

WiNoC 中 EF-ACK 容错无线接口设计

欧阳一鸣¹, 钱 昌¹, 杜高明², 黄正峰², 李建华¹, 梁华国²

(1. 合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽合肥 230601; 2. 合肥工业大学电子科学与应用物理学院, 安徽合肥 230601)

摘 要: 无线片上网络中的无线信道面临着严重的可靠性挑战, 无线路由器的容错设计对整个片上网络的传输效率有着较大的影响. 本文提出一种 EF-ACK 容错无线接口设计, 将多条确认信息配置在一个数据包内, 通过无线信道传递确认信息数据包; 在无线接口处设立重传数据缓冲区, 以更高效的方式确认数据以及控制错误数据包的重传; 另外, 提出了基于网络状态的编解码控制, 在网络情况较差时用 BCH 编码的方式提高数据的鲁棒性. 实验表明, 本文方案使用了较小的额外面积和功耗开销, 高效地完成了对于数据的无线确认反馈, 且在错误率较高时, 可以保证网络中较低的网络延迟和较高的饱和吞吐量, 大大提高了网络的性能.

关键词: 无线片上网络; 容错; ACK 确认; 无线信道; 无线接口

中图分类号: TP302 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)11-2561-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.11.001

Design of an EF-ACK Fault-Tolerate Wireless Interface in WiNoC

OUYANG Yi-ming¹, QIAN Chang¹, DU Gao-ming², HUANG Zheng-feng², LI Jian-hua¹, LIANG Hua-guo²

(1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230601, China;

2. School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract: The wireless channel in wireless network-on-chip faces serious reliability challenges. The fault-tolerant design of wireless routers has a great impact on the transmission efficiency of the entire network onchip. This paper presents a highly efficient acknowledgement feedback (EF-ACK) fault-tolerant wireless interface design. Several confirmation information is configured in a data packet, which can be transmitted over the wireless channel. Establish a retransmission data buffer at the wireless interface to validate the data in the most efficient manner and to control the retransmission of erroneous data packets. In addition, a network-state-based codec control is proposed, which improves the robustness of the data by means of BCH coding when the network conditions are poor. It can be concluded that the proposed scheme efficiently performs wireless acknowledgment feedback on data with only a small additional area and power consumption overhead and ensures a lower network latency and higher Saturated throughput in the network when the error rate is serious, greatly improving the performance of the network.

Key words: wireless network onchip; fault tolerant; ACK; wireless channel; wireless interface

1 引言

如今,集成电路的制造工艺不断进步,预计到2028年,MOS晶体管的栅极长度将降低至 1nm ^[1].同时,芯片上集成的核的数量呈迅速上升趋势,例如Intel的至强融核处理器^[2].片上集成核数目的增加对片上网络(Network on Chip, NoC)的通信提出更高的要求.传统平面金属互连的NoC由于跳数多等问题所引发的高功耗,高延迟等问题,无法再满足片上通信的需求.三维集

成电路(3D IC),光(Optical)互连,射频(Radio Frequency, RF)互连等技术受制造条件约束,现阶段难以实际应用^[3-5].无线片上网络(Wireless Network-on-Chip, WiNoC)^[6,7]采用无线天线以及无线数据收发器,构成一种有线和无线混合的片上网络,文献[8]证明该技术在功耗和延迟等方面具有较好的表现.

WiNoC通信架构存在着高错误率等缺陷,使得WiNoC的整体可靠性有所下降^[9].传统的金属互连导线的比特错误率(Bit Error Rate, BER)大约为 10^{-14} ,远

低于通过毫米波传输的比特错误率(大约为 10^{-7}),容易形成故障热点从而影响网络的整体性能^[9].同时随着传输距离的增加,毫米波在传输过程中会出现较快的能量衰减,无线信号损耗严重.另外,无线信道极易受到外界环境的影响和破坏,随着芯片的老化,比特错误率也会有显著的增加.

一般采用冗余来保证数据在 WiNoC 中可靠传输^[10].文献[11]提出了一种传统 NoC 结构的节点间检错策略,在每一对节点之间加入了额外的检测模块,在发现故障时可以通知源节点进行数据重传,但是这种策略具有较高的面积开销,而且在多故障的情况下会产生大量的重传数据包,从而影响了网络吞吐率.文献[12]采用基于节点间检测重传的策略,这种策略减少了重传的数据包数量,跳到跳的检测重传保证了数据传输的可靠性,但是每个端口的检测重传模块也会带来大量的面积开销.文献[13]设计了一种基于传统 mesh 结构 NoC 自适应擦除(RAS)的容错策略,采用多层错误校正和检测方案,提出了一种故障定位的动态方法,并根据需求自适应故障覆盖范围,但是这种策略只适用于小规模的传统 NoC,在较大规模的 NoC 中具有较高的延迟.文献[6]提出了 WiNoC 的错误控制编码(Error control code, ECC),通过在无线链路中采用交叉的汉明码,在有线链路中采用联合串扰避免三重纠错和四路并行错误检测码(JTEC-SQED),但是这种无线检测纠错方法需要等待整个数据包的传输完成才能进行,具有较高的延迟和缓存面积开销.文献[9]对 ECC 方案进行了改进,利用多个无线节点可以同时接收数据的特性,源无线节点接收中间无线节点转发给目的无线节点的数据,与自身重传缓冲区内的数据比对来判断数据传输是否发生了错误,但是该方法仅适用于需要无线多跳存储转发的无线网络,对于一跳可达的毫米波无线网络来说占用了大量的天线和无线接口的面积开销,同时也增加了传输的延迟.以上文章均采用数据冗余和路径冗余等方式进行数据容错,但是还存在以下问题:(1)其对于无线信道中数据包的确认信息反馈,未利用无线信道广播的特点,采取任何优化设计.(2)随着网络规模的扩大,如果通过无线信道进行传输的数据在目的节点附近发生了错误,那么请求从源节点重新发送数据需要传回故障信息给源节点,然后再进行数据重新传输,所需要的时间周期较长,占用大量的网络资源.(3)无线节点作为 WiNoC 的重要节点,承载着大量的数据传输任务,数据错误所导致的大量数据重传会严重影响无线节点的传输效率,甚至会导致拥塞等问题,大大降低网络性能.

本文针对 WiNoC 中无线信道的可靠性问题,设计了适用于规则、不规则 WiNoC 的高效确认信息反馈

(Efficient Acknowledge Feedback, EF-ACK)容错无线接口.本文对应上文提出的以上问题,分别有以下几点创新之处:(1)将多个数据包的确认信息合成为一个数据包,通过无线广播的形式返回确认信号.(2)在无线节点发送端添加重传数据缓冲区,避免确认信号以及重传数据的长距离传输.(3)添加了根据网络状态配置的编解码模块,提高无线信道中数据传输的鲁棒性.

2 WiNoC 无线信道的可靠性和容错局限性分析

2.1 WiNoC 基础结构及其无线接口

图1是WiNoC的基础结构示意图,整个网络由资源节点(Resource Node, RN)、通讯节点(Communication Node, CN)、信道(Channel)和资源网络接口(Resource Network Interface, RNI)组成.通讯节点又称为路由节点(Router),负责计算节点之间的通讯,在WiNoC中可分为有线路由节点(Baseline Router, BR)和无线路由节点(Wireless Router, WR).有线路由节点包括路由计算单元(Routing Calculation, RC)、输入缓冲区(Buffer)、虚通道分配器(Virtual Channel Allocator, VA)、交叉开关仲裁器(Switch Arbitration, SA)和交叉开关(Crossbar);如图2所示,无线路由节点比有线路由节点增加了一个无线接口(Wireless Interface, WI).

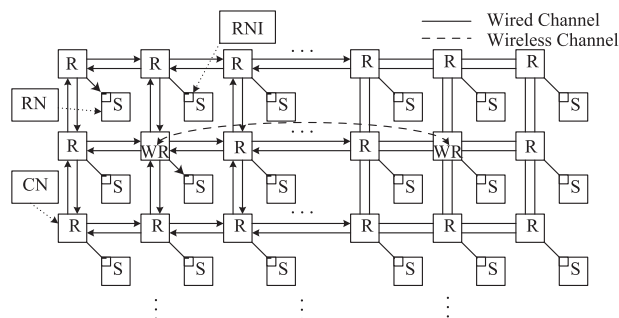


图1 WiNoC基础结构示意图

WI是WiNoC区别于传统金属互连NoC的关键,多个WI可以在WR之间建立多条远距离通信的无线信道,大大减小了长距离数据包的传输跳数,降低了传输延时.如图2所示是由目前片上无线网络应用最为广泛的Zig-Zag天线和毫米波收发器所构成的WI架构示意图.WI分为发送端(Transmitter, TX)和接收端(Receiver, RX).TX由发送数据缓冲区(Transmit Data Buffer, TDB)、串行化器(Serializer)、调制器(Modulator)、功率放大器(Power Amplifier, PA)和片上天线组成;RX由片上天线、低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)、解调器(Demodulator)、解串行化器(Deserializer)和接收数据缓冲区(Receive Data Buffer, RDB)组成.在发送的过程中,数据首先存放在TDB中,Serializer将TDB中的数据

串行化, Modulator 将低频信号调制为易于载波传输的高频信号, PA 将信号功率放大以使其可以通过天线进行传输. 而接收的过程则是上述发送过程的逆过程.

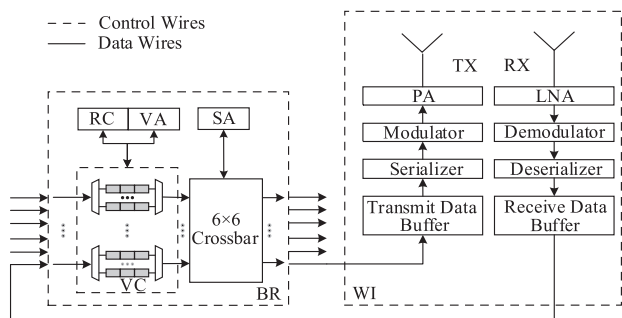


图2 基础WR架构示意图

2.2 无线信道数据传输可靠性分析

无线信号的传输媒介是通过衬高芯片封装, 从而得到的一个允许传递高频电磁波信号的真空空间. 通过对文献[6]中的公式进行分析可以得到片上天线的接收功率 P_r . 此外, 文献[14]指出, GHz 级高频的片上无线信道会受到严重的热噪声的影响, 片上天线热噪声功率公式如下:

$$N_0 = K_b (T_i + T_r) = K_b (T_i + (F - 1) T_0) \quad (1)$$

其中, K_b 是波尔兹曼常数, T_i 是 TX 天线的绝对温度 (约 330k), T_r 是 RX 天线的绝对温度, T_0 是室内常温 (约 290k), F 是接收端的噪声系数 (约 4dB).

信噪比 SNR 公式:

$$\text{SNR} = \frac{P_r}{N_0} \quad (2)$$

如图 3 是由 SNR 公式计算得出的 SNR 与天线之间距离 d 的关系图, 可以发现随着天线之间距离的增加, 信噪比较快的速度下降. 当天线之间距离约为 20mm 时, 信噪比接近于 10, 当距离继续增加时, 信噪比将减小到无法接受的水平. 在无其他外界条件干扰的情况下, 比特误码率 (Bit Error Rate, BER) 与 SNR 存在正相关的关系^[6]. 随着无线传输距离的增加, 数据传输误码率也迅速增加.

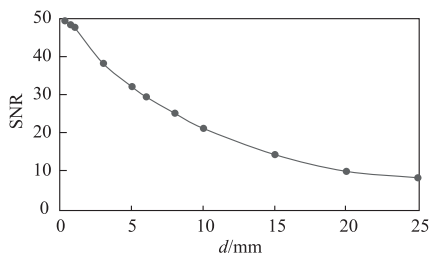


图3 SNR与天线距离d的关系图

WiNoC 中的无线链路的性能同时也取决于无线天线, 而 Zig-Zag 天线和其他纳米级器件一样, 具有较高的

制造缺陷率、操作不确定性和工艺变异性. 易损坏的无线天线也会导致较高的随机错误率, 引起持续的多位错误或瞬时错误. WiNoC 中的无线传输可靠性面临着巨大的挑战.

2.3 WiNoC 容错局限性分析

无线信道是 WiNoC 的重要组成部分, 对于无线信道的可靠性问题, 研究学者们提出了许多容错策略^[7], 常见的容错方案有数据冗余和路径冗余. 路径冗余可以通过冗余无线节点等方式来完成 WiNoC 中无线故障的容错, 但是这样会带来额外的面积开销, 而且路由算法也更加复杂, 不利于 WiNoC 的高效传输. 而数据冗余是指沿同一路径发送多份数据拷贝, 或者采用增加校验位及不同编码的方案, 上述方案不需要额外的硬件开销, 在传统 NoC 中具有较好的容错效果. 但是在 WiNoC 中, 由于无线接口的存在, 使得 ACK/NACK 信号无法像传统 NoC 中通过相邻节点间之间的额外控制信号线进行直接传输, 如果依旧采用传统 NoC 中的 ACK/NACK 信号线进行数据确认, 会造成长时间的通信延迟^[15]. 因此本文提出了通过将确认信号放入数据包, 将数据包通过无线传输到原无线发送端的方法, 来减少数据确认的延迟, 提高数据的吞吐量.

如图 4 是 RNI 逻辑结构的示意图, 主要由发送/接收控制单元、编/解码电路以及寄存器模块组成. 在传统的容错方法中^[16], 在数据由 RN 通过 RNI 进入片上网络的过程中, 首先 RNI 会对数据进行编码, 然后将编码后的数据存入寄存器模块. 当连接在该 RNI 的 CN 允许数据进入的时候, 将寄存器模块中存储的数据传输到网络中. 当数据在片上网络的传递时, 不对数据的正确性进行检测. 当数据到达目的 CN 后, 由 CN 将数据通过 RNI 传输到 RN 中. 在数据进入 RNI 时, 首先对数据进行解码, 检测数据在传输的过程中是否发生了错误. 如果发现了错误, 则向数据包源节点发送重传请求; 如果正确, 则存储至寄存器模块, 在 RN 允许的时候传输到 RN.

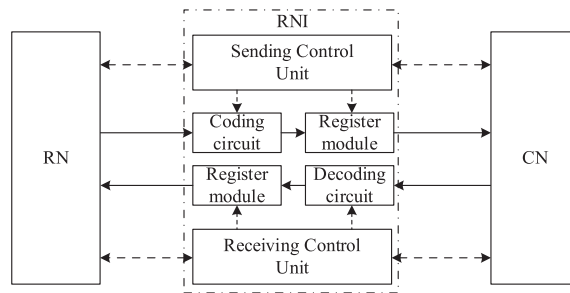


图4 RNI逻辑结构示意图

随着网络规模的逐渐增加, 传统的错误检测和重传方案由于高延迟和高带宽占用而无法适用^[17]. 本文

的 EF-ACK 方案在无线接口处检测数据的正确性,如果发现错误则直接通知源节点重传数据包,如果正确,则写入重传 buffer 并通过无线网络继续传递数据包.另外,为了提高数据在无线传输中的鲁棒性,在发送端和接收端采用了专用的编/解码器.当无线接收端接收到传过来的数据包时,如果数据错误,则丢弃;如果接收到的数据包是 ACK 信息数据包,则对应重传 buffer 中的数据运输成功,如果接收的数据包是普通数据包,则将其存入接收缓冲区.

3 高效容错的无线接口设计

3.1 高效容错的无线接口整体设计

本文所介绍的无线接口设计适用于分层网络、小世界 (Small-World) 网络等其他规则和不规则片上无线网络拓扑结构,具有较好的适应性和扩展性.为了更加清晰地阐述设计方案,本文以网络中配置 8 个 WR 为例进行说明.

图 5 为本文设计的 WI 架构图,本文在 WI 中添加了确认数据包生成模块 (Acknowledge Package Generation Module, APG)、优先发送仲裁模块 (Priority Transmission Arbitration Module, PTA)、编码控制模块 (Coding Control Module, CC), TX 端添加了编码器 (Encoder)、重传缓冲区 (Retransmission Buffer, RB) 和确认信息数据包缓冲区 (Acknowledge Package Buffer, AB), RX 端添加了解码器 (Decoder).

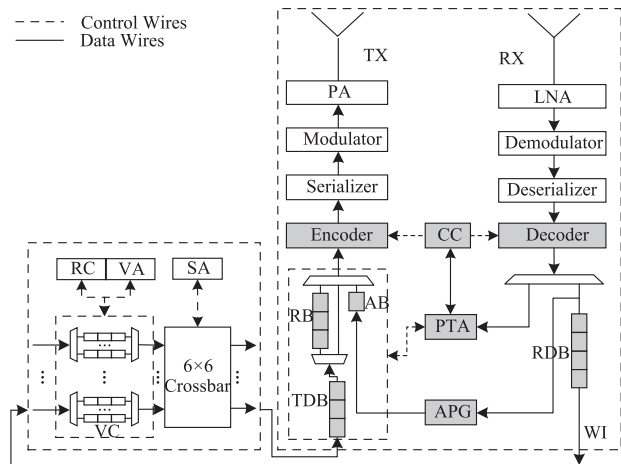


图5 WI架构图

APG 根据 RX 接收到的正确数据包来产生对应的确认 ACK 数据包,并将其存储到 AB 中. PTA 根据其接收到的 ACK 信息对 TX 端的数据发送进行仲裁,如果上一个发送时间片发送的数据没有返回的 ACK 信息,则将 RB 中存储的对应的数据进行重传,并发送 AB 中存储的 ACK 数据包;若有返回的 ACK 信息,则将对应 RB 中存储的数据丢弃,发送 TDB 中存储的数据,同时将数据

备份至 RB 中,再发送 AB 中存储的 ACK 数据包.另外,PTA 还根据接收到的 ACK 信息判断当前的无线网络状态,给 CC 发送控制信号,使 CC 在无线信道可靠性较差的时候对发送和接收的数据进行编解码来增强无线信道的鲁棒性.对于接收到的正确数据,则将其通过 WR 存入与该 WR 相连的 RN,使得数据在离开 WR 后发生错误时直接由该 RN 重传数据.在文章 3.3 节,我们将对 WI 的架构设计进行详细阐述.

另外,数据在 TDB 中存储时对每个 Flit 进行位扩展,增加 4bit 的无线节点 ID 号 (WR_id),在 RDB 存储时去除 WR_id.

3.2 无线信道的媒体访问协议

由于无线信道的独占性,通过媒体访问协议 (MAC) 对无线信道资源进行分配十分必要.对于本文所采用的 WI 容错设计,采用改进的令牌传递 (Token Passing) 机制可以更加高效地进行数据通信.

对于 WiNoC 的无线信道,单个时钟周期之内只能由一个 WR 发送无线数据,可以有多个无线节点同时进行接收.令牌传递机制是一种利用令牌信号的传递来进行无线信道资源分配的 MAC,拥有令牌的 WR 可以获得时间片用来发送无线数据.

本文对所有无线节点进行编号,依次传递令牌.在本文的设计中,由于每个 WR 都有一个 ACK 数据包需要传递,因此本文方案将 ACK 数据包同时作为令牌传递的信号.当其它 WR 接收到通过无线传输的 ACK 数据包时,根据 ACK 数据包的 WR_id 判断其是否为令牌的接收者,如果是则获得令牌.

为了避免饥饿现象,本文采用的每个时间片最多拥有 4 个无线传输周期,即每个获得令牌的 WR 最多可以在一个时间片内传输 4 个 Flit 大小的数据.因此为了保证 RB 的有效利用,本文将 RB 设计为 3 个深度为 1 个 Flit 的并行 buffer, AB 深度为 1 个 Flit.

为了充分利用无线信道资源,当本 WR 中需要传输的数据小于 3 个 Flit 时,可以由 PTA 控制直接传输 AB 中的 ACK 数据包,将令牌传递给下个编号的 WR 使用.当令牌发生错误或丢失,在 4 个无线传输周期结束后,下一编号的 WR 自动生成令牌,并开始发送数据.

3.3 WI 控制模块详细设计

以原始 Flit 大小为 32bit 为例,本节详细介绍 WI 控制模块的内部逻辑结构.

3.3.1 APG 设计

如图 6 所示是 APG 内部逻辑结构示意图, RX 接收的每条 Data 数据为基础 32bit 的 Flit 加上 4bit 源 WR 的 ID 号 WR_id, APG 从接收到的正确数据中提取 WR_id.同时根据令牌的传递以及无线传输的时间周期生成 ACK 数据包. ACK 数据包有 36 位,其中 4 位为 ACK 消

息标志位 Ack_F,后面 32 位分 8 组各 4 位分别对应不同的源 WR,组中的每一位依次对应每个传输周期.例如,若接收到的正确数据是 0 号 WR 在第三个传输周期所发送的数据,则将 F_02 置为 1,如果又接收到正确数据是在 6 号 WR 在第一个传输周期所发送的数据,那么将 F_60 置为 1.当该 APG 所在 WR 获得令牌,即可由该 WR 发送数据时,将所生成的 ACK 数据包存储至 AB.

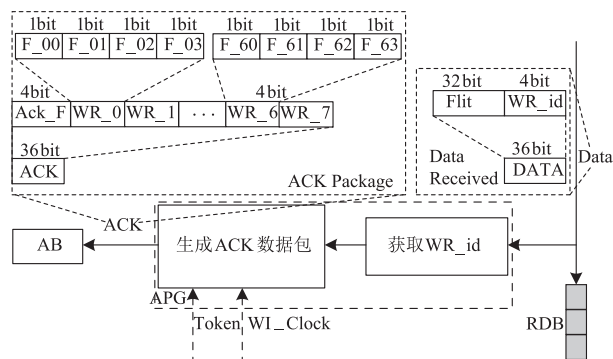


图6 APG内部逻辑结构示意图

3.3.2 PTA 设计

如图 7 是 PTA 内部逻辑结构示意图,以从 TX 接收的 ACK 数据包中除 Ack_F 的其他 32 位信息为 32 位 D 触发器组的触发信号,对应位线为上升沿时(该位为 ACK)将高电平(VCC)锁存于触发器中,当该 PTA 所在 WR 获得令牌时,将该触发器组锁存的 ACK 信息发送到 ACK 信号控制单元(Acknowledge Control unit, ACU),ACU 根据所在 WR 提取相应的 ACK 信号,控制 RB、AB、TDB 的输出.若 RB 中所有对应位均获得 ACK,则抛弃 RB 中对应 buffer 所存储的数据,将 TDB 的数据进行传输,同时存储到 RB 相应的 buffer 中;若 RB 对应的各位均没有获得 ACK 信号,则控制 RB 重传;若 RB 对应部分位获得 ACK,则将没有获得 ACK 的数据重传,然后发送 TDB 中存储的数据,并将其备份至 RB.若 TDB 中为空,则直接发送 AB 中的本地 ACK 数据包.另外,如果对应的 WR 的各位均没有收到 ACK 信息,证明此时无线网络状态较差,由 ACU 控制 CC 进行编解码,提高数据的容错能力.

例如该节点为 3 号 WR,在该节点的数据传输完毕且发送了 AB 中缓存的 ACK 数据包之后,4 号 WR 获得 Token,拥有了无线信道的发送权.4 号 WR 在传输完数据后发送 4 号节点的 ACK 数据包,此时 3 号 WR 的 32 位 D 触发器组就会获得 4 号 WR 发出的 ACK 数据包中的 ACK 情况.然后随着其他 WR 依次获得 Token 并发送各自的 ACK 数据包,3 号 WR 中 PTA 模块中的 D 触发器组即可获得网络中所有 WR 的数据包 ACK 信息.当 3 号 WR 再次获得 Token 时,其 ACU 即可根据 D 触发器组中锁存的信息进行控制,比如根据有关本节点

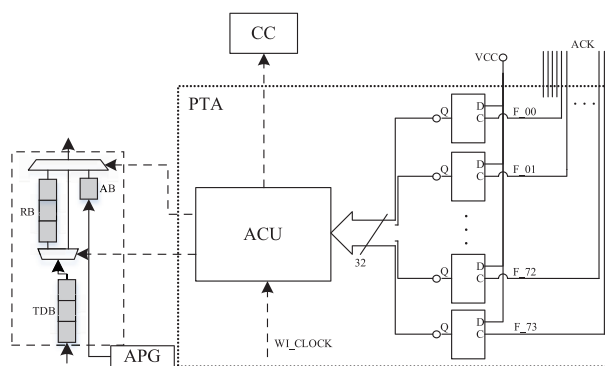


图7 PTA内部逻辑设计示意图

上一轮所传数据的 ACK 情况的对应位来控制选择 RB、TDB 或者 AB 中的数据进行传输;或者根据其他节点上一轮所传数据的 ACK 情况,控制 CC 模块.

3.3.3 CC 以及编解码模块设计

图 8 为 CC 及编解码模块的内部逻辑结构示意图. CC 是编解码控制模块,主要负责对于编解码模块的控制.当 PTA 要求 CC 进行编解码的时候,CC 控制(72, 36) BCH 编解码模块^[18]对数据进行编解码(可纠正 6 个独立的差错).本文在 TX 端采用 BCH 编码模块.在 PTA 要求 CC 进行编解码时,将 36bit 的数据扩展为 72bit,并存入两个 36bit 的缓冲区,将两个缓冲区里的数据分别在两个传输周期内进行发送,此时每个令牌时间内只能传递两个数据(分别为一个数据 36bit 以及一条 ACK 信息).在 RX 端设置 BCH 解码模块,将两个传输周期内接收的数据同时传入解码器,对其解码并还原为原始数据输出.当 PTA 没有接收到 CC 进行编解码的请求指令,数据通过 CC 控制的多路选择器直接输出.

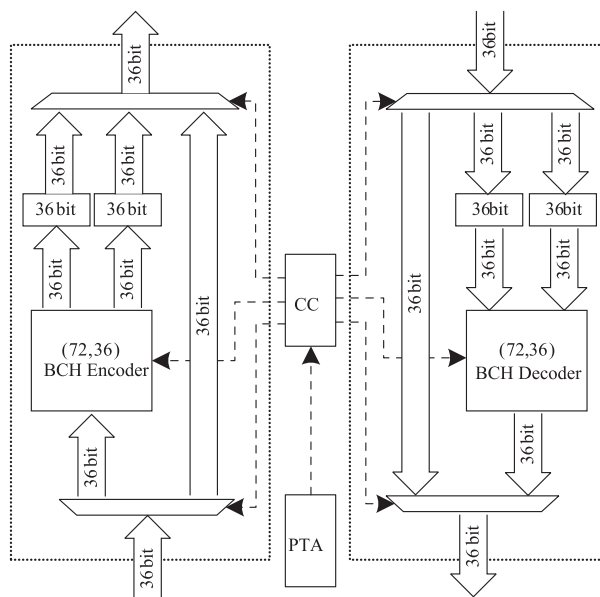


图8 CC及编解码模块内部逻辑结构设计

4 实验

4.1 实验相关设置

本文通过实验,对多种容错方案在不同故障率下的性能表现,面积与功耗开销进行比较分析.方案一是文献[16]中提到的传统端到端(end-to-end)容错 NoC (NoC_e2e);方案二采用文献[15]提出的无线 end-to-end NoC 容错方案(WiNoC_e2e);方案三采用在 WiNoC_e2e 基础上添加无线路由器间跳到跳无线 ACK 确认的容错方案(Single_ACK);方案四是文献[6]设计的在无线链路中采用交叉的汉明码对无线数据容错的方法(Wi_CHam);方案五是用本文设计的 ACK 容错无线接口(EF-ACK);方案六采用本文方案取消 CC 和编解码模块的精简方案(Without_CC).实验的基本参数设计如表 1 所示.

表 1 实验基本参数设定表

设置	参数
拓扑结构	16 × 16 mesh
WR 数量	8
WR 放置策略	Simulated annealing algorithm
有线路由算法	XY
无线路由策略	Token-pass
Packet 大小	3 - 8 flits
Buffer 深度	4 flits
Flit 大小	32 bits
系统 Warm-up 时间	1000 clocks
运行时间	10000 clocks
流量模型	Random、Bit_Reversal

4.2 网络性能

本文基于 Noxim^[19] 扩展的实验仿真平台来进行网络性能测试,将不同方案在不同流量模型的不同故障

率情况下对网络的延迟和吞吐量进行实验对比.

通过比较数据包从流入网络到流出网络的平均时间,即网络平均延迟来评价网络的性能是对于网络性能评价的常用标准.如图 9、10 分别是 Random 流量模型和 Bit_Reversal 流量模型中多种方案在不同注入率和不同错误率情况下的网络平均延迟对比.

从图 9 中可以发现,在一个较大的 NoC 网络中, WiNoC 的平均延迟明显优于传统 NoC,当注入率达到 0.03 时,传统 NoC 方案的平均延迟已经高于 200 cycles.而且, NoC_e2e 方案的延迟受错误率的影响较大,在注入率为 0.02、错误率为 0.3 时,该方案的网络平均延迟约为其他方案的 4 倍. WiNoC_e2e 方案较 NoC_e2e 方案有较大的网络性能提升,但是当故障率增大时,其长距离的确认重传方案使得其网络平均延迟大幅提升:当注入率为 0.04、错误率为 0.25 时,其网络平均延迟超过 150 cycles;当错误率达到 0.3 时,其网络平均延迟增加至 260 cycles. Single_ACK 方案在故障率较低时平均延迟略高于 WiNoC_e2e 方案,主要是由于其多次传递 ACK 信号造成了一些时间的延迟,而当故障率高于 0.15 时, Single_ACK 方案由于其较短的重传路径而取得更好的效果. Wi_CHam 方案在低注入率、低故障率时具有较高的网络平均延迟,而在高注入率、高故障率时优于 Single_ACK 方案.这主要是因为 Wi_CHam 方案在低注入率和低故障率的情况下,进行交叉编码时需要等待后面的数据包,另外在解码时,也需要等待足量数据包才可以进行时序方向的解码;而在高注入率和高故障率的情况下,这种方法可以较少大量的重传,从而获得更好的性能.本文 EF-ACK 方案在无故障或者极低故障率的情况下优于 Wi_CHam 方案、略差于 Wi_e2e 方案,而在高故障率的情况下,其平均传输延迟远低于 Wi_CHam 和 Wi_e2e 方案,在 0.05 注入率、0.25 错误率时其平均传输延迟比 Wi_CHam 方案低 30% 左右,并且

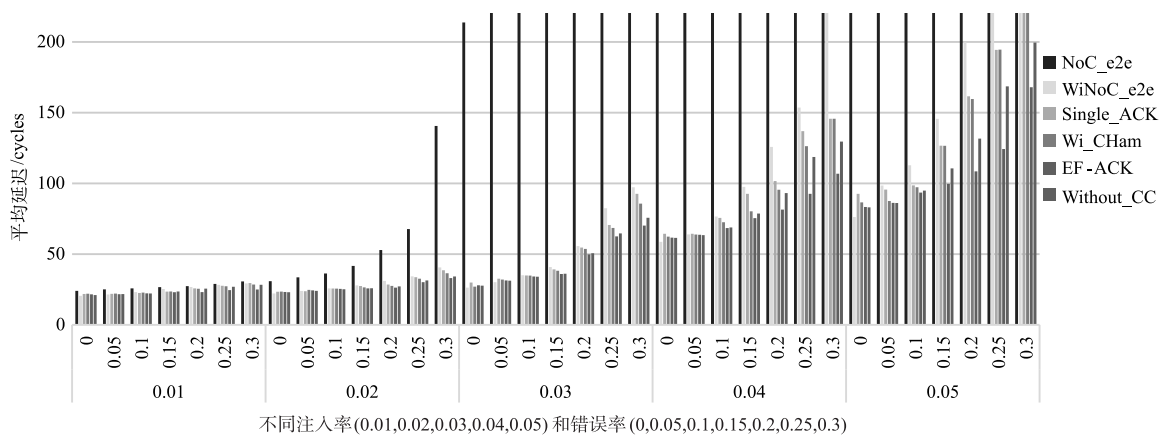


图9 Random流量模型下的网络平均延迟

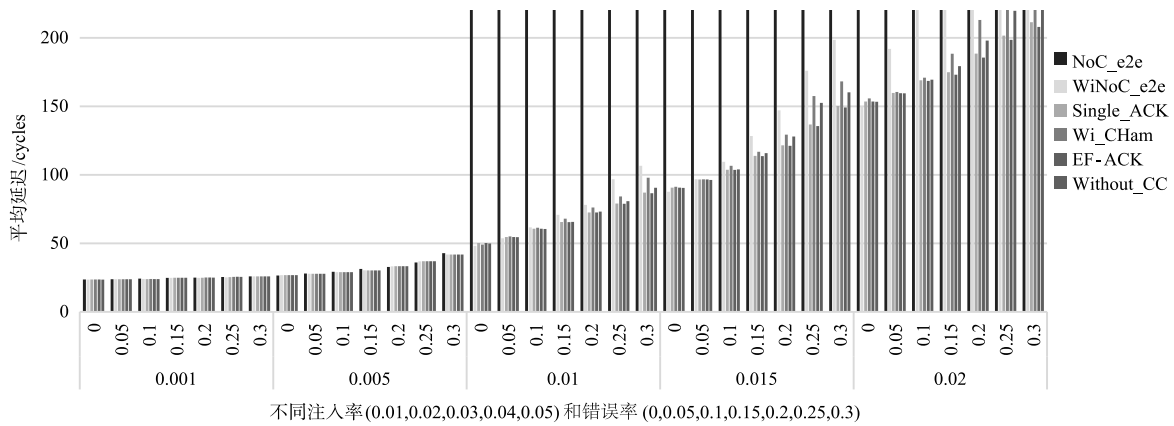


图10 Bit_Reversal流量模型下的网络平均延迟

在更高的注入率和错误率下有更好的延迟性能表现. 本文所提出的没有 CC 和编解码模块的精简方案 Without_CC, 在较低错误率下表现突出, 但是随着错误率的升高, 其较多的重发次数使得网络平均延迟较快上升, 使其差于本文 EF-ACK 完整方案.

通过图 10 中可以观察到, 在 Bit_Reversal 流量模型下, 较低的注入率就会引起网络平均延迟的大幅增加. 当注入率达到 0.01 时, NoC_e2e 方案的延迟已经高于 230 cycles, 而其余无线容错方案的平均延迟开始大幅增加. WiNoC_e2e 方案的网络平均延迟随着错误率的增加变化明显, 说明其对于错误的容错能力十分有限, 无法面对高错误率的网络环境. Single_ACK 方案和 Wi-Cham 方案的容错能力优于 WiNoC_e2e 方案, 但是在高错误率的情况下, 其网络平均延迟较高, 无法保证网络的性能需求. 本文精简方案 Without_CC 延迟在错误率接近于 0 时略优于 EF-ACK 完整方案, 但是在故障率较高时, 逊色于 EF-ACK 方案.

由图 9、图 10 可以看出本文 EF-ACK 方案在不同错误率下可以使网络保持较低的网络平均延迟, 并优于其他方案.

评价一个网络的网络性能另一个重要指标是在不同注入率下网络的饱和吞吐量, 饱和吞吐量越高说明该网络的传输效率越高. 如图 11 ~ 13 分别是不同方案在错误率为 0、0.15、0.3 时不同注入率下的吞吐量变化图.

可以看出当错误率为 0 时, NoC_e2e 方案在 Random 流量模型下注入率为 0.03 时已经达到饱和状态, 而其余无线方案在注入率为 0.04 时达到饱和状态; 同样在 Bit_Reversal 流量模型下 NoC_e2e 方案也是最先达到饱和状态. Single_ACK 方案的饱和吞吐量最低, 主要是由于其重复的 ACK 信号使得其无线传输的效率降低; Wi-Cham 方案的饱和吞吐量略高于 Single_ACK 方案, 是因为其交叉编码占用了较多的时钟周期, 而且, 无线传输的效率有所降低; 本文 EF-ACK 方案比 Wi-Cham 方案饱和吞吐量略高, 说明本文 EF-ACK 方案的 ACK 信号确认方案优于 Single_ACK 方案; Without_CC 方案在低错误率时性能效果略优于 EF-ACK 方案, 是因为其减少了 CC 模块对于编解码模块的控制, 以及编解码模块中选路所使用的时钟周期; 在无错误的时候, WiNoC_e2e 方案的效果最佳, 主要是由于其只在 RNI 进入 RN 时对数据进行检测, 而数据网络中传输的过程中不对其进行任何操作.

当错误率为 0.15 时, NoC_e2e 方案较错误率为 0 时饱和吞吐量略有降低. 本文的 EF-ACK 方案和 Without_CC 方案饱和吞吐量最高; 而在错误率为 0 时表现最好的 WiNoC_e2e 方案在 0.15 错误率下饱和吞吐量低于其他无线方案; 而 Wi-Cham 方案较 Single_ACK 方案略优, 主要是因为其交叉编码方案仅需较少的重传开销, 而 Single_ACK 方案的重传次数有所增加.

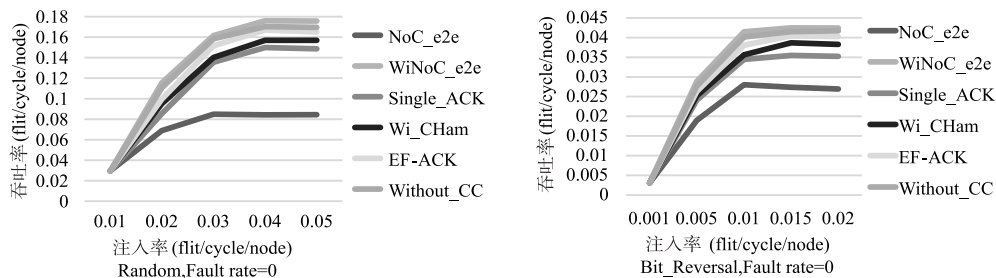


图11 错误率为0时不同注入率下吞吐量比较

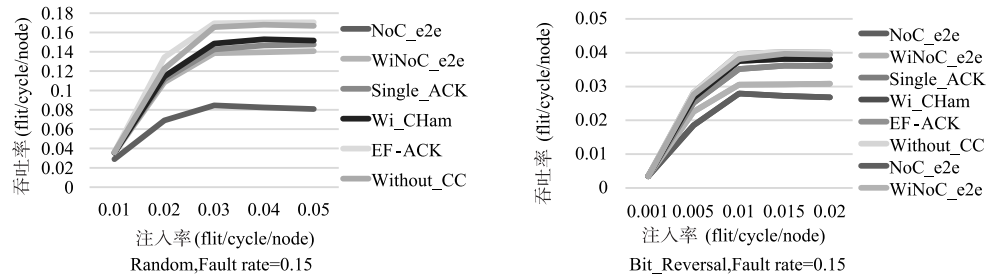


图12 错误率为0.15时不同注入率下吞吐量比较

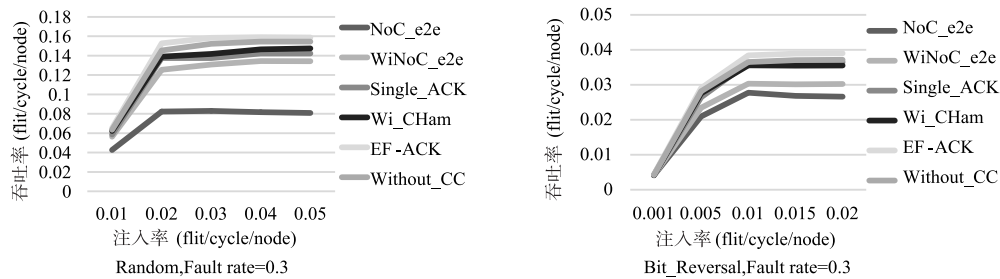


图13 错误率为0.3时,不同注入率下吞吐量比较

当错误率为 0.3 时, Without_CC 方案的饱和吞吐量较错误率为 0 或 0.15 时下降明显,其下降幅度高于 Wi_ChAm 方案. 因为 Without_CC 方案在高故障率的时候没有足够的鲁棒性,因此需要对数据进行大量的重传来传输正确的数据,而 Wi_ChAm 方案的编码使得 WR 接收端可以对错误数据进行一定的恢复,使得其吞吐量受高错误率数据传输的影响变化较小;本文 EF-ACK 方案饱和吞吐量仍然最高,主要是因为其兼具有鲁棒性和高效 ACK 信号反馈,对于错误数据能够以较快速度进行重传或恢复.

另外,根据图 11 ~ 13 纵向对比可以发现,在错误率增加时,两种流量模型下不同容错方案的吞吐量都有所下降. WiNoC_e2e 方案的吞吐量下降较快,在 0.3 错误率时,吞吐量较 0 错误率时下降约 28%;而本文 EF-ACK 方案同条件下吞吐量下降约 10%,较好地保证了网络的吞吐量.

综上所述,WiNoC_e2e 方案在低故障率时具有较好的网络性能,而本文 EF-ACK 方案在存在错误率时具有更好的网络性能,且均优于 Wi_ChAm 等其他方案.

4.3 面积开销和功耗

面积和功耗开销一直是 NoC 所需考虑的重要问题,本文使用 Synopsys 公司的 Design Compiler 实验工具,用 Verilog 语言描述和搭建硬件逻辑架构,用 Model-Sim 和 Xilinx ISE 进行功能和结构仿真,得到如表 2 所示的面积开销以及如表 3 所示的功耗开销. 本文采用的 Zig-Zag 天线面积大约为 0.19mm^2 ,毫米波收发器面积约为 $0.16\text{mm}^{2[20,21]}$.

表 2 路由器面积开销表

方案	BR (μm^2)	NWIWR (μm^2)	ADDL WI (μm^2)
NoC_e2e	51757	×	×
WiNoC_e2e	51757	62531	×
Single_ACK	52011	63952	19135
Wi_ChAm	51757	98357	5629
EF-ACK	52011	63952	22153
Without_CC	52011	63952	16942

表 2 展示了 45nm 制程工艺下本文所提各种实验方案的 BR、除 WI 以外的 WR (NWIWR)、以及除 Zig-Zag 天线和毫米波收发器以外的 WI (ADDL WI) 的面积开销. 可以看出 Single_ACK、EF-ACK 和 Without_CC 方案的 BR 面积略大于其余几种方案中 BR 的面积,差别可忽略不计. Wi_ChAm 方案在 WR 中对数据进行大量的缓存和编解码,添加了多个缓冲区和编解码单元,比 WiNoC_e2e 方案的基础 WR 面积增加了 57.30%. 而本文所提方案在 WR 中仅添加了部分控制信号线以及由 WR 的 RX 端 WI 备份至 RNI 接口的数据线,额外面积开销约为 $1421\mu\text{m}^2$,本文方案中的 WR 比 Wi_ChAm 方案的 WR 降低了 34.98%. 另外,本文的 WI 中添加了 APG、PTA、CC 等部件,使得本文所提方案的总面积开销有所增加,而除去 CC 和编解码模块的 Without_CC 方案的面积有所减小. 本文 EF-ACK 方案的总面积开销比 WiNoC_e2e 增加了 20.85%,比 Wi_ChAm 方案减少了 11.32%.

表 3 WR 功耗开销表

方案	静态功耗(mW)	动态功耗(mW)
NoC_e2e	×	×
WiNoC_e2e	31.5	65.36
Single_ACK	37.6	78.95
Wi_Cham	45.3	90.32
EF-ACK	39.7	82.11
Without_CC	36.4	75.87

表 3 是 WR 的静/动态功耗开销表,其中 NoC_e2e 方案由于不存在无线节点,故其无线节点的动、静态功耗不存在.通过其他方案中 WR 动、静态功耗的对比,可以看出,本文 EF-ACK 方案的静态功耗比 WiNoC_e2e 增加了 26.03%,比 Wi_Cham 减少了 12.36%.其动态功耗也比 Wi_Cham 减少 9.09%.

根据多种方案的网络性能以及面积、功耗开销的对比,可以发现本文 Without_CC 方案在低错误率时有较好的表现,但是随着错误率的增加,其性能大幅下降;而本文 EF-ACK 方案具有最佳的网络性能和高性价比的面积、功耗开销,在高错误率的情况下能够保持较好的网络性能.

5 总结

WiNoC 中的无线信道面临着巨大的可靠性挑战,而无线信道又在无线片上网络中起重要作用.本文针对 WiNoC 中无线信道所面临的高错误率问题,提出了 EF-ACK 容错 WI 设计,将多条确认信息配置在一个数据包内,通过无线信道传递确认信息数据包,减少了 WiNoC 中确认信息的传递时间;在无线接口处设立重传数据缓冲区,以更高效的方式确认数据以及控制错误数据包的重传,减少了重传所占用的信道资源,提高了重传效率;此外,我们还提出了基于网络状态的编解码控制,在网络情况较差时用 BCH 编码的方式提高数据的鲁棒性.实验表明本文 EF-ACK 方案可以使 WiNoC 在网络中数据传输错误率较高时保持较好的网络性能.

参考文献

- [1] Wolfgang Arden, Michel Brillouët, et al. "More-than-moore" white paper [OL]. <http://www.itrs2.net/itrs-models-and-papers.html>, 2015-07-04/2017-09-28.
- [2] Intel Corporation. Intel Xeon Phi Processors [OL]. <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/processors/xeon-phi/xeon-phi-processors.html>, 2017-09-26/2017-09-30.
- [3] M O Agyeman, A Ahmadinia, N Bagherzadeh. Performance

and energy aware inhomogeneous 3D networks-on-chip architecture generation [J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2016, 27(6): 1756 – 1769.

- [4] A Shacham, et al. Photonic network-on-chip for future generations of chip multi-processors [J]. IEEE Transactions on Computers, 2008, 57(9): 1246 – 1260.
- [5] Michael Opoku Agyeman, 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.
- [6] A Ganguly, P Pande, B Belzer, A Nojeh. A unified error control coding scheme to enhance the reliability of a hybrid wireless network-on-chip [J]. IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI and Nanotechnology Systems (DFT), 2011, 19(5): 277 – 285.
- [7] M O Agyeman, A Ahmadinia, A Shahrabadi. Heterogeneous 3d network-on-chip architectures: area and power aware design techniques [J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2013, 22(04): 1025 – 25.
- [8] Yu X, Sah S P, Deb S, et al. A wideband body-enabled millimeter-wave transceiver for wireless network-on-chip [A]. IEEE 54th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS) [C]. Seoul: IEEE, 2011. 1 – 4.
- [9] SB Lee, et al. A scalable micro wireless interconnect structure for CMPs [A]. International Conference on Mobile Computing & Networking [C]. Beijing: ACM, 2009. 217 – 228.
- [10] 熊志强. 无线传感器网络数据传输容错技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [11] A Prodromou, A Panteli, C Nicopoulos, Y Sazeides. No-CAAlert: An on-line and real-time fault detection mechanism for network-on-chip architectures [J]. IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture, 2012, 20: 60 – 71.
- [12] HMG Wassel, Y Gao, JK Oberg, T Huffmire, R Kastner, et al. SurfNoC: a low latency and provably non-interfering approach to secure networks-on-chip [J]. ACM Sigarch Computer Architecture News, 2013, 41(3): 583 – 594.
- [13] T Boraten, A Kodi. 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, PP(99): 1 – 1.
- [14] Ismail A, Abidi A. A 3 to 10 GHz LNA using a wideband LC-ladder matching network [A]. IEEE International Solid-state Circuits Conference [C]. San Francisco: IEEE, 2004. 384 – 534.
- [15] 黎建华, 吴宁, 胡永良, 张肖强. 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, ZHANG Xiao-qiang. An adaptive hybrid wireless NoC topology structure [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(6): 1420 – 1428. (in Chinese)
- [16] 欧阳一鸣, 陈义军, 梁华国, 等. 一种故障通道隔离的低开销容错路由器设计[J]. *电子学报*, 2014, 42(11): 2142 – 2149.
OUYANG Yi-ming, CHEN Yi-jun, LIANG Hua-guo, et al. Design of a low-overhead fault channel isolated fault-tolerant router [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(11): 2142 – 2149. (in Chinese)
- [17] 欧阳一鸣, 张一栋, 梁华国, 等. 三维片上网络故障及拥塞感知的容错路由器设计[J]. *电子学报*, 2013, 41(5): 912 – 917.
OUYANG Yi-ming, ZHANG Yi-dong, LIANG Hua-guo, et al. A fault-tolerant design of congestion-aware router in three-dimensional network-on-chip [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(5): 912 – 917. (in Chinese)
- [18] RJ Mstafa, KM Elleithy. A novel video steganography algorithm in DCT domain based on hamming and BCH codes [A]. *The 37th IEEE Sarnoff Symposium* [C]. Newark: IEEE, 2017. 208 – 213.
- [19] Catania V, Mineo A, Monteleone S, et al. Noxim: An open, extensible and cycle-accurate network on chip simulator [A]. *IEEE 26th International Conference on Application-specific Systems, Architectures and Processors (ASAP)* [C]. Toronto: IEEE, 2015. 162 – 163.
- [20] Deb S, Chang K, