

低开销的片上网络无关容错路由策略

关 娇^{1,2}, 蔡觉平¹, 王叶群², 高 云²

(1. 西安电子科技大学微电子学院, 西安, 710071; 2. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 现有容错路由技术大多依赖重路由的解决方案, 通过绕行方式避开故障区域, 导致故障周围出现流量拥塞; 无关路由算法尽管降低了路由开销, 但其容错能力有限。针对存在故障节点或故障链路的片上网络, 在网络资源受限的情况下, 提出了一种不需要提前构建绕行路径的无虚通道低开销无关容错路由策略(OFTR)。当检测到当前节点与目标节点对之间无故障时, 采用 FTOE-APA 规则路由数据包, 实现了路径选择的多样性; 当检测到节点或链路故障时, 根据源节点、当前节点以及目的节点的相对位置关系动态修改输出端口的优先级, 使数据包可以通过最短路径转发, 最大限度地减少重路由。OFTR 路由策略通过改进的奇偶转向规则和动态改变输出端口的优先级既避免了网络死锁, 又降低了数据包进入故障周围的概率。仿真结果表明: OFTR 路由策略降低了网络平均延迟, 节约了网络开销, 与其它确定性容错路由算法相比, 饱和吞吐率平均提高了 8% 以上。

关键词 片上网络; 无关路由; 故障容错; 低开销

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.01.014

中图分类号 TN47; TP302.1 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)01-095-08

A Low-Cost Oblivious and Fault-Tolerant Routing Strategy for NoCs

GUAN Jiao^{1,2}, CAI Jueping¹, WANG Yequn², GAO Yun²

(1. School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Information and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract Although the re-routing solutions can avoid the faulty area by detouring, yet leads to the congestion of traffic around the fault with most of the existing fault-tolerant routing technologies relying on the re-routing solutions. The oblivious routing algorithm reduces the routing overhead, but the fault-tolerance is limited. In view of the NoC with faulty nodes or faulty links under condition of the limited network resources, a low-cost oblivious and fault-tolerant routing (OFTR) strategy without virtual channels is presented to avoid the bypass loops and the bypass links in advance. If the fault from the current node and the target node are not detected, the FTOE-APA rules route data packets are adopted to achieve the diversity of routing paths. Otherwise, the priority of output port can dynamically modified according to the relative positional relationship between the source node, the current node, and the target node. By doing so, the data packets can be retransmitted through the shortest path, minimizing the number of rerouting obvi-

收稿日期: 2022-03-11

基金项目: 陕西省重点研发计划(2021ZDLGY02-01)

作者简介: 关 娇(1982—), 女, 安徽阜阳人, 博士生, 研究方向为微电子与固体电子学。E-mail: guan3721@163.com

引用格式: 关娇, 蔡觉平, 王叶群, 等. 低开销的片上网络无关容错路由策略[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(1): 95-102. GUAN Jiao, CAI Junping, WANG Yequn, et al. A Low-Cost Oblivious and Fault-Tolerant Routing Strategy for NoCs [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(1): 95-102.

ously. Benefiting from the improved OE-turn rule and the dynamic priority of output port rule, the OFTR algorithm can avoid network deadlock, and reduce the probability of data packets entering the fault surrounding region. The simulation results show that the OFTR algorithm increases the saturation throughput rate, and saves network overhead. Compared with other deterministic fault-tolerant routing strategy, the saturation throughput of OFTR strategy increases by 8% above the average.

Key words network-on-chip; oblivious routing; fault-tolerant; low-cost

众核处理器的互连架构由片上网络(network on chip, NoC)构成。片上系统中的所有组件必须能够容忍部分故障。如果某个内核发生故障,它就会被隔离或完全关闭,不影响其他内核之间的数据包传输。但是,一旦路由器或链路发生故障,就不能简单地丢弃故障组件,因为这会导致网络中的数据包被阻塞和丢弃,单个链路故障就可以导致整个芯片停止通信或造成死锁^[1-5]。

NoC 受到片上实际的面积以及功耗的限制,为了提升系统的性能,AFTR 算法^[6]和 AReF 算法^[7]将 double-Y 结构(Y 方向上需要 2 个虚拟通道来构建路径)应用于片上网络,并利用尽量少的虚拟通道完成更大程度容错路由。这两种算法为了避免死锁现象分别使用的是 NMAd-y 和 AbTM 转向模型。为了事先获取故障的具体位置,AReF 算法在每一个路由器中利用 8 位的故障向量对 4 个直接以及间接的邻居节点的故障情况进行表示。AFTR 算法则用 16 位的故障向量来对 2-hop 里面的 16 条不同链路的相关状态信息进行表示。AReF 算法适用于单故障节点的容错,适当条件下也可适用于多故障节点的容错。AFTR 算法改进了 Made-Y 转向模型,提出了 NMAd-y 转向模型,具有更高的自适应度,可适用于多故障的容错。

针对存在故障节点或故障链路的 NoC,在网络资源受限的情况下,本文提出了一种不需要提前构建绕行环路和绕行链路的无虚通道低开销无关容错路由策略(Oblivious and fault-tolerant routing, OFTR),能够根据网络中故障的位置动态调整健康路径的可用性,减少重新路由,可以从理论上证明其无死锁特性。

1 无关容错路由算法

1.1 转向模型

在 2D mesh 网络中,为了使 OE 转向模型更适用于容错路由算法中,采用 FTOE^[8]转向模型,如图 1 所示。数据包在位于偶数列的节点上不允许 NW 和

ES 转向;数据包在位于奇数列的节点上不允许 SW 和 EN 转向。该模型对位于奇数列和偶数列的节点分别禁止了不同的转向,即不是每个节点都禁止相同的转向,因此它能提供更加均衡的路由自适应性。

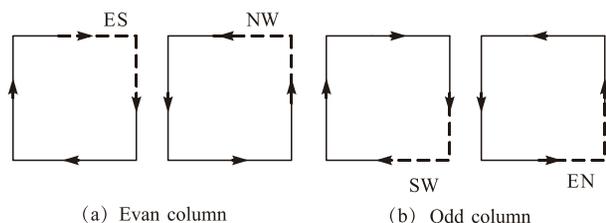


图 1 FTOE 转向模型

1.2 故障模型及故障感知

本文采用类似于 CAFTA^[9]和 Immnet^[10]的简单粗粒度故障模型,其中路由器故障不仅会禁用路由器本身,还会导致所有连接的链路禁用。如图 2(a)所示,网络中有 2 个路由器故障(黑色部分),考虑到故障模型的最终网络拓扑见图 2(b)。

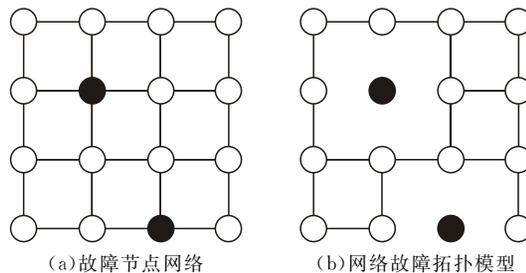


图 2 带有 2 个故障节点的 4×4 2D mesh NoC

为了避免遍历不必要的非最短路径,每个路由器都需要知道其周围路由器的健康状况。容错路由算法根据邻居故障信息来作出可靠的路由决策。这种邻居故障信息也称为故障前瞻。全局故障信息以过度的开销和性能下降为代价为系统提供了网络故障前瞻。AReF 算法^[7]在每个路由器中使用 1 个 8 位故障向量来表示其 4 个直接和 4 个间接邻居的故障状态,见图 3(a)。本地故障信息限制了网络中故障的预见性,但资源需求可以保持在最低限度。因此,OFTR 算法在每个路由器中使用 1 个 4 位故障向量来表示其 4 个直接邻居的故障状态,见图 3(b)所示。

为了获取运行过程中网络中每个路由器的状态信息,每个路由器都配备了专用的内建自测试(built-in-self-test, BIST)单元来检测运行时的故障, BIST 单

元可以放置于路由器网络接口中,根据测试向量生成模块(test pattern generator, TPG)产生测试数据,目的路由器接收到数据包后,发送给测试响应分析模块(test response analyzer, TRA)进行分析响应,判断是否出现故障,完成测试过程。

