

文章编号: 1001-2486(2011)06-0036-06

面向片上网络的多播吞吐率和能量模型^{*}

齐树波¹ 蒋江² 李晋文¹ 张民选¹

(1. 国防科技大学 计算机学院 湖南 长沙 410073; 2. 上海交通大学 微电子学院 上海 200240)

摘 要:片上网络逐渐成为片上众核中非常有前景的互连方式。基于目录的 cache 一致性协议的维护需要片上互连网络高效的支持多播。在借鉴单播的网络吞吐率模型基础上,建立了面向多播的网络吞吐率模型和体系结构级的能量模型。相对于传统的多播路由算法,负载均衡维序路由算法(BDoR)和最小路径维序路由算法(MPDoR)通过平衡 X 和 Y 两个方向上的网络负载,从而能够获得较大的网络吞吐率。基于功能模拟器的模拟结果显示:在 4×4 的 Mesh 网络中,随机广播通信下,MPDoR 算法的网络吞吐率是 XY 多播路由算法的 1.6 倍;网络输出加速比为 2 时,网络才能够进入饱和状态;MPDoR 算法下网络消耗能量与 OPT 算法相当。

关键词:片上网络;多播;吞吐率;能量;路由算法

中图分类号:TP332 **文献标识码:**A

Throughput and Energy Model of Multicast Communication in Networks on Chip

QI Shu-bo¹, JIANG Jiang², LI Jin-wen¹, ZHANG Min-xuan¹

(1. College of Computer, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China

2. School of Microelectronics, Shanghai Jiao Tong Univ, Shanghai 200240, China)

Abstract: Networks-on-Chip (NoC) has become a promising interconnect solution between processor cores and cache banks in many-core-processor. Routers in the network should support multicast efficiently, due to the fact that the invalidation requests in the directory-based cache coherent protocols often cause multicasting packets. Throughput and energy model of multicast communication proposed in this paper can evaluate the network ideal throughput and energy under the different multicasting routing algorithms. Network can get higher throughput under Balanced Dimension order Routing algorithm (BDoR) and Minimal Path Dimension order Routing algorithm (MPDoR) proposed in the paper than the conventional multicast routing algorithms, because they can balance the link load between X direction and Y direction. Simulation results show that the throughput under MPDoR is 1.6 times than that under the XY multicasting routing algorithm under random broadcast traffic in the 4×4 mesh network; the link will not get saturated if the output speedup of the network is less than two; and the energy consumption under MPDoR is almost the same as that under OPT algorithm.

Key words: networks-on-chip; multicast; throughput; energy; routing algorithm

片上网络 NoC (Networks-on-Chip) 因其具有良好的扩展性、可预测的互连线延迟等优点逐渐成为处理器核心之间很有前景的互连结构,已经应用于一些原型芯片^[1]。片上多处理器中,通信类型可以分为单播和多播两种。单播通信主要是 cache 与处理器核心之间的 cache line 传输。而多播通信主要是维护 cache 一致性协议的请求报文,诸如目录一致性协议中的写无效请求和 token 一致性协议中获取 token 的广播^[2]。高效支持单播通信的路由器已经进行了深入的研究^[3-4]。高

效支持多播的路由器成为新的研究热点。在片间网络中,多播通信的研究成果主要集中在多播死锁避免机制。这些成果在 NoC 中也依然适用^[5-6]。但是 NoC 面临着有限存储资源、低功耗和低延迟的约束。因此面向 NoC 支持多播面临着与片间网络不同的挑战。VCTM 是一种基于 XY 多播路由算法的路由器^[7]。虚拟链路建立需要单播实现,增加了报文延迟。面向连接的多播是基于路径的路由算法,路径建立依然需要通过单播实现^[8]。OPT 是一种针对功耗优化的基于

* 收稿日期:2011-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60873212、60970036、61003075);国家“核高基”重大专项“超高性能 CPU 新型架构研究”资助项目(2011ZX01028-001-001)

作者简介:齐树波(1982—)男,博士生。

分支树的路由算法^[9]。虽然这些研究成果能够有效地支持多播。但是没有从理论上分析网络在特定路由算法下所能够达到的理想性能。借鉴单播通信下网络吞吐率模型的建立方法^[10],本文建立了面向多播通信的网络吞吐率模型。

同时, NoC 成为多核处理器中的一个重要的功耗消耗部件。在 RAW 处理器中,互连网络消耗整个芯片功耗的 36%^[11]。ORION 功耗模拟器从晶体管级、电路级建立了路由器的功耗模型^[12-13]。本文在这些研究基础上,假定每个跳步消耗相同的能量,建立了 NoC 在给定多播路由算法下消耗的能量模型。

本文采用吞吐率和能量模型评估已有的多播路由算法的性能。在此基础上,提出了两种多播路由算法:负载平衡排序路由算法 BDoR 和最小路径排序路由算法 MPDoR。

1 多播吞吐率模型

网络拓扑结构可以抽象为图,由节点集合 N 和连接节点的有向边集合 C 构成。 $S(N)$ 和 $S(C)$ 分别表示两个集合中元素的个数。采用如下定义来建立多播吞吐率模型。

定义 1 多播注入率 α 表示网络中每个节点每个时钟周期向网络中注入的多播报片数量($\alpha \leq 1$)。假设 d 为多播报片的目标节点数量,那么注入一个多播报片相当于注入 d 个单播报片。

定义 2 多播目标节点集合 $A = \{a_i | a_i \in N\}$, 即 $A \subseteq N$ 。表示一个多播报片同时被 A 中的每个节点接收。 $S(A)$ 表示多播目标节点的数量。目标节点数量均为 d 的多播目标节点集合 A 构成的集合为 $B = \{A_i | A_i \subseteq N, A_j \subseteq N, A_i \neq A_j, S(A_i) = S(A_j) = d\}$, 且 $S(B) = C_{S(N)}^d$ 。对于单播报片有 $S(A) = 1$ 且 $S(B) = S(N)$; 对于广播报片有 $S(A) = S(N)$ 且 $S(B) = 1$ 。

定义 3 多播通信矩阵 $\Gamma = \{\beta_{ij} | 1 \leq i \leq S(N), 1 \leq j \leq S(B)\}$ 。 Γ 矩阵是一个 $S(N) \cdot S(B)$ 的矩阵。 β_{ij} 表示源节点 i 向多播目标节点集合 A_j 发送的多播报片的数量在源节点 i 发送的多播报

片总数量中所占的比例,并且有 $\sum_{j=1}^{S(B)} \beta_{ij} = 1$ 。

当矩阵 Γ 中每一行的 $S(B)$ 个元素中有且只有一个元素为 1,其他元素均为 0 时,表示源节点 i 仅仅向一个多播目标节点集合发送报片。当矩阵 Γ 中的每个元素均相同且为 $\frac{1}{S(B)}$ 通信模式为随机多播通信。

为了与单播通信矩阵比较,可以将多播通信矩阵转换为类似单播矩阵的定义。转换后的多播通信矩阵为 $\Lambda = \{\lambda_{ik} | 1 \leq i \leq S(N), 1 \leq k \leq S(N)\}$, Λ 是一个 $S(N) \cdot S(N)$ 的矩阵。 λ_{ik} 与 β_{ij}

的关系如式(1)所示,并且有 $\sum_{j=1}^{S(N)} \lambda_{ij} = S(A)$ 。 λ_{ik} 表示在通信矩阵 Γ 下,源节点 i 向目标节点 k 发送报片的比例。对于随机多播通信,矩阵 Λ 中的每个元素均相等且为 $\frac{S(A)}{S(N)}$ 。在多播注入率 α 下,每个节点每个时钟周期接收的报片数量为 $\alpha \cdot S(A)$ 。

$$\lambda_{ik} = \sum_{j=1}^{S(B)} \beta_{ij} \cdot \tau_j, \text{ if } k \in A_j, \tau_j = 1; \text{ else } \tau_j = 0 \quad (1)$$

定义 4 多播路由算法 R 完成从源节点和多播目标节点集合对到网络通道的映射。即表示一个报片从源节点到达多播目标节点集合中所有节点所经过的通道。多播路由算法可以采用 3 种实现方式:基于单播实现 MCU,基于路径实现和基于分支树实现。

定义 5 单播路径 P_{ij} 表示从源节点 i 到单个目标节点 j 所经过的通道的集合,且 $P_{ij} \subseteq C$ 。

定义 6 多播路径 Q_{ij} 表示从源节点 i 到多个目标节点集合 A_j 中的每个节点所经过的通道的集合,且 $Q_{ij} \subseteq C$ 。

定义 7 通道负载 $\gamma_c(R, \Gamma)$ 表示在多播注入率为 1 时,经过通道 c 的报片数量。 $\gamma_c(R, \Gamma)$ 的计算如式(2)所示,路由算法为 MCU 时,采用通信矩阵 Λ 来计算;当路由算法为基于路径和基于树的路由算法时,采用通信矩阵 Γ 来计算。

$$\gamma_c = \begin{cases} \sum_{i=1}^{S(N)} \sum_{j=1}^{S(N)} \lambda_{ij} \cdot \tau_{ij}, \text{ if } c \in P_{ij}, \tau_{ij} = 1; \text{ else } \tau_{ij} = 0, \rho \in C; R = \text{MCU} \\ \sum_{i=1}^{S(N)} \sum_{j=1}^{S(B)} \beta_{ij} \cdot \tau_{ij}, \text{ if } c \in Q_{ij}, \tau_{ij} = 1; \text{ else } \tau_{ij} = 0, \rho \in C; R \neq \text{MCU} \end{cases} \quad (2)$$

定义 8 网络输出加速比 S 。假定在网络中路由器的局部输出端口的带宽无限大的情况下,当网络中存在一条通道达到饱和时,局部输出端口的报文接收率的最大值为网络输出加速比 S 。

当网络的局部输出端口带宽与通道带宽的比值小于 S 时,网络的性能受限于输出端口带宽;反之,网络的性能受限于通道带宽。

网络吞吐率 $\Theta(R, \Gamma)$ 是指在网络的局部输出

端口带宽与通道带宽的比值大于网络输出加速比 S 下,当网络中存在一条通道达到饱和时,网络的多播报注入率 α 。 $\Theta(R, \mathbf{I})$ 的计算如式 (3) 所示。

$$\Theta(R, \mathbf{I}) = \frac{1}{\max\{\gamma_c\}} \quad c \in C \quad (3)$$

2 多播消耗的能量模型

2.1 单个跳步消耗的能量

多播报片经过路由器的数据流图如图 1 所示,可以分为两种情况:一是不存在分支,如图 1 (a);二是存在分支,即报片同时被转发到路由器的多个输出端口。例如在图 1 (b) 中,报片经过路由器时产生三个分支。在第一种情况下,报片经过路由器所消耗的动态能量如式 (4) 所示,其中 E_{rd} 、 E_{alc} 和 E_{xb} 分别是当前路由器的输入缓冲器读操作消耗的能量、分配操作消耗的能量和交叉开关消耗的能量; E_{lnk} 是物理链路消耗的能量; E_{wr} 是下一个路由器的输入缓冲器的写操作消耗的能

量。分配器所消耗的能量 E_{alc} 很小,可以忽略不计^[13]。

$$\begin{aligned} E_{flit_nbranch} &= E_{rd} + E_{alc} + E_{xb} + E_{lnk} + E_{wr} \\ &\approx E_{rd} + E_{xb} + E_{lnk} + E_{wr} \end{aligned} \quad (4)$$

第二种情况中,报片被转发到多个输出端口的过程,存在两种方式,即锁步传输和非锁步传输。锁步传输方式是指当报片请求的输出端口同时处于空闲状态时,报片才能够从缓冲器中读出,并发送到请求的输出端口。非锁步传输方式是指当报片请求的输出端口集合中的一个处于空闲状态时,报片就被发送到该输出端口。此时,报片不会从缓冲器中离开,直到该报片转发到请求的所有输出端口之后才会离开队列。在非锁步传输方式中,报片在最坏情况下,需要 n 次经过交叉开关, n 是报片在该路由器分支的数量。报片经过路由器消耗的能量如式 (5) 所示。

$$E_{flit_branch} = \begin{cases} E_{rd} + E_{xb} + n \cdot E_{lnk} + n \cdot E_{wr} = n \cdot E_{flit_nbranch} - (n-1) \cdot (E_{rd} + E_{xb}); & \text{mode = lock-step} \\ n \cdot E_{rd} + n \cdot E_{xb} + n \cdot E_{lnk} + n \cdot E_{wr} = n \cdot E_{flit_nbranch}; & \text{mode = no-lock-step} \end{cases} \quad (5)$$

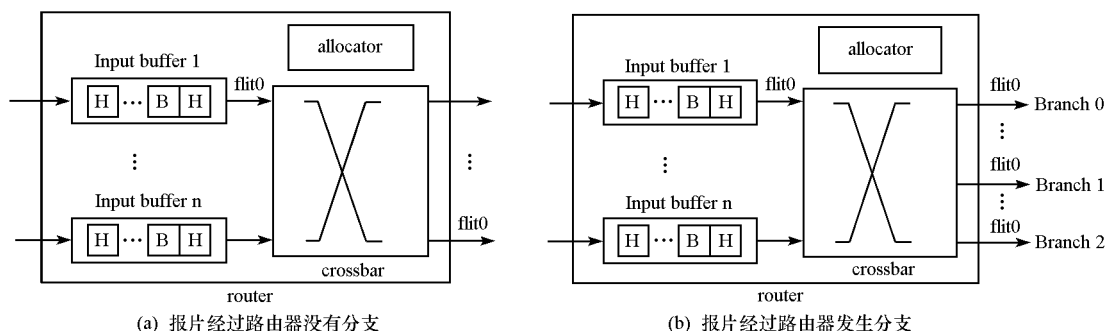


图 1 报片经过路由器的数据流

Fig. 1 Data stream when a multicasting flit get through a router

2.2 路径所消耗的能量

定义 9 单播路径 P_{ij} 消耗的能量 EP_{ij} 指一个报片从被注入网络直到被目标节点所接收的过程中,网络消耗的能量。 EP_{ij} 由三部分组成:注入能量,即源节点将报片注入路由器的局部端口的缓冲器的过程所消耗的能量;传输能量,即报片经过的路由器消耗的能量;接收能量,即报片从目标节点的路由器的缓冲器中读出,并经过交叉开关发送到局部输出端口的过程所消耗的能量,如式 (6) 所示。

$$\begin{aligned} EP_{ij} &= E_{inj} + E_{tra} + E_{rec} \\ &= E_{wr} + S(P_{ij}) \cdot E_{flit_nbranch} + E_{rd} + E_{xb} \end{aligned} \quad (6)$$

定义 10 多播路径 Q_{ij} 消耗的能量 EQ_{ij} 指一个报片从注入网络直到被目标节点集合 A_j 中的所有节点接收的过程中,网络所消耗的能量。为了建立锁步传输方式和非锁步传输方式下多播路径消耗的能量公式,假定 QA_{ij} 为多播路径 Q_{ij} 的分支节点集合,其中每个元素满足两个条件:一是多播路径 Q_{ij} 经过该节点;二是报片经过该节点时存在分支。 QB_{ij} 为多播路径 Q_{ij} 的分支通道集合,其中每个元素满足两个条件:一是该通道属于 Q_{ij} ;二是每个通道的源节点是分支节点。锁步传输方式和非锁步传输方式下多播路径 Q_{ij} 所消耗的能量如式 (7) 所示。

$$\begin{aligned} &EQ_{ij} \\ &= E_{inj} + E_{tra} + E_{rec} \\ &= \begin{cases} E_{wr} + S(Q_{ij}) \cdot E_{flit_nbranch} - (S(QB_{ij}) - S(QA_{ij})) (E_{rd} + E_{xb}) + S(A_j) (E_{rd} + E_{xb}); \text{mode} = \text{lock-step} \\ E_{wr} + S(Q_{ij}) \cdot E_{flit_nbranch} + S(A_j) (E_{rd} + E_{xb}); \text{mode} = \text{no-lock-step} \end{cases} \end{aligned} \tag{7}$$

