

完全自适应路由算法的虚通道分配优化策略

胡哲琨, 陈 杰

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 在虫孔交换的片上网络中, 针对完全自适应路由算法对路由器缓存资源使用的不足, 提出了一种虚通道分配优化策略. 该策略通过比较输出虚通道的信用量计数与数据包剩余微片数的关系来确定处于缓存队列中的尾微片不会被阻塞在当前路由器中, 从而将已被释放但尚未被排空的虚通道提前分配给正在等待的数据包, 以提高对缓存资源的利用率. 8×8 mesh 中的仿真结果表明, 对比保守的虚通道分配方式, 该优化策略能提高网络的饱和注入率, 或者在保持网络性能相当的前提下减少对缓存资源的使用.

关键词: 片上网络; 完全自适应路由; 虚通道分配; 死锁避免

中图分类号: TP302

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)08-0001-06

Improved Virtual Channel Allocation Scheme for Fully Adaptive Routing Algorithms

HU Zhe-kun, CHEN Jie

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: As fully adaptive routing algorithms make inefficient use of the buffer resources in routers, an improved virtual channel (VC) allocation scheme is proposed for wormhole switching Networks on Chip (NoCs). By comparing the credit counts of output VCs with the number of remaining flits of a packet, this scheme determines that a tail flit in a VC buffer will not be blocked at the current router. Hence, a released VC can be assigned to a pending packet before it is emptied, which improves the utilization of buffer resources. Simulation results in an 8×8 mesh network show that, compared with the conservative VC allocation scheme, this proposed scheme can increase the saturation injection rate of the network, or reduce the amount of buffer resources while maintaining an equivalent network performance.

Key words: networks on chip; fully adaptive routing; virtual channel allocation; deadlock avoidance

1 引言

随着集成电路工艺技术的进步, 芯片内可集成的 IP 核数目不断增加, 出于对可扩展性、连线延时和功耗等因素的考虑, 传统的基于总线的通信方式已不能满足几十乃至上百个处理器间的通信需求, 片上网络被认为是能有效解决这些问题的通信技术, 已被广泛研究. 2D mesh 是一种常用的片上网络结构, 具有规则的平面布局, 且易于实现高效无死锁的数据包传输, 因此对其性能进行优化具有重

要意义.

路由算法决定了数据包在网络中的传输路径, 对片上网络的性能具有重要影响. 自适应路由算法能根据网络状态动态地选择较空闲的路由路径, 对比确定性路由算法能提供更好的性能. 目前 2D mesh 中的自适应路由算法主要有两类: 部分 (partially) 自适应路由算法和完全 (fully) 自适应路由算法. 基于转向模型 (turn model) 的路由算法, 如 west-first 算法^[1], 是常用的部分自适应路由算法, 该算法通过禁止路由路径中的某些转向来避免死

收稿日期: 2012-10-09; 修回日期: 2012-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61234003)

锁,因此其所能提供的自适应度也就相应地受到了限制.在 Duato 提出的完全自适应路由算法^[2]中,路由器的虚通道(virtual channel, VC)被划分为自适应通道和逃离通道(escape channel),在路由过程中,数据包需按照某种无死锁的路由算法(如 XY 路由算法)使用逃离通道,而对自适应通道的使用则不受路由转向的限制,因此该算法能提供更大的自适应度.然而在完全自适应路由算法中,必须保证数据包在遇到阻塞时能利用逃离通道来避免死锁,所以这类算法采用了一种保守的虚通道分配方式,只有在虚通道已被释放且其缓存队列为空的情况下才能将其分配给数据包使用,而该方式会导致数据包对路由器缓存资源的使用存在不足,从而影响网络的性能.

本文在虫孔交换的 2D mesh 片上网络中,针对 Duato 完全自适应路由算法对路由器缓存资源使用的不足,提出一种虚通道分配优化策略.该策略通过比较输出虚通道的信用量计数与数据包剩余微片数的关系来确定处于缓存队列中的尾微片不会被阻塞在当前路由器中,从而将已被释放但尚未被排空的虚通道提前分配给正在等待的数据包,提高对缓存资源的利用率.

2 片上网络路由器模型

由于片上网络受到了较强的面积和功耗约束^[3],其路由器中缓存资源也就相对较少,因此通常在片上网络中使用虫孔交换(wormhole switching)策略,即数据包被划分为多个微片,其中头微片包含了数据包的路由信息(如数据包长度、源节点和目的节点的坐标),这些信息被用来计算路由路径,而体微片和尾微片则按照头微片所保留的路径进行传输.虫孔交换策略和虚跨步(virtual cut through)交换策略最大的区别在于,后者需首先确认下游路由器拥有足够的缓存空间来存储整个数据包,然后才能将数据包向下传输.而前者只需保证下游路由器能存储单个微片即可,因此适用于缓存资源较少的情况.在虫孔交换策略中,当数据包被阻塞时,其微片在各自所在的路由器中等待,此时数据包可能占据多个路由器的队列,而在虚跨步交换策略中,数据包被阻塞时则被完全存储在单个路由器的队列之中.

图 1 中示意了一个虫孔交换的双通道五级流水路由器的结构^[4],该路由器由输入端口、输出端口、虚通道分配器、交叉开关分配器及交叉开关组成.其

中每个输入端口都包含了一个路由计算单元、两个虚通道队列及相关的控制状态机(FSM).在 FSM 的控制下,数据包的路由需经过如下 4 个步骤:①头微片到达输入端口并根据其虚通道号(vcid)存入相应的虚通道队列;②路由计算单元根据头微片中的路由信息计算出可供数据包使用的输出虚通道;③虚通道队列根据路由计算的结果向虚通道分配器请求输出虚通道,如果有任一输出虚通道被许可,则在下一个周期向交叉开关分配器申请对交叉开关的使用权;④微片从虚通道队列读出,穿过交叉开关到达输出端口,并传输到下游路由器.以上过程中,输出虚通道的分配是以数据包为单位进行的,即数据包的头微片申请输出虚通道,尾微片穿过交叉开关后释放该输出虚通道.而交叉开关的分配则是以微片为单位进行的,即每次发出一个微片前,都需申请对交叉开关的使用权.

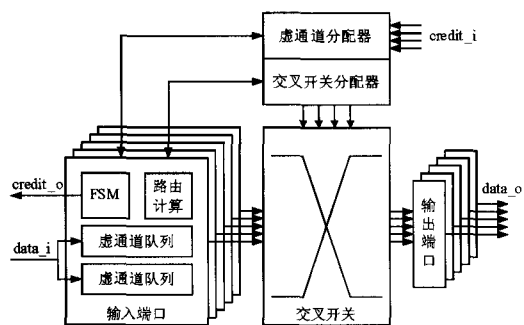


图 1 双通道五级流水路由器结构

为了保证下游路由器拥有缓存空间来存储即将发出的微片,虚通道分配器对每个输出虚通道都维护了一个信用量(credit)计数器,这些计数器以微片为单位记录相邻路由器中虚通道队列的空闲单元数.信用量计数器的初值为相邻路由器中虚通道队列的容量,当一个微片从当前路由器的虚通道队列中读出并传输到下游路由器时,数据包所使用的输出虚通道的信用量计数减 1.同时,由于被读取的虚通道队列空出了一个微片的存储单元,因此其对应的 FSM 产生信用量递增信号(在图 1 中为 credit_o)传递给上游路由器,通知上游路由器将相应的信用量计数加 1.当一个输出虚通道所对应的信用量计数为零时,不能向其发送微片,避免因下游路由器的虚通道队列溢出而导致微片丢失.

3 Duato 完全自适应路由算法

以双通道路由器为例,Duato 完全自适应路由算法将虚通道分为两类,VC₀为逃离通道,VC₁为自适应通道.数据包在路由过程中需以某种无死锁的

路由算法(此处假设 XY 路由算法)使用 VC_0 , 而对 VC_1 则可按照最短路径(minimal path)的方式来使用, 且数据包在自适应通道和逃离通道之间可以相互切换, 如图 2 给出了目的节点为 R_{14} 的数据包在 R_5 处允许使用的输出虚通道. 由于 Duato 完全自适应路由算法对自适应通道的使用不受任何转向(turn)的限制, 因此该算法对比部分自适应路由算法能提供更大的自适应度. 为了避免死锁, 这类算法对虚通道的使用需满足“原子”分配特性, 即只有在输出虚通道已经被释放且其缓存队列为空的情况下, 才能将其分配给数据包使用^[2], 因此在任意时刻, 虚通道缓存队列中只能存储属于同一数据包的微片. 而在部分自适应路由算法中, 只要输出虚通道已经被使用它的上一个数据包释放, 则可立即将其分配给另一数据包.