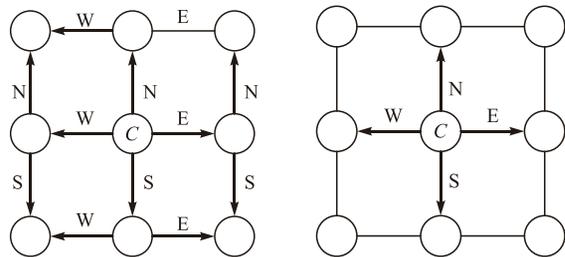


图 3 故障感知模型

1.3 健康节点路由请求仲裁

在当前节点周围无故障节点且不存在禁止转向的情况下,可以通过路由器的仲裁机制选择下一个节点。

路由器的仲裁机制影响负载均衡,传统的轮询仲裁器通过轮询进行路由请求的裁决,在请求被授权后,优先级由最高降到最低,轮询仲裁器(round-robin, RR)的仲裁结果依赖排队顺序以及上一次的仲裁结果,不能做到完全公正裁决。可变优先级仲裁器(alterable priority arbitration, APA)^[11]改变了轮询仲裁器的仲裁方式,改为按照相同的概率随机授权。APA 仲裁器解决了 RR 仲裁器根据前一次赋权结果决定下一次赋权所出现的问题,大大增加了仲裁的公平性。因此,采用 APA 仲裁器作为所有允许路由方向的仲裁选择,可以提供更公平的候选路径来缓解拥塞,减少数据包延迟,提高网络性能。本文在当前节点周围无故障且不存在禁止转向的健康节点和路径中,采用 APA 仲裁器增加路径选择的多样性,APA 仲裁器不存在绕行环路,因此是最短路径路由选择策略。

1.4 OFTR 无差错路由策略

OFTR 路由策略的显著特征是能够在给定源节点和目标节点对之间出现故障的情况下支持最短路径路由。如果源-目标节点对不在同一行/列中,所提出的方法确保使用幸存的最短路径路由。否则,重新路由是不可避免的,因为源-目标节点对之间唯一的最短路径路由被破坏。如果某个数据包的目标节点位于当前节点的西北(东北、西南、东南、东、西、北、南)方向,则这个数据包被称为 north-west (northeast, southwest, southeast, eastward, westward, northward 和 southward)数据包。

OFTR 算法根据下列 4 种情况规则在区域内的路由数据包。其中 C、S、D、O 和 E 分别表示当

前节点、源节点、目标节点、奇数列和偶数列。

情况 1 无故障情况下,数据包根据 FTOE-APA 规则路由。

1)当 D 在 C 的东南或西北侧时,为了避免 NW 和 ES 转向,禁止数据包在偶数列向南向和北向传输。数据包不受奇数列的限制,可采用 APA 仲裁选择所有最短路径的输出端口。

2)如果 D 在 C 的东北或西南侧时,为了避免 EN 和 SW 转向,则禁止数据包在奇数列上北向和南向路由。数据包不受偶数列的限制,其中采用 APA 选择所有最短路径的输出端口。FTOE-APA 改进了候选输出路径的数量,保证了无故障情况下网络的负载均衡。

3)特殊情况是当 D 位于东北方向且为奇数列时,向东的数据包从 X_{D-1} 列向 Y 方向路由,以避免 X_D 列中出现 EN 转向。当 D 位于东南方向且为偶数列时,向东的数据包从 X_{D-1} 列向 Y 方向路由,以避免 X_D 列中出现 ES 转向。

情况 2 northeast 和 southeast 数据包路由遇到故障。

根据最短路径路由规则,northeast 数据包可以朝北或朝东传输数据包。对于图 4 中的情况,每个输出端口设置了优先级,其中 1 代表最高优先级,2 代表最低优先级。当 C 位于偶数列时,东输出端口和北输出端口具有相同优先级,相反当 C 位于奇数列时,东输出端口具有更高优先级。特殊情况是当 C 位于奇数列时,并且 D 位于 X_{C+1} 列时,北输出端口具有更高优先级。