2.3 网络消耗的能量

多播注入率 α 下,网络消耗的能量等于所有报文的多播路径所消耗的能量之和,如式(8)所示。路由算法是 MCU 时,网络消耗的能量采用通信矩阵 A 来计算;路由算法是基于路径和基于树的路由算法时,采用通信矩阵 Γ 来计算。

$$E = \begin{cases} \sum_{i=1}^{S(N)} \sum_{j=1}^{S(N)} \alpha \cdot (\lambda_{ij} \cdot E_{P_{ij}}); R = \text{MCU} \\ \sum_{i=1}^{S(N)} \sum_{j=1}^{S(B)} \alpha \cdot (\lambda_{ij} \cdot E_{Q_{ij}}); R \neq \text{MCU} \end{cases} \tag{8}$$

3 负载均衡的多播路由算法

面向 NoC 的多播路由算法主要有 XY 多播路由算法^[7]、YX 多播路由算法、OPT 算法^[9]和双路径 DP 算法^[14]。相对于 MCU 算法,这些路由算法能够共享网络资源,从而提高网络吞吐率。在这些路由算法下,不平衡的网络负载将会影响网络吞吐率。例如,在 XY 多播路由算法中,多播报文能够共享 X 方向上的通道,但是无法共享 Y 方向上的通道。这将会导致 Y 方向上的通道负载大于 X 方向上的通道负载。YX 多播路由算法恰好相反。BDoR 和 MPDoR 算法能够充分利用这两种多播路由算法的特性来平衡网络负载。

BDoR 算法:在 XY 多播路由算法和 YX 多播路由算法中,最大的缺点是 X 方向和 Y 方向上负载不平衡。为了平衡网络负载,在向网络注入报文时,以概率 p 选择 XY 多播路由算法,概率 $(1 - p)$ 选择 YX 多播路由算法。根据单播路由算法的转弯模型,当两种路由算法并发使用时,报文的转弯将会形成一个环,导致网络发生死锁。为了防止死锁的发生,路由器可以使用两个虚通道,采用 XY 多播路由算法的报文在虚通道 0 中传输;而采用 YX 多播路由算法的报文在虚通道 1 中传输。在 $p = 0.5$ 时,两个虚通道的负载近似平衡,从而保证 X 方向和 Y 方向上的负载近似平衡。

MPDoR 算法:与 BDoR 算法类似,MPDoR 算法也是基于 XY 多播路由算法和 YX 多播路由算法,与之不同的是路由算法选择策略。假设 C_{xy} 和 C_{yx} 分别表示 XY 多播路由算法和 YX 多播路由算法下,多播报文所需要的通道数量。MPDoR 算法的路由算法选择策略如下:如果 C_{xy} 小于 C_{yx} ,那么报文采用 XY 多播路由算法;反之,如果 C_{xy} 大于 C_{yx} ,那么报文采用 YX 多播路由算法;如果 C_{xy} 等

于 C_{yx} ,那么报文采用 BDoR 算法。在 C_{xy} 大于 C_{yx} 的概率, C_{xy} 小于 C_{yx} 的概率和 C_{xy} 等于 C_{yx} 的概率均相等的情况下,那么 MPDoR 算法也是一种 BDoR 算法。同时 MPDoR 算法也能够减小网络跳步数,降低网络功耗。

4 实验结果

为了评估多播通信在多播路由算法下的网络吞吐率和能量,我们采用 C++ 语言开发一个功能模拟器。网络拓扑结构为 4×4 的 Mesh 网络;通信模式采用随机多播通信,因此每个节点所接收的报文数量均相同;模拟器运行 1 000 000 个时钟周期用于统计网络信息。

4.1 网络吞吐率

图 2 给出了 MPDoR 算法下,网络吞吐率与多播目标节点数量的敏感度。随着多播目标节点数量增加,吞吐率逐渐下降。在 4×4 Mesh 中,多播目标节点数量小于 5 时,随着目标节点数量增加,吞吐率下降速度较快。在单播通信下,吞吐率为 1.0;目标节点数量为 2 时,吞吐率下降到 0.58;目标节点数量为 5 时,吞吐率为 0.30。在目标节点数量从 6 增加到 15 时,吞吐率下降速度比较慢。广播通信下,吞吐率仅仅为 0.13。

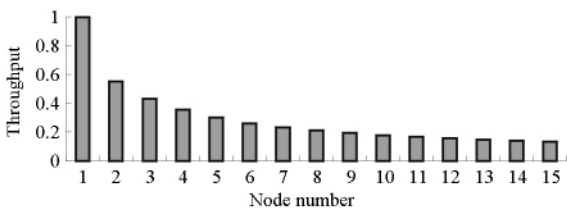


图 2 MPDoR 路由算法下,网络吞吐率与多播目标节点数量的敏感度
Fig.2 Sensitivity of network throughput to the number of destination node under MPDoR

图 3 给出了 7 种路由算法下,归一化吞吐率与多播目标节点数量的敏感度,以多播路由算法 MCU 下的吞吐率为基准。在 4×4 Mesh 中,单播通信下,除了 DP 算法外,其他 6 种算法具有相同的吞吐率。XY 和 YX 算法具有相似的性能,随着目标节点数量的增加,归一化吞吐率增加。广播通信下,吞吐率是 MCU 算法的 1.34 倍。OPT 算法在目标节点数量为中等和较少时,吞吐率与 XY 算法具有相似的性能;在目标节点数量较多时,吞吐率略比 XY 算法低。DP 算法在目标节点数量小于 13 时,吞吐率小于 MCU 算法下的吞吐

率。广播通信下,DP 算法下的吞吐率仅仅是 MCU 的 1.06 倍。BDoR 和 MPDoR 算法具有类似的特性,归一化吞吐率随着目标节点数量的增加

而增加。广播通信下,MPDoR 算法的吞吐率是 MCU 算法的 2.13 倍。

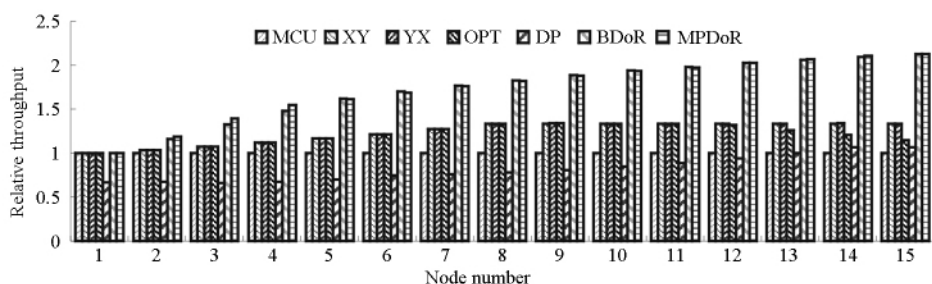


图3 不同路由算法下,归一化网络吞吐率与多播目标节点数量的敏感度

Fig.3 Sensitivity of normalized throughput to the number of destination node under different routing algorithms

4.2 负载均衡

图4给出了网络的负载均衡度,即X方向上通道负载与Y方向上通道负载两者中的最大值与最小值的比值ratio,与多播目标节点数量的敏感度。在4×4 Mesh中,MCU算法的网络负载比较平衡,ratio随着目标节点数量增加而基本不改变。但是MCU算法下,同一个多播报文无法共享网络资源,因此导致网络中通信量非常大,这是网络吞吐率最低的主要原因。XY算法和YX算法下,网络负载不平衡特性具有相似的特性。不同的是,XY算法下,多播报文可以共享X方向上的通道,而无法共享Y方向上的通道,因此Y方向

上的通道负载大;而YX算法下,刚好相反。XY算法下,ratio随着目标节点数量增加而增加,广播通信下,达到最大值4。OPT算法下,ratio在目标节点数量较小时,增加比较缓慢;在目标节点数量较多时,增加的比较快。DP算法下的ratio在单播通讯和广播通讯下与XY算法相同。除此之外,ratio是7种路由算法中最大,网络负载最不平衡。BDoR和MPDoR算法的网络负载比较平衡,Ratio的最大值不超过1.02。BDoR算法和MPDoR算法既能够共享网络资源,又具有负载均衡的特性,因此其具有最高的网络吞吐率。

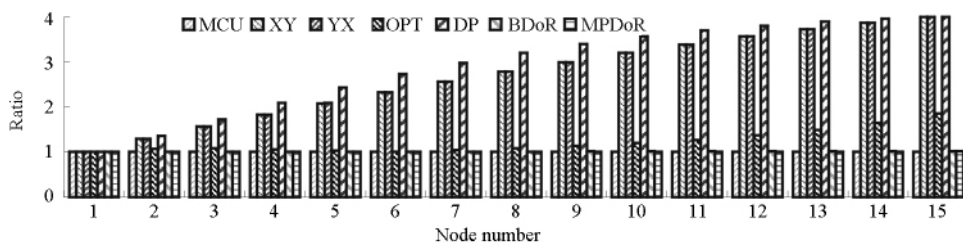


图4 不同路由算法下,网络负载均衡度与多播目标节点数量的敏感度

Fig.4 Sensitivity of network balance to the number of destination node under different routing algorithms

4.3 输出加速比

图5给出了网络的输出加速比S与多播目标节点数量的敏感度。在4×4 Mesh中,DP路由算法的输出加速比S小于1。除MCU和DP算法之外其他5种算法在目标节点数量大于3时,网络输出加速比S均大于1。其中BDoR算法和MPDoR算法下,输出加速比S最大且最大值为2。在8×8和16×16 Mesh网络中,BDoR和MPDoR算法下,输出加速比S的最大值也仍然为2。因此,在Mesh网络中,路由器的局部端口的输出带宽至少是网络链路带宽的2倍时,局部端口才不会成为网络吞吐率的瓶颈。

4.4 网络消耗能量

图6给出了网络消耗的归一化能量与多播目标节点数量的敏感度。其中以MCU算法下的网络消耗的能量为基准,分支模型为非锁步模式。在4×4 Mesh网络中,其他6种算法的归一化能量随着目标节点数量的增加而减小。广播通信下,其他6种算法下网络消耗能量相同且仅为MCU算法的0.375。DP算法,XY算法和YX算法下的网络消耗能量仅次于MCU算法。目标节点数量小于4时,MPDoR算法下的网络消耗能量小于OPT算法;而在目标节点数量大于4时,OPT算法优于MPDoR算法,并且两者之间的差值不超过3%。而MPDoR算法的网络吞吐率是OPT算法的1.8倍。

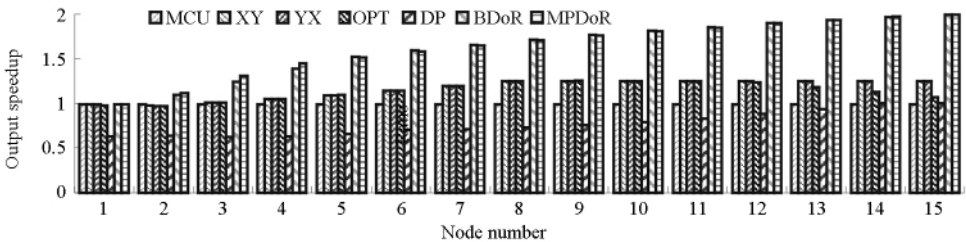


图 5 不同路由算法下,网络输出加速比 S 与多播目标节点数量的敏感度

Fig. 5 Sensitivity of output speedup to the number of destination node under different routing algorithms

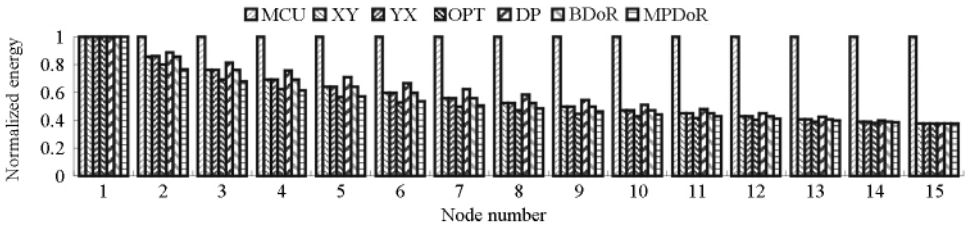


图 6 不同路由算法下,归一化能量与多播目标节点数量的敏感度

Fig. 6 Sensitivity of normalized energy to the number of destination node under different routing algorithms

5 结 论

目录、token 等 cache 一致性协议的维护需要路由器从硬件上能够高效地支持多播。本文借鉴单播通信下网络吞吐率模型建立的方法,建立了面向多播通信的网络吞吐率和能量模型。在路由器不支持多播时,MCU 算法中由于同一个广播报文无法共享链路,因此其具有最低的网络吞吐率和最大的能量消耗。XY 多播路由算法和 YX 多播路由算法下 X 方向和 Y 方向的链路负载非常不平衡,这是导致网络吞吐率比较低的原因。MPDoR 算法下,网络负载比较平衡并且具有较短的路径,因此网络吞吐率最大,能量消耗也较小。在 4×4 Mesh 网络中,随机广播通信下,MPDoR 算法的网络吞吐率是 XY 算法的 1.6 倍。只有当路由器的局部输出端口带宽是链路带宽的 2 倍时,网络中的链路才能达到饱和。在未来的工作中,我们将对 DVOQR^[15] 路由器进行改进,使其能够有效地支持多播。并在此基础上进一步验证本文所得到的结论。

参 考 文 献:

[1] Hoskote Y, Vangal S, Singh A, et al. A 5 GHz Mesh Interconnect for a Teraflops Processor[J]. IEEE Micro, 2007, 27(5): 51–61.
[2] Martin M M K, Hill M D, Wood D A. Token Coherence: Decoupling Performance and Correctness[C]//Proceedings of International Symposium on Computer Architecture, San Diego, CA, United States, IEEE, 2003: 182–193.
[3] Kumary A, Kundu P, Singh A P, et al. A 4.6Tbits/s 3.6GHz Single-cycle NoC Router with a Novel Switch Allocator in 65nm CMOS[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Design, Lake Tahoe, CA, United States, IEEE, 2007: 63–70.
[4] Nicopoulos C A, Park D, Kim J, et al. ViChaR: A Dynamic Virtual Channel Regulator for Network-on-Chip Routers[C]//Proceedings of International Symposium on Microarchitecture,

Orlando, FL, United States, IEEE, 2006: 333–344.
[5] Boppana R V, Chalasani S, Raghavendra C S. Resource Deadlocks and Performance of Wormhole Multicast Routing Algorithms [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1998, 9(6): 535–549.
[6] Lin X, McKinley P K, Ni L M. Deadlock-Free Multicast Wormhole Routing in 2D Mesh Multicomputers [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1994, 5(8): 793–804.
[7] Jerger N E, Peh L S, Lipasti M. Virtual Circuit Tree Multicasting: A Case for On-chip Hardware Multicast Support [C]//Proceedings of International Symposium on Computer Architecture, Beijing, China, IEEE, 2008: 229–240.
[8] Lu Z H, Yin B, Jantsch A. Connection-oriented Multicasting in Wormhole-switched Networks on Chip [C]//Proceedings of IEEE Computer Society Annual Symposium on Emerging VLSI Technologies and Architectures, IEEE Computer Society, 2006: 205–210.
[9] Hu W M, Lu Z H, Jantsch A, et al. Power-efficient Tree-based Multicast Support for Networks-on-Chip [C]//Proceedings of 16th Asia and South Pacific Design Automation Conference, Yokohama, Japan, IEEE, 2011: 363–368.
[10] Dally W J, Towles B. Principles and Practices of Interconnection Networks[M]. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2003.
[11] Kim J S, Taylor M B, Miller J, et al. Energy Characterization of a Tiled Architecture Processor with On-Chip Networks [C]//Proceedings of the 2003 International Symposium on Low Power Electronics and Design, Seoul, Korea, ACM, 2003: 424–427.
[12] Kahng A B, Li B, Peh L S, et al. ORION 2.0: A Fast and Accurate NoC Power and Area Model for Early-stage Design Space Exploration [C]//Proceedings of the 2009 Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition, Nice, France, IEEE Computer Society, 2009: 423–428.
[13] Wang H S, Zhu X P, Peh L S, et al. ORION: A Power-performance Simulator for Interconnection Networks [C]//Proceedings of the 35th Annual IEEE International Symposium on Microarchitecture, Istanbul, Turkey, IEEE, 2002: 294–305.
[14] Lin X, Ni L M. Multicast Communication in Multicomputer Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1993, 4(10): 1105–1117.
[15] Qi S B, Li J W, Xing Z C, et al. A Delay Model of Two-cycle NoC Router in 2D-Mesh Network [C]//Proceedings of IEEE Annual Symposium on VLSI, Lixouri, Kefalonia, Greece, IEEE Computer Society, 2010: 316–320.