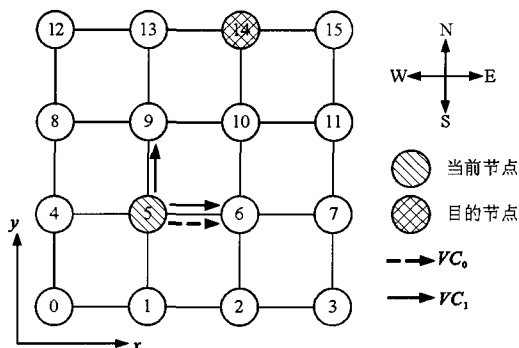


图 2 Duato 完全自适应路由算法

本文用 $VC(R_i, dir, n)$ 表示路由器 R_i 中 dir 端口的虚通道 VC_n , 其中 $i, n \in \mathbb{N}$ 为整数, $dir \in \{W, S, E, N, L\}$ 表示端口的方向. 在图 3 所示的情形中, 数据包 P_2 的尾微片 T_2 已经到达了 $VC(R_2, W, 0)$ 的队列中, 因此该虚通道已经被 R_1 释放了. 如果数据包按照部分自适应路由算法进行路由, 那么此时 $VC(R_2, W, 0)$ 可立即被分配给 P_3 使用. 但如果网络采用的是 Duato 完全自适应路由算法, 那么只有等到尾微片 T_2 离开 $VC(R_2, W, 0)$ 的队列后, 该虚通道才能被分配给 P_3 . Duato 算法的这种虚通道分配方式确保了当数据包遇到阻塞时, 其头微片一定位于虚通道队列的最前端, 因此数据包可以选择最先被排空的输出虚通道进行路由, 而不会因盲目地预约了某个输出虚通道导致其失去“逃离”死锁的机会.

值得注意的是, 当 Duato 算法被用在虫孔交换网络中时, 其保守的虚通道分配方式与虚跨步交换策略存在本质的区别. 这是因为在 Duato 算法中, 当前路由器在向下游路由器传输数据包之前, 无需确

保下游路由器的虚通道队列能缓存整个数据包, 因此数据包的长度可以大于虚通道队列的容量. 实际上, 当前路由器并不知道下游路由器的虚通道队列何时被排空, 只能等到输出虚通道的信用量计数递增至初始值时才能将其分配给另一数据包^[4]. 因此与部分自适应路由算法相比, Duato 算法所采用的这种保守的虚通道分配方式会导致其对路由器缓存资源的利用率较低. 下文将对此进行优化.