当 C 位于偶数列时,朝北方向(东方向)发生故障,则首先向东(北)传输数据包到偶数列,绕过故障端口,如图 4(a)所示。

当 C 位于奇数列时,朝东方向发生故障,则首先向北传输数据包到下一跳,然后朝东传输数据包,绕过故障端口,如图 4(b)所示。

当 C 位于偶数列时,D 位于 X_{C+1} 列,朝北方向发生故障,则首先朝西传输数据包到下一跳,然后朝北传输数据包,绕过故障端口,如图 4(c)所示。

上述传输方式也可扩展到 southeast 数据包。

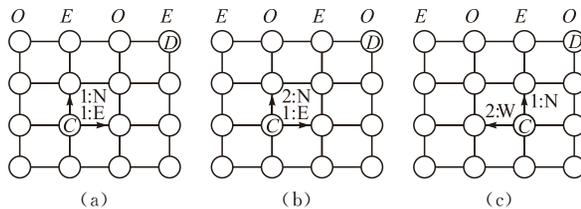


图 4 northeast 数据包的传输路径

情况 3 northwest 和 southwest 数据包路由

对于源-目的节点 $S(2,0) \rightarrow D(5,6)$,在偶数列上,OFTR 路由策略可以提供更多的候选路径传输数据包。数据包向东北方向路由,根据规则 1,对于偶数列不存在方向限制,需要对 E 方向和 N 方向进行仲裁。对于奇数列,禁止 N 方向,因此数据包将按照 E 方向路由,直到数据包抵达目的节点(5,6)。如果中间某个节点有 2 个方向可选择,则数据包可能会被路由到节点(5,4),那么根据情况 3 和情况 2 传输数据包到目的节点(5,6)。RFTR 路由策略中,数据包根据 YX 规则路由到目的节点(5,6)。XY-YX 路由策略中,数据包首先根据 XY 规则路由到节点(3,0),然后根据 YX 规则路由到目的节点(5,6)。

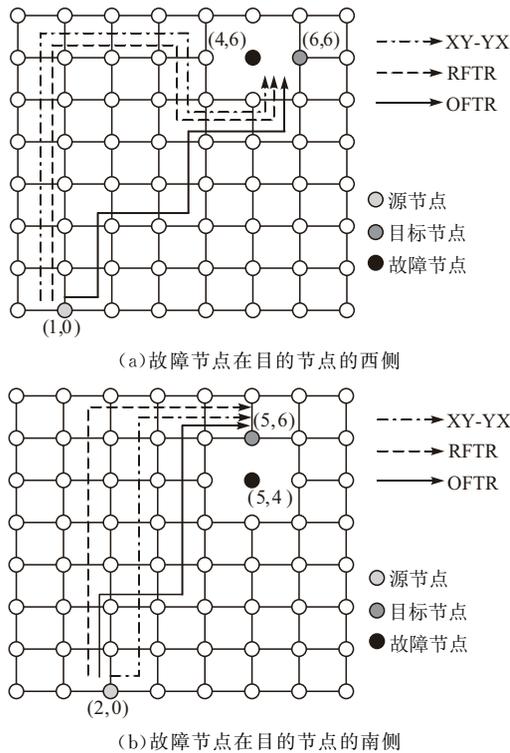


图 9 8×8 网络中的路由实例

从上述 2 个实例可以看出,RFTR 路由策略和 XY-YX 路由策略具有确定性,特别是 XY-YX 路由策略为了避免死锁,数据包只能在奇数列才能向 Y 方向传输数据包,偶数列只能向 X 方向传输数据包。然而 OFTR 算法可以提供更多的候选路径传输数据包,网络流量更均衡。

1.6 无死锁证明

文献[14]指出:只要通道依赖图没有出现封闭环路,那么该路由算法无死锁。为了证明 OFTR 算法无死锁,首先需要证明数据包在路由过程中都没有违背 FTOE 转向规则。如果某些数据包违背了 FTOE 转向规则,但是没有形成通道依赖环路,那么依然不会产生死锁。

引理 当被 FTOE 转向模型禁止的转向出现

时,该转向不能形成通道依赖环路。

证明 如果数据包所形成的每个通道依赖环路中至少缺少一条边界,那么网络无死锁。在顺时针环路中,当数据包在偶数列进行了 ES 转向,那么它在南侧邻接节点上只能进行 SE 转向,因此顺时针通道依赖环路的最东边边界不能被形成,如图 10(a)所示。当数据包在偶数列发生了 NW 转向,那么它在西侧邻接节点上只能进行 WN 转向,这样就破坏了逆时针通道依赖环路的最北边边界的形成,如图 10(b)所示。当数据包在奇数列发生了 SW 转向,那么它在西侧邻接节点上只能进行 WS 转向,这样就破坏了顺时针通道依赖环路的最南边边界的形成,如图 10(c)所示。当数据包在奇数列进行了 EN 转向,那么它在北侧邻接节点上只能进行 NE 转向。因此,不能形成逆时针通道依赖环路的最东边边界,如图 10(d)所示。

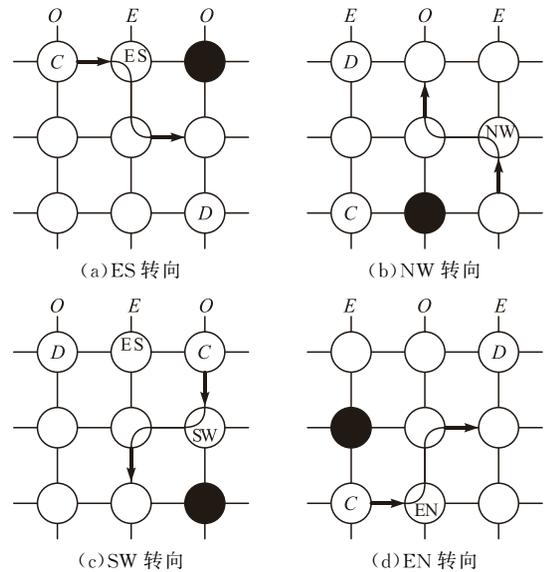


图 10 FTOE 转向模型中禁止的转向传输

当数据包正常路由时,根据 FTOE-APA 规则路由,属于最小路径路由,不能形成通道依赖环路。

根据情况 2 和情况 3, northeast、southeast、northwest 和 southwest 数据包路由时都有 2 个最短路由路径,优先级最高的端口传输数据包不会引入被 FTOE 模型禁止的转向。当优先级最高的端口存在故障时,则会选择次优的端口传输数据包,部分数据包在路由过程中会引入被 FTOE 模型禁止的转向。根据引理,这些数据包路由过程中,发生被禁止的转向之后,都会在其邻居节点作出相应的操作,因此不会形成通道依赖环路。

根据情况 4, eastward、westward、northward 和 southward 数据包路由,输出端口优先级有 3 个等级。优先级最高的输出端口是唯一一个最短路由

径,传输数据包不会引入被 FTOE 模型禁止的转向。当优先级最高的端口存在故障时,则会选择次优的输出端口传输数据包,部分数据包在路由过程中会引入被 FTOE 模型禁止的转向。根据引理,这些数据包路由过程中,发生被禁止的转向之后,都会在其邻居节点作出相应的操作,因此不会形成通道依赖环路。当故障节点位于网络边界时,数据包的输出端口会变少,那么优先级为 3 的输出端口将会被用来传输数据包。当故障节点位于网络边界时,至少缺少一个健康邻居节点,因此不会形成通道依赖环路。

因此得到结论: OFTR 算法无死锁。

2 仿真分析

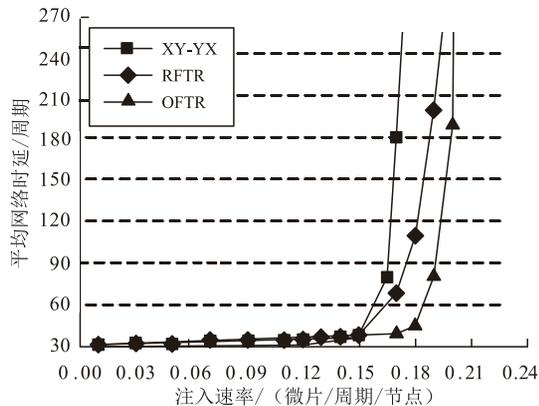
评价路由算法优劣的指标主要有:网络平均延迟、饱和吞吐率和功耗。延迟就是数据包从源节点注入网络开始到到达目的节点这个过程中所需要的时间,延迟越大表明路由算法或者网络性能越差;吞吐率就是单位时间内网络中每个路由器发送或者接收的切片平均数量,吞吐率表征了系统对数据请求的处理能力;功耗是片上系统开销的主要来源之一,直接影响片上系统的性能。本节采用饱和吞吐率^[15](平均延迟等于零负载延迟的两倍的数据包注入速率)和功耗开销作为评估指标分析 OFTR 路由策略的性能。

2.1 动态分析

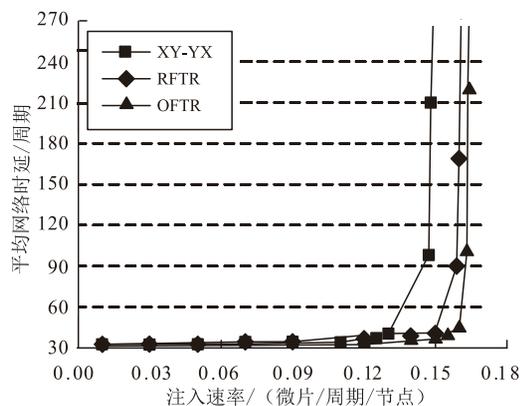
本节采用 BookSim2.0 评估 OFTR 路由策略、XY-YX 路由策略^[12]和 RFTR 路由策略^[13]的平均网络延迟,并采用 3 种标准通信模式:均匀随机(uniform)、置换(transpose)和热点(hotspot)模式。置换通信模式是对源节点坐标进行置换,从而确定目标节点的坐标,例如:对于一个 $X \times Y$ 的 2D mesh 网络,源节点 (i, j) 上的数据包在 transpose 模式下传输到节点 $(X-1-j, Y-1-i)$ 。热点通信模式基于均匀随机模式,热点节点为 $(4, 4)$,数据包发送到热点节点的概率为 5%。仿真网络拓扑为 8×8 2D mesh。数据包大小在 2~5 个 flit 之间随机选择。2 个相邻节点间由 2 个单向通道连接,每个通道有 8 个 flit 缓冲区。模拟器预热 10 000 cycles,然后测试 40 000 cycles,最后以不同数据包注入速率下的网络平均延迟作为仿真的性能指标。

图 11(a)显示了无故障网络中,在 uniform 模式下 3 种路由策略的性能差别不是很大,这是因为当目标节点以均匀随机的方式选择时,流量本质上

具有负载平衡性。根据图 11(b)可知,一旦网络中发生故障,与 XY-YX 路由策略相比,OFTR 路由策略的饱和吞吐率增加了 8.5%。与 RFTR 路由策略相比,OFTR 路由策略的饱和吞吐率增加了 1.88%。



