

WiNoC 中无线通信拥塞与故障感知的容错路由算法

欧阳一鸣¹, 贾博远¹, 李建华¹, 黄正峰², 梁华国²

(1. 合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽合肥 230009; 2. 合肥工业大学电子科学与应用物理学院, 安徽合肥 230009)

摘 要: 在无线片上网络中, 无线通信拥塞和故障对整个片上网络的通信效率具有严重影响. 为此本文提出了一种针对无线通信拥塞和故障的容错路由算法, 首先设计了无线通信拥塞和故障感知模型, 该模型能够感知无线节点通信对的拥塞和故障信息, 并对其编码发送给子网中的路由器; 然后子网中的路由器根据接收到的无线节点通信对状态信息, 判断数据包是否使用无线传输. 实验表明, 本文方案相较于对比对象能够在较小的额外面积、功耗开销下, 保证较低的网络延迟和较高的网络吞吐量, 并对无线节点通信对的永久性故障具有良好的容错能力.

关键词: 无线片上网络; 无线节点通信对; 容错; 拥塞控制; 路由算法

中图分类号: TP302 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)04-0662-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.04.007

Fault Tolerant Routing Algorithm for Wireless Communication Congestion and Fault Awareness in WiNoC

OUYANG Yi-ming¹, JIA Bo-yuan¹, LI Jian-hua¹, HUANG Zheng-feng², LIANG Hua-guo²

(1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

2. School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: In wireless networks-on-chip, wireless communication congestion and fault have a severe impact on the communication efficiency of the entire network-on-chip. Therefore, this paper proposes a fault-tolerant routing algorithm for wireless communication congestion and faults. Firstly, a wireless communication congestion and fault aware model is designed. The model can get the congestion and fault information of the wireless node communication pair, encode it and send it to the routers in subnet. Then the router in the subnet determines whether the data packet uses wireless transmission according to the received wireless node communication pair status information. Experiments show that the proposed scheme can guarantee lower network delay and higher network throughput under smaller additional area overhead and power consumption than the comparison schemes, and exhibit good performance to tolerant permanent faults of wireless node communication pairs.

Key words: wireless network-on-chip; wireless node communication pair; fault tolerance; congestion control; routing algorithm

1 引言

随着集成电路制造工艺的不断进步, 芯片上集成的处理核数目不断增加^[1], 传统金属互连片上网络 (network-on-chip, NoC) 面临着长距离多跳传输带来的高延迟、高能耗通信瓶颈. 为此有研究者提出了 3D 集成 NoC^[2]、光互连 NoC^[3]、射频互联 (Radio Frequency,

RF) NoC^[4]、无线 NoC^[5] 等新的片上互联技术. 其中无线 NoC 采用成熟的毫米波 (mm-wave) 技术及 Zig-Zag 天线, 不仅可以实现高效的片上长距离通信, 还拥有与 CMOS 兼容的优势^[6], 受到国内外研究者们的广泛关注.

在无线片上网络 (Wireless Network-on-Chip, WiNoC) 中, 长距离单跳无线传输有效地解决了传统 NoC 多跳

传输的通信瓶颈问题. 然而无线接口 (Wireless Interface, WI) 占据了较大的片上面积和功耗开销^[7,8], 并且可用的无线信道数量有限^[6], 因此无法为每个片上路由器配备专用的 WI. 为此文献[10]提出了混合无线 NoC 拓扑结构, 将整个片上网络划分为多个子网, 子网内配备无线路由器 (Wireless Router, WR), 用于长距离通信. 这种 WiNoC 分层架构能够很好地平衡片上网络性能、功耗和面积开销, 被大量研究和广泛采用.

在采用分层架构的 WiNoC 中, WR 承载着更多的通信任务, 并且无线信道作为网络中的共享资源, 在同一时刻只有一个 WR 通信对占用无线信道进行数据传输, 因此容易在 WR 处发生拥塞. 为此文献[11]提出了针对分层 WiNoC 的路由算法, 只有当无线传输节省一定跳数时, 才使用 WR 传输数据; 文献[12]根据 WiNoC 中的数据包延迟, 动态调整注入数据包的大小; 文献[13]提出用于 WI 的并行 FIFO, 提高无线节点的数据传输效率. 上述拥塞控制方案, 虽然能够有效地平衡网络负载, 降低网络延迟. 但无法从根本上解决当网络负载增大时, 大量数据包涌入 WR 而形成热点的问题.

无线链路的比特错误率 (Bit Error Rate, BER) 约为 10^{-7} 远高于传统有线链路^[14], 并且 WR 负责大量长距离数据包的传输, 当其发生故障时对网络性能的影响更大. 因此针对无线通信故障, 探索有效的容错机制刻不容缓. 文献[15]提出了一种可配置的编码方案, 根据 BER 的变化动态切换路由器的数据编码状态; 文献[16]提出了动态感知两跳以内路径故障状态的 NoC 容错路由算法, 有效地避免了数据包传输经过故障节点; 文献[17]深入研究了片上网络的瞬时性和间歇性故障, 设计了一种基于重传的容错机制. 上述传统 NoC 容错方案, 不能在 WiNoC 中拥有良好的性能表现. 特别当无线通信发生永久性故障时, 如果按照传统 NoC 临近故障感知的方案处理, 将导致大量数据包在 WR 附近重路由或重传, 严重影响网络性能.