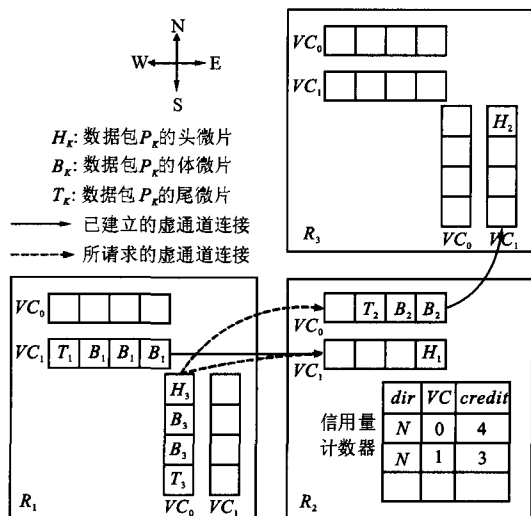


图 3 Duato 算法的虚通道分配示例

4 Duato 算法的虚通道分配优化策略

4.1 非阻塞条件

在图 3 所示的情形中, 数据包 P_2 在路由器 R_2 处申请到的输出虚通道为 $VC(R_3, S, 1)$, 该输出虚通道的信用量计数为 3, 表示在其缓存队列中还剩余 3 个空闲的微片存储单元, 同时注意到 P_2 在 $VC(R_2, W, 0)$ 的队列中, 因此该虚通道已经被 R_1 释放了. 如果数据包按照部分自适应路由算法进行路由, 那么此时 $VC(R_2, W, 0)$ 可立即被分配给 P_3 使用. 但如果网络采用的是 Duato 完全自适应路由算法, 那么只有等到尾微片 T_2 离开 $VC(R_2, W, 0)$ 的队列后, 该虚通道才能被分配给 P_3 . Duato 算法的这种虚通道分配方式确保了当数据包遇到阻塞时, 其头微片一定位于虚通道队列的最前端, 因此数据包可以选择最先被排空的输出虚通道进行路由, 而不会因盲目地预约了某个输出虚通道导致其失去“逃离”死锁的机会.

为了表述清晰, 本文先说明以下符号的含义, 这些符号所表示的数据量均以微片为基本单位:

$cap(VC_n)$: 表示虚通道 VC_n 的队列容量;

$size(VC_n)$: 表示虚通道 VC_n 的队列中已被使用的存储单元数, 满足 $size(VC_n) \leq cap(VC_n)$;

$length(P_k)$:表示数据包 P_k 的长度,该长度被包含在数据包的头微片中,且可以大于队列容量 $cap(VC_n)$;

$credit(VC_n)$:虚通道 VC_n 在其上游路由器中的信用量计数。

根据图 3 可知,若将数据包 P_k 在路由器 R_i 中占用的输入虚通道记为 VC_{in} ,则当满足如下条件时,可以判断数据包 P_k 的微片一定不会被阻塞在 VC_{in} 的队列中:

(1) 数据包 P_k 已经成功申请到了输出虚通道,将该虚通道记为 VC_{out} ;

(2) 数据包 P_k 的尾微片已经到达了 VC_{in} 的队列中,或者说虚通道 VC_{in} 已经被其上游路由器释放了;

(3) 数据包 P_k 在 VC_{in} 中所剩余的微片数小于或等于 $credit(VC_{out})$ 。

当上述 3 个条件都满足时,虚通道 VC_{in} 所对应的 FSM 可以向上游路由器发送非阻塞(nonblock)信号,表示该虚通道可以被分配给另一数据包.由于条件(3)保证了数据包 P_k 的微片一定能全部离开 VC_{in} ,因此将 VC_{in} 提前分配给另一数据包不会导致死锁发生。

4.2 硬件设计

为了检测数据包 P_k 的尾微片是否已经到达了路由器 R_i 的虚通道 VC_n 中,本文对每个虚通道都维护了一个数据包剩余长度计数器,记为 $left(VC_n)$.在对数据包 P_k 进行路由计算时, $left(VC_n)$ 被设置为 $length(P_k)$,其后每向输出虚通道发送 1 个微片,就将 $left(VC_n)$ 减 1. 图 4 中示意了一个长度为 6 的数据包 P_k 经过路由器 R_i 的五种情景,根据该图可以归纳出如下关系:

(1) 当数据包 P_k 的尾微片 T_k 尚未到达虚通道 VC_n 时, $size(VC_n)$ 小于 $left(VC_n)$, 如图 4 中的情况(a)和情况(b);

(2) 当数据包 P_k 的尾微片 T_k 到达虚通道 VC_n 后, $size(VC_n)$ 等于 $left(VC_n)$, 如图 4 中的情况(c)和情况(d);

(3) 当数据包 P_k 尚未完全离开虚通道 VC_n , 但另一数据包 P_{k+1} 的微片已经到达 VC_n 的队列后,由于新到达的数据包还未进行路由计算,因此 VC_n 中的 $left$ 计数器所记录的仍是 P_k 的剩余长度,此时 $size(VC_n)$ 大于 $left(VC_n)$, 如图 4 中的情况(e)。