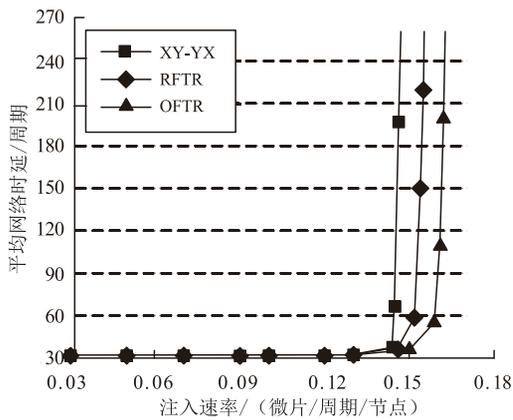
(a)无故障



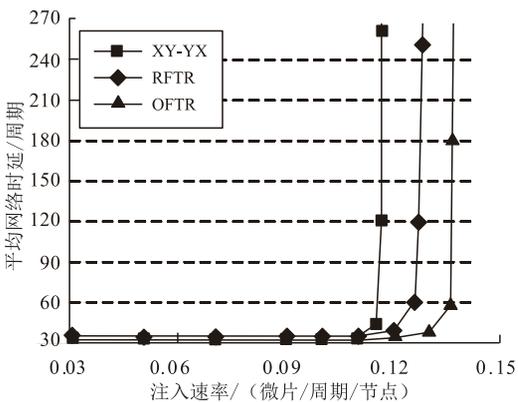
(b)1个节点故障

图 11 容错路由策略在 uniform 模式下的平均延时

图 12(a)显示了 3 种路由策略在 transpose 模式下的网络延时。在该模式下,网络会经常产生很多具有相同目标节点的数据包,很容易发生网络负载不均衡,特别是网络中心节点很快进入拥塞。3 种路由算法中,XY-YX 路由策略的平均延时最高,这是因为 XY-YX 路由策略中,数据包只能在奇数列才能向 Y 方向传输数据包,在偶数列才能向 X 方向传输数据包。因此,奇数列很快进入拥塞。RFTR 路由策略对奇偶列的使用情况更多于源节点所处的列有关,OFTR 路由策略自适应性更强。由图 12(b)可见,一旦网络中发生故障,transpose 模式下,与 XY-YX 路由策略相比,OFTR 路由策略的饱和吞吐率增加了 17.17%;与 RFTR 路由策略相比,OFTR 路由策略的饱和吞吐率增加了 7.48%。这是因为一旦数据包检测到故障,RFTR 路由策略的确定性绕行路径的路由策略就无法与具有多个候选路径的 OFTR 路由策略竞争。



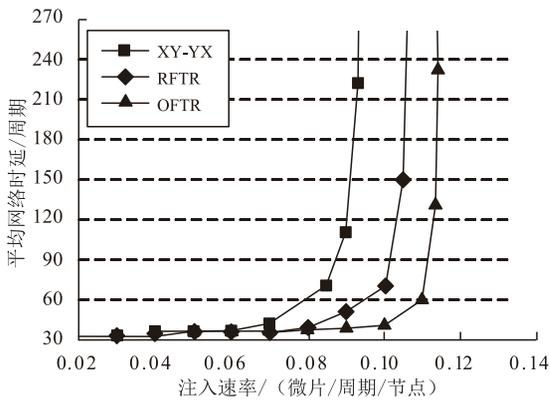
(a)无故障



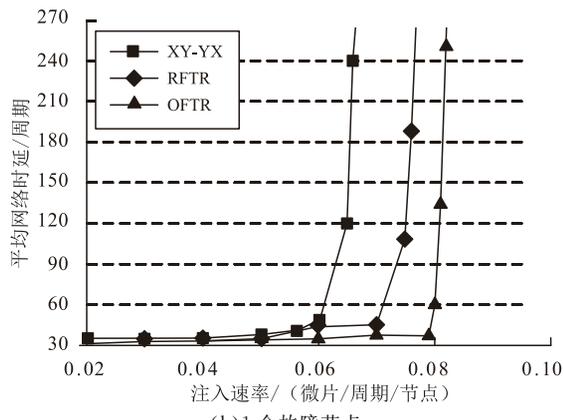
(b)1个故障节点

图 12 容错路由策略在 transpose 模式下的平均延时

图 13 显示了 3 种路由策略在 hotspot 模式下的网络延时。hotspot 模式使得网络拥塞频繁发生。无故障情况下,比起 RFTR 策略和 XY-YX 策略,OFTR 路由策略的饱和吞吐率分别增加了 8.1%和 22.04%。发生故障情况下,比起 RFTR 策略和 XY-YX 策略,OFTR 路由策略的饱和吞吐率分别增加了 8%和 24.61%。这 3 种路由策略都是最短路径路由策略,当竞争高时,最短路径对数据包延迟有显著影响。由于 RFTR 策略的确定性绕行路径有可能在故障区域周围制造更多的热点。OFTR 策略则是由于多路径的选择,数据包进入故障周围的概率降低了很多。



(a)无故障



(b)1个故障节点

图 13 容错路由策略在 hotspot 模式下的平均延时

2.2 功耗分析

实验采用 ITRS 65 nm 工艺参数,工作频率 500 MHz,工作电压 0.8 V 和 64 bit 的链路带宽。网络参数为 8×8 2D mesh,故障节点设置到网络中心节点(4,4)。仿真 RFTR 策略和 OFTR 策略,在 transpose 通信模式下的功耗,仿真结果见表 1。

表 1 路由策略在 8×8 网络中 transpose 模式下的功耗

| 网络注入率 | RFTR 路由策略下功耗/W | OFTR 路由策略下功耗/W |
|-------|----------------|----------------|
| 0.121 | 1.793 4 | 1.776 1 |
| 0.127 | 1.921 4 | 1.877 3 |

从表 1 中可以看出,网络处于中等注入率 0.121 时,OFTR 路由策略和 RFTR 路由策略的功耗开销差距不大,这是因为这 2 种路由策略都是最小传输路径路由策略。当网络注入率提高到 0.127 时,采用 RFTR 路由策略的网络即将达到饱和,功耗开销也急剧增加。RFTR 路由策略所需功耗比 OFTR 路由策略的功耗增加了 2.35%。这主要是因为 RFTR 路由策略的确定性绕行路径有可能在故障区域周围制造更多的热点。OFTR 路由策略则采用多路径选择,数据包进入故障周围的概率降低了很多。

