6 结束语

本文提出一种具有路径多样性的自适应三维片上网路路由算法。在最短路由范围内,该算法能够决定每条可用路径的选择概率,并且针对源节点与目的节点位置信息与网络规模,能够对内部路由器负载进行调节,减少数据包冲突与拥塞。实验结果表明,路由策略,并保证数据包在网络中的传输是无死锁的。实验结果表明,本文采用的算法能够在一定程

度上自适应的调节路由器负载,在吞吐量与数据包平均延时方面由于传统的确定性路由算法以及转向模型算法。

参考文献:

- [1] Routing algorithms in networks-on-chip[M]. New York: Springer, 2014.
- [2] Ramanujam R S, Lin B. Randomized partially-minimal routing on three-dimensional mesh networks[J]. IEEE Computer Architecture Letters, 2008, 7(2): 37-40.
- [3] Sun G, Chang C W, Lin B, et al. An oblivious routing algorithm for 3D mesh networks to achieve a new worst-case throughput bound[J]. IEEE Embedded Systems Letters, 2012, 4(4): 98-101.
- [4] Chiu G M. The odd-even turn model for adaptive routing[J]. IEEE Transactions on parallel and distributed systems, 2000, 11(7): 729-738.
- [5] Tsai W C, Chu K C, Hu Y H, et al. Non-minimal, turn-model based NoC routing[J]. Microprocessors and Microsystems, 2013, 37(8): 899-914.
- [6] Chen Y Y, Chang E J, Hsin H K, et al. Path-Diversity-Aware Fault-Tolerant Routing Algorithm for Network-on-Chip Systems[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2017, 28(3): 838-849.
- [7] Chen K C, Kuo C C, Hung H S, et al. Traffic-and thermal-aware adaptive beltway routing for three dimensional network-on-chip systems[C]. Circuits and Systems (ISCAS), 2013 IEEE International Symposium on. IEEE, 2013: 1660-1663.

作者简介:

李 娇 女,(1975-),博士,讲师。研究方向为集成电路可测试性设计。

蔡 升 男,(1994-),硕士研究生。研究方向数字集成电路设计。

冉 峰(通讯作者) 男(1954-),教授,博士生导师。研究方向为 SoC 设计,OLED 显示驱动等。

E-mail: ranfeng@shu.edu.cn.