可以验证,以上 3 种关系在数据包的长度大于、小于或者等于虚通道队列容量时都满足,因此可以

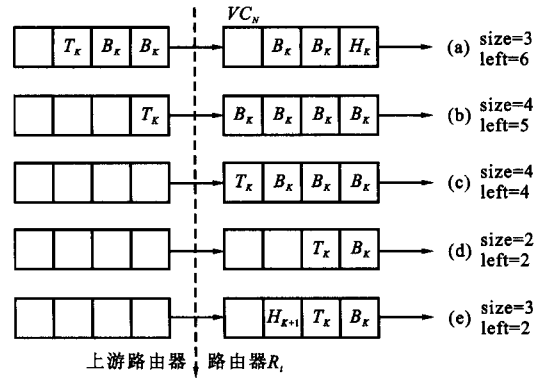


图 4 left 计数器与 size 计数器的关系

用图 5 所示的逻辑来产生非阻塞信号. 本文假设虚通道的 FSM 采用独热(one-hot)状态编码,图 5 中的 sa_state 信号为 FSM 状态寄存器中的一位,其为高时表示 FSM 处于交叉开关分配(switch allocation, SA)状态,此时位于虚通道队列最前端的数据包已经成功申请到了输出虚通道. 当 sa_state 信号为高,同时满足 $left$ 计数器等于 $size$ 计数器且 $size$ 计数器小于或等于 $credit$ 计数时,就在 $nonblock$ 信号上产生一个时钟周期的高电平脉冲,上游路由器采样到这一脉冲后,就可以将该虚通道分配给其他的数据包,而不必担心死锁的发生。

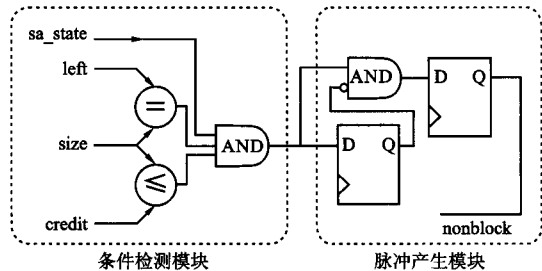


图 5 非阻塞信号的生成电路

5 性能仿真与分析

本文用 SystemC 搭建了周期精确的片上网络仿真平台,在 8×8 mesh 网络中对提出的虚通道分配优化策略进行性能仿真. 该平台中的路由器采用虫孔交换策略,具有 5 个流水级,其虚通道分配和交叉开关分配均采用 iSLIP 调度策略^[5]. 网络中每个路由器的本地(local)端口都连接了一个数据包产生器和一个数据包接收器,数据包产生器按照均匀分布的概率 r 随机产生数据包,而到达目的节点的数据包则被接收器立即接收并计算传输延时。

本文在通信模型、虚通道数目及虚通道队列容量不同的情况下,分别对 Duato 完全自适应路由算法进行仿真,以观察提出的虚通道分配优化策略对

网络性能的影响,表 1 中列出了仿真的具体参数. 在仿真中,对照组使用未优化的虚通道分配方式,即当前路由器等到输出虚通道的信用量计数达到初始值后,才能将其分配给数据包使用. 而实验组采用优化后的虚通道分配方式,当前路由器采样到从下游路由器发送回的非阻塞信号后,即可将相应的输出虚通道分配给数据包使用. 图 6 至图 8 给出了三种通信模型下的仿真结果.

表 1 完全自适应路由算法的仿真参数

仿真参数	参数设置
网络规模	8×8 mesh
通信模型	均匀、转置、比特反转
数据包长度	均匀分布在区间[2,10]中
虚通道数目	2 或 4 个虚通道
虚通道队列容量	4 或 6 个微片
逃离通道路由算法	XY 路由算法
逃离通道数目	1 个虚通道

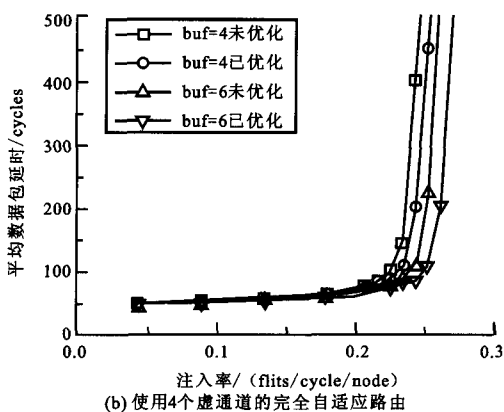
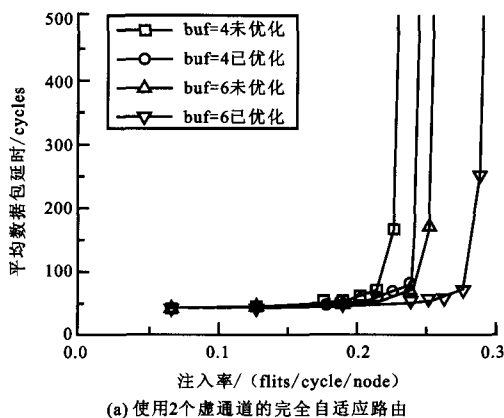