本文针对上述无线通信的拥塞和故障问题, 提出了一种基于 WR 通信对故障和拥塞感知的容错路由算法, 主要有以下贡献: (1) 在 WR 处添加 WR 通信对故障、拥塞感知模块, 感知 WR 通信对的故障和拥塞信息并对其进行编码, 发送给子网中的路由器. (2) 子网中的路由器根据接收到的 WR 通信对状态编码, 判断数据包是否使用无线传输; 在不使用无线传输时, 采用拥塞避免机制降低 WR 周围的通信负载. (3) 在 WR 通信对无故障时, 子网路由器根据接收到的 WR 通信对状态编码, 平衡有线无线链路的综合利用率; 当 WR 通信对发生永久性故障时, 子网路由器能够提前感知并禁用, 避免大量数据包在 WR 处重传.

2 无线片上网络模型, 拥塞及故障分析

2.1 WR 架构及 WiNoC 拓扑结构

图 1 显示了 WR 的基础架构, 其由基础路由器 (Basic Router, BR) 和 WI 组成. BR 由输入输出端口, 路由计算单元 (Routing Computation, RC), 交叉开关分配单元 (Switch Arbitration, SA), 虚通道分配单元 (Virtual Channel Allocation, VA), 交叉开关 (Crossbar) 等部件组成. 作为 WR 的重要组成部分, WI 通过相应的输入、输出端口与 BR 连接, 用于接收和发送无线数据. WI 由片上天线和无线收发器 (Wireless transceiver) 组成. 如图 1 所示, 片上天线为毫米波 Zig-Zag 天线; WI 接收端 (Receiver, RX) 由低噪放大器 (Low Noise Amplifier, LNA), 解调制器 (Demodulator), 解串行化器 (Deserialzer), 接收缓冲区 (Receive Data buffer, RD_buffer) 组成; WI 发送端 (Transmitter, TX) 由发送缓冲区 (Transfer Data buffer, TD_buffer), 串行化器 (Serializer), 调制器 (Modulator), 功率放大器 (Power Amplifier, PA) 组成.

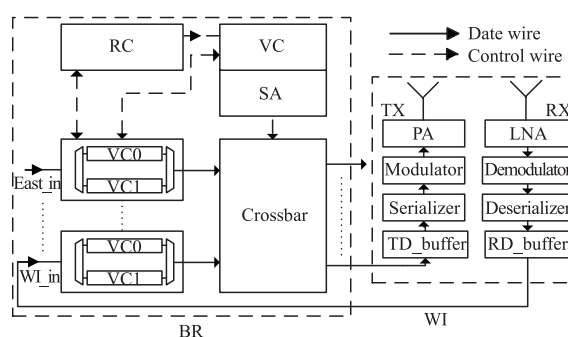


图1 WR基础架构

本文采用分层 WiNoC 拓扑结构^[9], 将整个片上网络划分为多个子网, 每个子网放置一个 WR, 用于子网间的长距离单跳通信. 以 10×10 的基础 mesh 结构为例, WR 放置在 (2,2) (2,7) (7,2) (7,7) 的位置.

2.2 无线通信拥塞问题

WR 需要处理大量的长距离单跳通信任务, 此外文献[18]还指出了数据传输具有突发性和热点性, 因此在 WiNoC 的无线节点处容易发生拥塞. 无线通信拥塞可以分为两类: 一类是无线发送端拥塞, 由子网中过量数据包请求 WR 传输引起; 另一类是无线接收端拥塞, 由 WR 连续接收无线数据包, 不能及时转发到子网中的目的节点引起. 无线通信拥塞会增大无线传输的等待延迟, 况且当相应的 WI 缓冲区满时, 会有数据包的丢失和重传, 严重影响整个片上网络的通信效率. 在本文方案中, 子网内路由器能够感知 WR 通信对的接收端和发送端缓冲区利用率, 控制数据包使用无线传输的概率.

2.3 无线通信故障问题

随着片上核数目的增多,长距离通信占比不断增大^[19],无线传输承担着更为重要的通信任务,并且无线传输具有更高的比特错误率.因此需要在无线节点增加相应的容错机制.文献[22]对 NoC 容错机制作了系统总结,现有的容错技术一般采取数据冗余和路径冗余两种方法.其中路径冗余一般采用临近故障感知的方法,容易在故障节点附近形成拥塞,不利于 WiNoC 的高效通信;数据冗余一般采用编码机制,能够很好地容忍瞬时性错误,但在比特错误率很低时编解码模块带来了额外的功耗开销并加重了网络负载,同时数据编码机制不能有效地应对永久性故障.在本文提出的 WR 通信对故障感知机制中,WR 未检测到无线传输错误时,不启动数据编解码模块,以降低功耗开销;WR 检测到无线传输错误时,则启用容错编码机制,提高数据传输的鲁棒性.WR 检测到容错编码机制无法恢复的永久性故障时,将相应的 WR 通信对标记为不可用,并将此标记信息编码后发送给子网中的路由器.

3 拥塞与故障感知的 WR 设计

本文针对无线通信的拥塞和故障问题,设计了拥塞与故障感知的无线路由器(Congested and Fault Aware Wireless Router, CFWR)和拥塞避免的容错路由算法.CFWR 能够感知 WR 通信对的拥塞和故障信息,并将该信息编码,用信号线传递给子网内所有路由器.子网中的路由器根据接收到的 WR 通信对状态信息,决定数据包是否使用无线传输,提高了 WiNoC 性能.

3.1 CFWR 整体架构

CFWR 架构如图 2 所示,在无线路由器的基础上,增加了 WR 通信对拥塞感知模块(Congestion Awareness Module, CAM),故障感知模块(Fault Awareness Module, FAM),状态编码模块(Status Coding Module, SCM)以及数据编解码模块(Encoder, Decoder).CAM 负责动态感知 WR 通信对拥塞信息.FAM 负责感知无线传输是否发生错误、判断是否启用数据编解码模块和 WR 通信对是否存在永久性故障.SCM 将 WR 通信对拥塞和故障信息编码为 2bit 的 WR 通信对状态向量,并通过相应信号线传递给子网中的路由器.本文接下来的部分会对所添加的模块进行详细的设计说明.

3.2 CAM 模块设计

在 WiNoC 中感知无线通信的拥塞状况,控制数据包使用无线传输的比例,对保障网络性能极为重要.本文提出了一种新颖的拥塞感知模型,动态感知本地无线接口 TD_buffer 和其余 WR 无线接口 RD_buffer 的利用率.发送端 TD_buffer 利用率,代表无线路由器将数据包发送到目的子网 WR,需要在无线节点等待的时间;

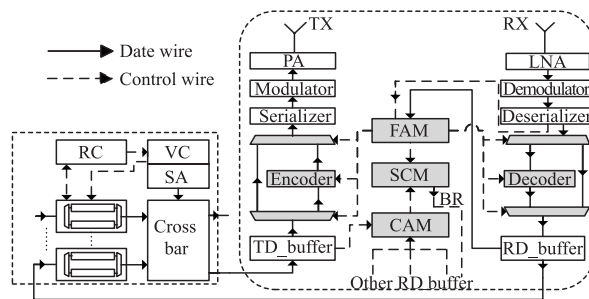


图2 CFWR架构图

接收端 RD_buffer 利用率,代表 WR 在接收到无线传输的数据包后,将数据包转发至子网内目的的路由器,需要在无线节点等待的时间.

表 1 WR 通信对拥塞信息表

WR 通信对	拥塞状态值
WR ₀ -WR ₁	00,01,10,11
WR ₀ -WR ₂	00,01,10,11
WR ₀ -WR ₃	00,01,10,11

在缓冲区的数据操作中,读、写指针会有相应的位置变动,缓冲区控制模块根据读、写指针的相对位置,判断缓冲区的空、满及利用率.当 WI 的 TD_buffer 和 RD_buffer 有数据读写操作时,则检查其缓冲区利用率是否达到阈值,若未达到则将标志位置“0”,否则置“1”.当标志位发生变化时,更新 CAM 中的 WR 通信对拥塞信息表,并将该表发送给 SCM 模块.表 1 是 WR₀ 中的 WR 通信对拥塞信息表,每个 WR 通信对的拥塞信息用 2bit 表示,分别代表本地 WI 的 TD_buffer 和其余 WR 无线接口 RD_buffer 利用率是否达到阈值.

3.3 FAM 模块设计

当数据包使用无线传输时,相应的 WR 会在一定时间内接收到确认数据包.如图 3 所示,在 FAM 模块中所有 WR 通信对共用 Counter1,用于控制 FAM 中的编码控制(Coding Control, CC)模块;每个 WR 通信对均有 Counter2,用于判断 WR 通信对是否发生永久性故障.FAM 模块在 RD_buffer 传输数据时,并行读取缓冲区中的数据包,并判断数据包类型.若读取到的数据包不为确认数据包,则将该数据包丢弃.若为确认数据包,则读取确认信息中的目标 WR 地址字段,判断确认数据包是否为正确确认信息(Acknowledge packet, ACK).若为正确确认信息则将相应 Counter2 置“0”.若为错误确认信息(NACK),且 Counter1 为“0”,则表示数据编码模块未启动,此时将 Counter1 置“1”,通知 CC 启动编码模块,同时将相应 Counter2 置“0”;若为错误确认信息(NACK),且 Counter1 的值为“1”,代表编码模块已经启动,此时将相应 Counter2 的值加 1.当 Counter2 的值为

“2”时,代表 WR 通信对在启动数据编码后仍有连续的数据传输错误,此时定义 WR 通信对发生永久性故障,并将故障信息发送到 SCM.

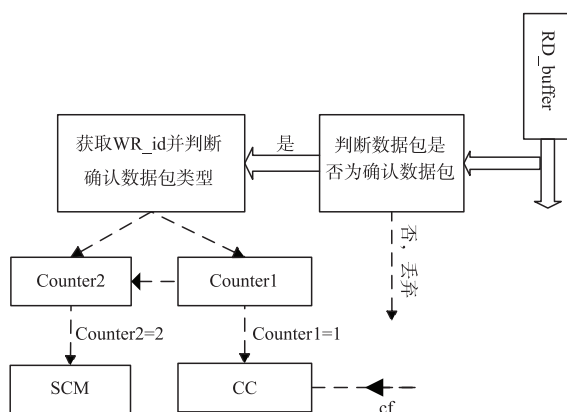


图3 FAM示意图

CC 及编解码模块如图 4 所示,当 Counter1 的值为“1”时,代表已经检测到无线传输错误,此时通知 CC 选通带有编码器的数据通路. 编解码器采用分离式 ECC 编码^[17],把数据微片的 128 位数据划分为四组,每组 32 位数据,需要 6 位编码冗余. 编解码器可同时纠正 4bit 的数据错误,提高了无线传输的可靠性. 同时数据编码单元会在数据包头微片中增加编码标志位(coded flag, cf),当目标 WR 在解串行化后检测到编码传输的数据时,则通过 CC 选通带有解码单元的数据通路.

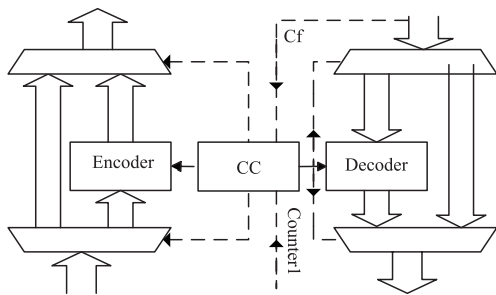


图4 CC及编解码模块示意图

3.4 SCM 模块设计

SCM 从 CAM 中读取 WR 通信对拥塞信息,并从 FCM 接收 WR 通信对永久性故障信息,将这些信息进行编码,得到 WR 通信对状态表. 表 2 为 WR₀ 中的 WR 通信对状态表,每个 WR 通信对状态值信息需要 2bit 表示. 在相应 WR 通信对之间,“00”表示 TD_buffer 和 RD_buffer 利用率均未达到阈值;“01”表示在 TD_buffer 和 RD_buffer 中有一个利用率达到阈值;“10”表示 TD_buffer 和 RD_buffer 利用率均已达到阈值,此时无线传输的等待延迟较大,应尽量降低无线通信的利用率;“11”表示相应 WR 通信对存在永久性故障,且通过数

据编解码方案无法解决,此时禁用故障的 WR 通信对,数据包通过有线或其他 WR 通信对进行传输.

表 2 WR 通信对状态表

WR 通信对	状态值
WR ₀ -WR ₁	00,01,10,11
WR ₀ -WR ₂	00,01,10,11
WR ₀ -WR ₃	00,01,10,11

在每个时钟周期,SCM 检查接收到的故障和拥塞信息,计算 WR 通信对状态表并与原表比较,若有不同则进行更新. 当 WR 通信对状态表更新时,将表中的信息传递给子网中的路由器. 在本文方案中,WR 通信对状态表共计 6bit,采用在相邻路由器间增加专用控制线的方法,将表中的信息传递到子网内每个路由器.

4 拥塞避免的容错路由算法

本文针对无线通信可能出现的拥塞和故障问题,提出了拥塞避免的容错路由算法. 在路由算法中来自 CFWR 的 WR 通信对状态信息用 Δ 值表示. 只有当使用无线通信节省的跳数大于 Δ 时,选择使用无线通信. 本文采用虚拟输出队列(Virtual Output Queue, VOQ)机制避免死锁和头阻塞的发生^[20]. 在本文采用的 10×10 基础 mesh 拓扑中,路由算法的 Δ 根据 WR 通信对状态信息不同值 00、01、10、11 分别取 2、3、4、18. 路由算法执行的步骤如下.

(1) 判断数据包是否采用无线传输,若采用无线传输则执行步骤(2),否则执行步骤(3). 如果数据包源节点和目的节点位于同一子网,则不采用无线传输,执行步骤(3);如果源节点和目的节点位于不同子网,则计算有线传输跳数 H_B 、无线传输跳数 H_W ,若满足 $H_W + \Delta < H_B$,则采用无线传输,执行步骤(2),否则采用有线传输,执行步骤(3).

(2) 将数据包采用有线 XY 路由算法从源节点发送至本子网 WR;本子网 WR 通过无线传输,将数据包发送至目的子网的 WR;目的子网的 WR,通过有线 XY 路由算法将数据包发送至目的节点.

结束路由算法.

(3) 计算 Δ_{XY} 、 Δ_{YX} ;其中 Δ_{XY} 、 Δ_{YX} 分别为 XY、YX 路由路径中 X 行、Y 列与源节点所在子网的无线路由器(WR_c)的距离之和.