3 结语

针对自适应容错路由算法在链路状态感知过程中占用大量网络资源和面积开销的问题,本文设计低开开销的无关容错路由策略,采用简单粗粒度故障模型、4 位向量来表示相邻链路状态,在非故障区域采用改进的奇偶转向模型,在故障区域采用改进的奇偶转向和可变优先级仲裁的转向模型,不需要提前构建绕行环路和绕行链路,充分利用最小路径传输数据包,可以动态地调整路由路径,并尽可能防止出现重新路由。仿真结果表明,OFTR 策略在提高

饱和吞吐量方面有很好的性能,而且数据包进入故障周围的概率有大幅的下降。

参考文献

- [1] BHANU V, SOUMYA J, CENKERAMADI L R. Fault-Tolerant Application-Specific Topology Based NoC and Its Prototype on an FPGA[J]. IEEE Access, 2021, 9: 76759-76779.
- [2] KHODADADI E, BAREKATAIN B, YAGHOUBI E, et al. FT-PDC: an Enhanced Hybrid Congestion-Aware Fault-Tolerant Routing Technique Based on Path Diversity for 3D NoC[J]. The Journal of Supercomputing, 2022, 78(1): 523-558.
- [3] YASREBI S, REZA A, NIKRAVAN M, et al. A Fuzzy Integrated Congestion-Aware Routing Algorithm for Network on Chip [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2021, 22(5): 741-756.
- [4] JAYSHREE, SEETHARAMAN G, PATI D. Reliable Fault-Tolerance Routing Technique for Network-on-Chip Interconnect[J]. Lecture Notes in Networks and Systems, 2022, 213:767-775.
- [5] 陈良昌, 刘召军, 张彦军. 基于 OPNET 的片上网络路由算法的建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(8): 248-252.
- [6] XIE R, CAI J, WANG P, et al. Low-Cost Adaptive and Fault-Tolerant Routing Method for 2D Network-on-Chip[J]. Journal of Circuits Systems & Computers, 2017, 100(12): 910-913.
- [7] BAHREBAR P, STROOBANDT D. Abacus Turn Model-Based NoC Routing for Interconnects with Switch or Link Failures[J]. Microprocessors & Microsystems, 2018, 59: 69-91.
- [8] XIN X, CAI J, XIE R. Simple Fault-Tolerant Method to Balance Load in Network-on-Chip[J]. Electronics Letters, 2016, 52(10):814-816.
- [9] DIMOPOULOS M, GANG Y, ANGHE L, et al. Fault-Tolerant Adaptive Routing under an Unconstrained Set of Node and Link Failures for Many-Core Systems-on-Chip[J]. Microprocessors & Microsystems, 2014, 38(6): 620-635.
- [10] PUENTE V, GREGORIO J A, VALLEJO F, et al. Immunit: A Cheap and Robust Fault-Tolerant Packet Routing Mechanism [J]. Proc Isca, 2004, 32(2): 198.
- [11] LIU L, ZHU Z, ZHOU D, et al. A Fair Arbitration for Network-on-Chip Routing with Odd-Even Turn Model[J]. Microelectronics Journal, 2017, 64:1-8.
- [12] KHICHAR J, CHOUDHARY S, MAHAR R. Fault Tolerant Dynamic XY-YX Routing Algorithm for Network on-Chip Architecture[C]//2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2). Coimbatore, India:IEEE,2017;1-6.
- [13] XIN X, CAI J, XIE R. Simple Fault-Tolerant Method to Balance Load in Network-on-Chip[J]. Electronics Letters, 2016, 52(10): 814-816.
- [14] DWLLY W J, SEITZ C L. Deadlock-Free Message Routing in Multiprocessor Interconnection Networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 1987, 36(5): 547-553.
- [15] SHANG L, PEH L S, JHA N K. Power Herd: A Distributed Scheme for Dynamically Satisfying Peak-Power Constraints in Interconnection Networks[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2005, 25(1):92-110.

(编辑:徐楠楠)