图 6 均匀通信模型下的仿真结果

由图 6~图 8 可以看出,在均匀、转置和比特反转三种通信模型下,采用本文提出的虚通道分配优化策略后,网络的饱和注入率均有提升. 使用 2 个虚

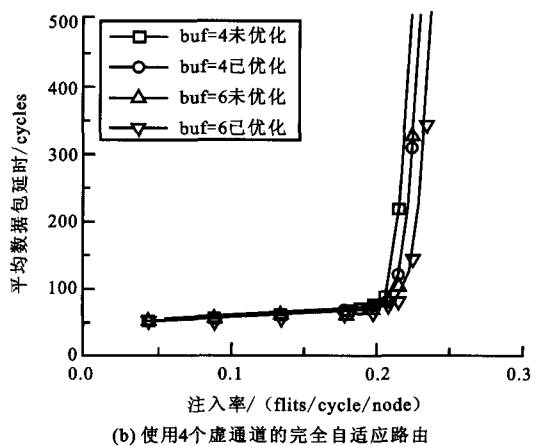
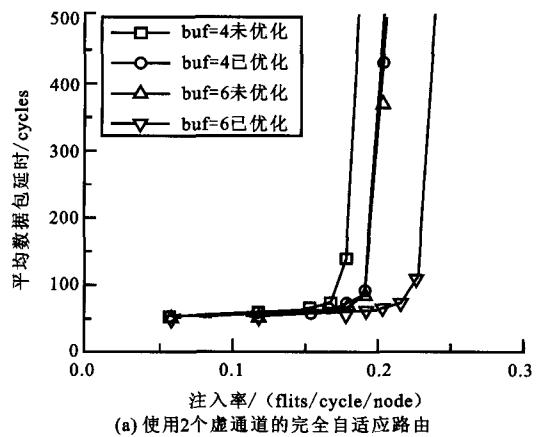


图 7 转置通信模型下的仿真结果

通道的仿真结果表明,网络饱和注入率的提升幅度随着虚通道队列容量的增加而增长,这是因为在保守的虚通道分配方式中,一个虚通道的队列只能缓存属于同一数据包的微片,因此虚通道队列的容量越大,其对缓存资源的利用率就越低. 本文提出的虚通道分配优化策略打破了这一限制,使虚通道队列可至多缓存属于两个数据包的微片,提高了缓存利用率. 当网络使用 4 个虚通道时,这一现象变得不明显,其原因为当虚通道的数目较多时,物理通道的带宽就成了限制网络性能的主要因素,因而虚通道分配优化策略所获得的性能提升就相对较小. 然而较多的虚通道不仅会占用大量的缓存资源,还会降低路由器的工作频率. 在片上网络中通常都使用少量的虚通道,在这种情况下,本文提出的优化策略也就更具实用性.

此外,转置和比特反转通信模型下的仿真结果表明,在缓存队列的容量为 4 个微片的情况下,经过虚通道分配优化后的网络性能可以达到缓存队列容量为 6 时未经优化的水平. 从这一意义上来说,在保持网络性能相当的前提下,使用本文提出的虚通道

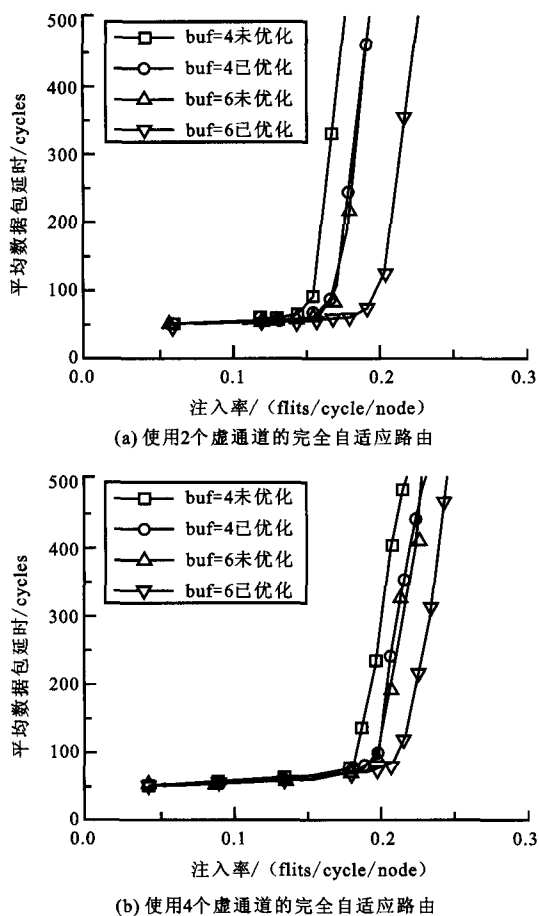


图8 比特反转通信模型下的仿真结果

分配优化策略,可减少对缓存资源的使用,从而节省路由器的面积。

6 相关研究

针对 Duato 完全自适应路由算法对虚通道分配的限制,文献[6]中提出对自适应通道采用虚跨步交换策略,使其缓存队列可同时存储多个数据包。然而该方式需要大量的缓存资源,因此并不适用于片上网络。文献[7]中提出将网络划分为自适应虚拟网络和逃离虚拟网络,数据包首先在自适应虚拟网络中传输,一旦遇到死锁,则切换到逃离虚拟网络,并一直使用逃离通道进行路由直到离开网络。数据包在这两个虚拟网络中传输时,对虚通道的使用不必受到“原子”分配的限制,然而该方式需依赖一种有效的死锁检测机制,否则盲目地将数据包切换到逃离虚拟网络会使其变得过于拥塞,使真正处于死锁状态的数据包难以逃离死锁。

针对如何提高对缓存资源的利用率也存在许多研究。文献[8-9]分别提出了一种动态分配的虚通道结构,根据网络流量的大小在虚通道数目和队列容量之间寻求优化的缓存组织方式,以提高网络性

能。文献[10-11]分别提出了一种缓存共享机制,使一个方向的输入队列可以借用另一方向的缓存资源,以平衡各端口的通信能力。以上文献对缓存资源的优化都是针对同一路由器中的多个输入队列进行的,而本文提出的优化策略则是在上游和下游路由器之间交互进行的,因此两者既存在区别又有联系。

7 结束语

本文针对 Duato 完全自适应路由算法提出了一种虚通道分配优化策略,利用信用量计数与数据包剩余微片数的关系来判断尾微片的阻塞情况,从而将已被释放但尚未被排空的虚通道提前分配给数据包使用,以增加对缓存资源的利用率。仿真结果表明,提出的虚通道分配优化策略在虚通道数目较小时,能显著提高网络的饱和注入率,对提高片上网络的性能和减少缓存资源的使用具有实用意义。

参考文献:

- [1] Glass C J, Ni L M. The turn model for adaptive routing[C]// Proceedings of the 19th International Symposium on Computer Architecture. New York, USA: ACM Press, 1992: 278-287.
- [2] Duato J. A new theory of deadlock-free adaptive routing in wormhole networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1993, 4(12):1320-1331.
- [3] Dally W J, Towles B. Route packets, not wires; on-chip interconnection networks[C]// Proceedings of Design Automation Conference. Las Vegas, USA: ACM Press, 2001: 684-689.
- [4] Dally W J, Towles B. Principles and practices of interconnection networks[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2003: 305-324.
- [5] McKeown N. The iSLIP scheduling algorithm for input-queued switches[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(2):188-201.
- [6] Scott S L, Thorson G M. The cray T3E network: adaptive routing in a high performance 3D torus[C]// Proceedings of the Symposium on Hot Interconnects IV. Stanford University, 1996: 147-156.
- [7] Duato J, Pinkston T M. A general theory for deadlock-free adaptive routing using a mixed set of resources[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2001, 12(12):1219-1235.
- [8] 朱红雷, 彭元喜, 陈海燕, 等. 一种动态分配输入队列的片上虫孔路由器结构[J]. 电子学报, 2010, 38(5): 1032-1038.

(下转第12页)

表 1 改进紧致遗传算法在不同参数取值时
求解 ulysses22 问题的结果

群体 个数 n	α 值	族的 个数	搜到最好解 路径长度	所花时间/ s	优化比/%
100	0.977	15	78.209 23	0.395 213	3.850 1
	0.961	8	77.767 384	0.355 691	3.263 4
	0.946	5	75.309	0.316 17	0
200	0.977	15	76.616 636	0.421 56	1.735 4
	0.961	8	76.616636	0.408 386	1.735 4
	0.946	5	75.309	0.392 249	0
500	0.977	15	75.309	0.368 865	0
	0.961	8	75.309	0.374 135	0
	0.946	5	75.309	0.342 52	0

6 结束语

本文通过对城市节点进行聚类分析,在划分成族状分布后对紧致遗传算法进行了改进,设计了符合问题特点的概率矩阵初始化方法和更新方法,实验表明改进的紧致遗传算法可以提高算法搜索求解的速度.结合局部搜索的方法(如:2-Opt,3-Opt,以及 Lin-Kernighan 算法)与文中改进的紧致遗传算法 CGA 相结合,用 CGA 进行全局搜索,CGA 产生的“好”的初始解,然后用 2-Opt 等局部搜索算法进行局部搜索,一方面用 CGA 算法可以在不同的搜索区域内搜索;另一方面,对概率矩阵产生的个体用 2-Opt 等局部搜索算法进行修正,修正好的解又可以更好地更新 CGA 的概率矩阵,改进 CGA 中模拟的群体解的质量,达到更快的收敛效果.这正是本文下一步的工作.

参考文献:

- [1] Padberg M, Rinaldi G. Optimization of a 532-city

symmetric genetic traveling salesman problem by branch and cut[J]. Oper. Res. Lett., 1987, 6(1):1-7.

- [2] Lin S, Kernighan B W. An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem[J]. Oper. Res., 1973, 21(2):498-516.
- [3] 王建忠,唐红. TSP 问题的一种快速求解算法[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(1):7-10.
- [4] Baraglia R, Hidalgo J I, Perego R. A hybrid heuristic for the traveling salesman problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2001, 5(6):613-622.
- [5] Harik G, Goldberg D, Miller B. The gamblers ruin problem, genetic algorithms, and the sizing of populations K[C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Evolutionary Computation, 1997. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1997:7-12.
- [6] 王剑,赵永翔,熊盛武. 多线程并行紧致遗传算法的种群多样性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(2):204-207.
- [7] Thilagamani S, Shanthi N. A survey on image segmentation through clustering[J]. International Journal of Research and Reviews in Information Sciences, 2011, 1(1):14-17.
- [8] 高新波. 模糊聚类分析及其应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004:39-46.
- [9] Reinelt G. TSPLIB—A traveling salesman problem library[J]. ORSA J. Comput., 1991, 3(4):376-384.

作者简介:

叶苗男, (1977—), 博士研究生, 副教授. 研究方向为网络技术、进化计算.

程小辉男, (1961—), 博士, 教授. 研究方向为计算机网络技术、嵌入式系统、数据库技术.

(上接第 6 页)

- [9] 赖明澈,王志英,郭建军,等. 具有拥塞缓解策略的动态虚拟通道研究及其 VLSI 实现[J]. 计算机学报, 2008, 31(11):2026-2037.
- [10] Su W T, Shen J S, Hsiung P A. Network-on-chip router design with buffer-stealing[C]// Proceedings of 16th Asia and South Pacific Design Automation Conference. Yokohama, Japan, 2011:160-164.
- [11] Matos D, Concatto C, Kreutz M, et al. Reconfigurable routers for low power and high performance[J].

IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2011, 19(11):2045-2057.

作者简介:

胡哲琨男, (1986—), 博士研究生. 研究方向为片上网络体系结构及 VLSI 设计.

陈杰男, (1963—), 研究员, 博士生导师. 研究方向为 GPS 导航定位、多核处理器、通信与多媒体信号处理 SoC 研究.