(4) 选择相应的有线路由算法:

如果 YX 路由算法经过 WR_c,XY 路由算法不经过 WR_c,则采取 XY 路由算法;如果 XY 路由算法经过 WR_c,YX 路由算法不经过 WR_c,采取 YX 路由算法;

如果无法满足上述两个条件,则比较 Δ_{XY} 、 Δ_{YX} ,若 $\Delta_{YX} > \Delta_{XY}$,则采取 YX 路由算法;否则采取 XY 路由

算法.

路由算法通过不同的 Δ 值,动态调整无线链路的利用率,并在不使用无线传输时,路由算法采取拥塞避免机制,根据 Δ_{XY} 、 Δ_{YX} 的大小确定 XY 与 YX 路由路径的选择,尽量避免数据包传输经过 WR 周围.

此外本文提出的 CFWR 架构,及其相对应的路由算法,在 12×12 、 16×16 的分层 mesh 无线片上网络中,也有较好的性能表现,具有很好的可扩展性.

5 实验

5.1 实验建立

本文从网络性能、功耗、面积开销三个方面对所提出的方案进行分析.方案 1 为传统 NOC;方案 2 为文献[9]中提出的分层 WiNoC;方案 3 为本文中基于无线传输利用率的 WiNoC;方案 4 为本文方案,在方案 3 的基础上当不使用无线传输时,采取拥塞避免机制,避免在 WR 附近形成热点.

5.2 网络性能分析

在网络性能方面,本文采用扩展的 noxim^[21] 模拟器,在随机(Random)和热点(hotspot)流量模式下,对网络的平均延迟和吞吐量做出实验分析,实验的基本参数如表 3 所示.

表 3 实验基本参数设定

设置	参数
拓扑结构	10×10 mesh
子网数量	4
Packet 大小	2-6 flits
端口 VC 数量及深度	2 个 VC, 每个 VC 4 flits
WI 收发缓冲区深度	16 flits
Flit 大小	128 bits
系统 Warm-up 时间	1000 clocks
运行时间	10000 clocks
流量模型	Random, Hotspot

5.2.1 WR 通信对无故障时的网络性能

WR 通信对无故障时,图 5(a)(b)分别显示了在随机和热点流量模式下,随着注入率的增加,4 种方案平均延迟的比较.从图 5 可以看出,无线方案的平均延迟更低.在注入率较低时,不会出现拥塞状况,此时四种方案的平均延迟比较接近.随着注入率的增加,WR 处发生拥塞的概率变大,平均延迟增大.但方案 3,方案 4 的平均延迟增长趋势更为缓慢.因为方案 3 动态调节数据包使用无线传输的概率,缓解了 WR 的热点问题;方案 4 在方案 3 的基础上,当数据包不使用无线传输时采用拥塞避免机制,使数据包传输尽量避免经过 WR 周围,

进一步降低了 WR 周围的拥塞程度.在随机模式下当注入率为 0.035 packet/node/cycle 时,方案 4 的平均延迟较方案 1,方案 2,方案 3 分别降低了 65.6%、59.5%、27.6%;在热点模式下随着注入率的增加,方案 4 较方案 1,方案 2,方案 3 也有着明显的平均延迟降低.

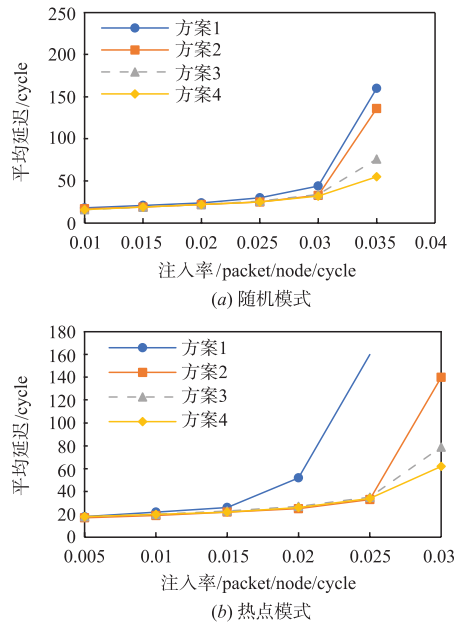


图 5 平均延迟

图 6(a)(b)分别显示了在随机和热点模式下,随着注入率的增加,4 种方案在网络吞吐量方面的比较.同样无线方案具有更高的网络吞吐量,其中方案 4 的网络吞吐量最高.因为方案 4 动态调节数据包使用无线传输的概率并有效地避免了在 WR 周围形成热点.在随机模式

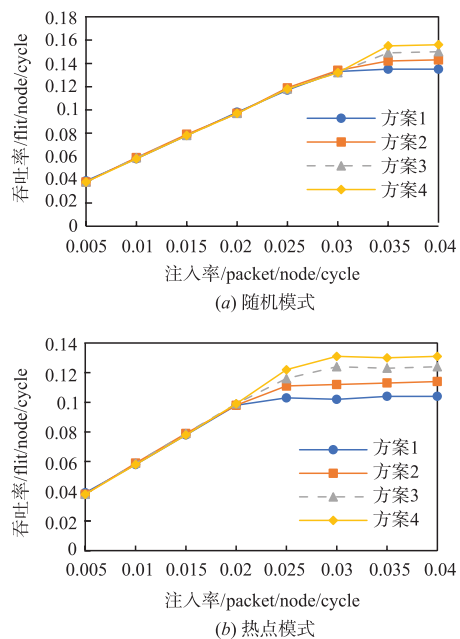


图 6 网络吞吐量

下,方案 4 的饱和吞吐率为 0.156 packet/node/cycle 较方案 1,方案 2,方案 3 分别增大了 15.6%、9.1%、4%;在热点模式下,方案 4 的饱和吞吐率为 0.131 flit/node/cycle 较方案 1,2,3 也分别有 26%、14.9%、5.6% 的提升.

5.2.2 WR 通信对存在永久性故障时的网络性能

在本文方案中,当 WR 通信对存在永久性故障时,子网中的路由器可以及时感知并在路由决策时避免使用故障的 WR 通信对. 图 7 和图 8 分别显示了 WR 通信对发生故障时对网络平均延迟和吞吐率的影响,其中方案 1 为传统有线 NoC,方案 2 为无故障时本文方案,方案 3 为 2 个 WR 通信对出现故障时的本文方案,方案 4 为 4 个 WR 通信对出现故障时的本文方案.

如图 7 所示,本文方案的平均延迟随着注入率的增加而有了更显著的优势,在随机模式下当注入率为 0.035 packet/node/cycle 时,方案 3,方案 4 的平均延迟较方案 2 增大了 29.2%、63.4%;在热点模式下当注入率为 0.025 packet/node/cycle 时,方案 3,方案 4 的平均延迟较方案 2 增大了 67.8%、134%. 但对比于方案 1 传统有线 NoC,方案 3、方案 4 的平均延迟均有大幅下降.

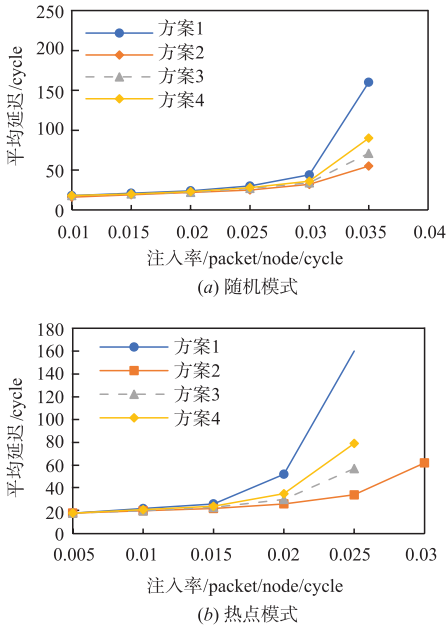


图7 WR通信对故障时的平均延迟

网络吞吐率如图 8 所示,在随机模式下方案 3、方案 4 的饱和吞吐率较方案 1 分别增大了 11.7%、8.3%;在热点模式下方案 3、方案 4 的饱和吞吐率较方案 1 分别增大了 21.2%、17.5%.

当部分 WR 通信对发生永久性故障时,本文方案具有较好的容错能力,其网络性能优于传统有线 NoC.

5.3 数据包平均能耗分析

数据包的平均能耗 E_{per} 如式(1)所示:

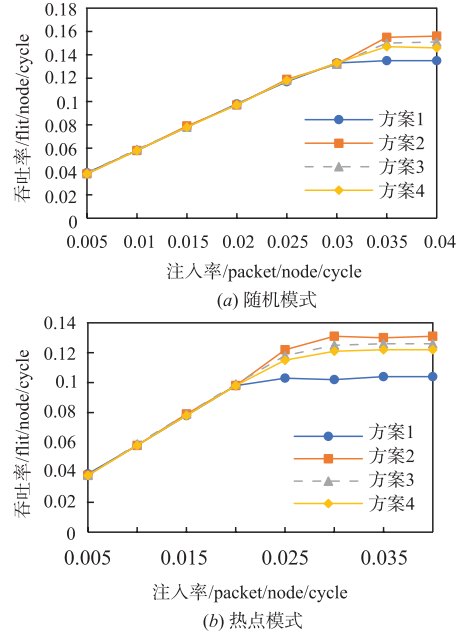


图8 WR通信对故障时的吞吐率

$$E_{per} = \frac{E_s + E_d}{P_{num}} \quad (1)$$

其中 E_s 为片上网络的总静态功耗, E_d 为数据包在路由过程中执行不同步骤所消耗的能量总和, P_{num} 为在运行时间内成功接收到的数据包数目. 将路由器的各部分的静态、动态功率数据写入 noxim^[21], 当达到饱和注入率时,得到数据包平均能耗的标准化结果,如图 9 所示.

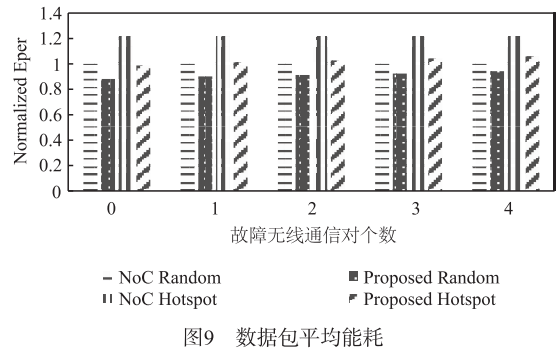


图9 数据包平均能耗

无故障时,本文方案在随机和热点流量模式下相较于传统有线 NOC 数据包平均能耗分别降低了 11.7% 和 19.1%;相对于分层 WiNoC^[9] 分别降低了 5.6% 和 14.6%. 因为本文方案在降低网络平均跳数的同时,能够有效避免数据包在无线节点处发生拥塞. 由于分层 WiNoC^[9] 不考虑无线通信对故障问题,故未在图 9 中给出具体数据. 当故障无线通信对的数量不断增加时,由于数据包平均跳数的增大,本文方案的 E_{per} 有少量的增加. 但即使在 4 个 WR 通信对故障的情况下,本文方案相较于传统有线 NoC,在随机和热点流量模式下,数据包平均能耗仍有 5.7% 和 13.1% 的下降.

5.4 面积、功耗开销

本文采用 Synopsys 公司的 Design Compiler 实验工具,用 Verilog 语言描述路由器硬件架构,结合使用 Model Sim 和 Xilinx ISE 进行功能和结构仿真,在 45nm 工艺下得出如表 4 所示的面积和功耗开销. 其中 Zig-Zag 天线面积大约为 0.19mm^2 ,毫米波无线收发器(mm wave transceiver)面积大约 0.16mm^2 [7,8].

表 4 硬件开销

Schemes	BR / μm^2	NWI WR / μm^2	Additional WI/ μm^2	WR Static Power/mw	WR Dynamic Power/mw
方案 1	50441	×	×	×	×
方案 2	50441	62638	×	31.7	78.74
方案 3	50648	62845	11260	37.2	74.13

如表 4 所示,其中方案 1 为传统有线 NoC,方案 2 为文献[9]中的分层 WiNoC,方案 3 为本文方案. 在方案 3 中 BR 的面积开销增大了约 0.4%,因为在路由表中需要一个 6bit 寄存器,用于存储 WR 通信对状态信息. 除 WI 以外的 WR(NWI WR)增加了连接 WI 的输入输出端口,面积开销较 BR 有所增大.

由于在 WI 添加了故障、拥塞感知模块和数据编解码模块,本文方案带来了 $11260\mu\text{m}^2$ 的额外面积开销和 17.4% 的额外静态功耗. 但通过对 WR 通信对的拥塞和故障感知,本文方案控制了数据包使用无线传输的概率,并在有线传输时采用拥塞避免的路由算法,避免在 WR 周围形成拥塞,将 WR 的动态功耗降低了 5.4%. 此外本文方案中路由器需要 6 位控制线传输 WR 通信对状态信息,相较于双向 128 位的数据线,布线开销增大了 2.3%. 考虑到 WiNoC 整体性能优势,WR 中 WI 的额外面积、功耗开销和路由器间布线开销所带来的影响是可以接受的.

6 总结

无线信道作为数据包长距离单跳传输的快速通道,在无线片上网络中起重要作用. 过量的数据包请求无线传输或 WR 通信对发生永久性故障,将会严重影响片上网络性能. 针对上述问题,本文首先设计了无线通信拥塞和故障感知机制,感知 WR 通信对接收、发送缓冲区利用率和 WR 通信对是否发生永久性故障;然后将 WR 通信对的故障和拥塞信息编码,发送给子网中的路由器;子网中的路由器根据接收到的 WR 通信对状态信息,判断数据包是否使用无线传输,在不使用无线传输时采取拥塞避免机制,避免在无线节点附近形成热点. 实验表明,本文方案在可接受的硬件面积、功耗开销下,大幅提高了网络性能,并具有良好的容错效果.

参考文献

- [1] Borkar S. Thousand core chips: a technology perspective [A]. Proceedings of the 44th Annual Design Automation Conference[C]. San Diego:ACM,2007. 746 – 749.
- [2] Pavlidis V F, Friedman E G. 3-D topologies for network-on-chip[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems,2007,15(10):1081 – 1090.
- [3] Shacham A, Bergman K, Carloni L P. Photonic network-on-chip for future generations of chip multiprocessors[J]. IEEE Transactions on Computers, 2008, 57(9): 1246 – 1260.
- [4] Chang M F, Cong J, Kaplan A, et al. CMP network-on-chip overlaid with multi-band RF-interconnect [A]. IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture[C]. Salt Lake City:IEEE,2008. 191 – 202.
- [5] Deb S, Ganguly A, Chang K, et al. Enhancing performance of network-on-chip architectures with millimeter-wave wireless interconnects [A]. IEEE International Conference on Application-specific Systems Architectures & Processors [C]. Rennes:IEEE,2010. 73 – 80.
- [6] Abadal S, Mestres A, Torrellas J, et al. Medium access control in wireless network-on-chip: a context analysis [J]. IEEE Communications Magazine,2018,56(6):172 – 178.
- [7] Deb S, Chang K, Ganguly A, et al. Design of an efficient NoC architecture using millimeter-wave wireless links[A]. International Symposium on Quality Electronic Design [C]. Santa Clara:IEEE,2012. 165 – 172.
- [8] Yu X, Baylon J, Wetlin P, et al. Architecture and design of multichannel millimeter-wave wireless NoC[J]. IEEE Design & Test,2014,31(6):19 – 28.
- [9] Hu W H, Wang C, Bagherzadeh N. Design and analysis of a mesh-based wireless network-on-chip [J]. The Journal of Supercomputing,2015,71(8):2830 – 2846.
- [10] 黎建华, 吴宁, 胡永良, 等. 一种自适应的混合型无线 NoC 拓扑结构 [J]. 电子学报, 2016, 44(6): 1420 – 1428.
LI Jian-hua, WU Ning, HU Yong-liang, et al. An adaptive hybrid wireless NoC topology structure[J]. Acta Electronica Sinica,2016,44(6):1420 – 1428. (in Chinese)
- [11] Zhao D, Wu R. Overlaid mesh topology design and deadlock free routing in wireless network-on-chip [A]. IEEE/ACM Sixth International Symposium on networks-on-chip [C]. Copenhagen: IEEE Computer Society, 2012. 27 – 34.
- [12] Wang L, Wang Z, Jiang Y. Flowcontrol mechanism for wireless network-on-chip [A]. International Conference on Information Technology [C]. New Generations:IEEE, 2013. 483 – 488.

- [13] 欧阳一鸣,李胜,黄正峰,等. WiNoC 中无线节点和无线链路级拥塞避免的高效路由器设计[J]. 电子学报, 2018,46(4):775-782.
OUYANG Yi-ming, LI Sheng, HUANG Zheng-feng, et al. Design of an efficient wireless router with congestion avoid capacity in node level and link level[J]. Acta Electronica Sinica, 2018,46(4):775-782. (in Chinese)
- [14] Agyeman M O, Vien Q T, Ahmadinia A, et al. A resilient 2-D waveguide communication fabric for hybrid wired-wireless NoC design[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2017,28(2):359-373.
- [15] Boraten T, Kodi A. Runtime techniques to mitigate soft errors in Network-on-Chip (NoC) architectures[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2017,37(3):682-695.
- [16] 欧阳一鸣,何鑫城,梁华国,等. 针对路径故障与局部拥塞的 NoC 容错路由算法[J]. 电子学报, 2016,44(4):920-925.
OUYANG Yi-ming, HE Xin-cheng, LIANG Hua-guo, et al. A fault tolerant routing algorithm aiming at a path fault and local congestion in NoC[J]. Acta Electronica Sinica, 2016,44(4):920-925. (in Chinese)
- [17] 欧阳一鸣,孙成龙,李建华,等. 针对瞬时故障和间歇性故障的 NoC 链路容错方法[J]. 计算机研究与发展, 2017,54(5):1109-1120.
OUYANG Yi-ming, SUN Cheng-long, LI Jian-hua, et al. Addressing transient and intermittent link faults in NoC with fault-tolerant method[J]. Journal of Computer Research and Development, 2017,54(5):1109-1120. (in Chinese)
- [18] Soteriou V, Wang H, Peh L S. A statistical traffic model for on-chip interconnection networks[A]. IEEE International Symposium on Modeling [C]. Monterey: IEEE Computer Society, 2006. 104-116.
- [19] Abadal S Martínez, Raúl Solé-Pareta Josep, et al. Characterization and modeling of multicast communication in cache-coherent manycore processors[J]. Computers & Electrical Engineering, 2016,51:68-83.
- [20] 欧阳一鸣,陈静雯,梁华国,等. NoC 中负载均衡的 AVOQ 路由器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2017,31(1):92-98.
OUYANG Yi-ming, CHEN Jing-wen, LIANG Hua-guo, et al. Design of load-balancing AVOQ router in network-on-chip[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017,31(1):92-98. (in Chinese)
- [21] Catania V, Mineo A, Monteleone S, et al. Cycle-accurate network on chip simulation with noxim[J]. Acm Transactions on Modeling & Computer Simulation, 2016,27(1):1-25.
- [22] 李璐璐,裘雪红,周端,等. 片上网络容错技术研究[J]. 计算机科学, 2018,45(3):305-310.
LI Lu-lu, QIU Xue-hong, ZHOU Duan, et al. Research on fault tolerant technology for networks-on-chip[J]. Computer Science, 2018,45(3):305-310. (in Chinese)

作者简介



欧阳一鸣 男,1963 年生. 博士,教授,中国计算机学会高级会员,研究方向:片上网络(NoC)与片上系统(SoC),嵌入式系统的综合与测试,数字系统设计自动化.
E-mail:oyymbox@163.com



贾博远 男,1995 年生. 硕士研究生,研究方向:片上系统以及片上网络容错方法,无线片上网络.
E-mail:1350194816@qq.com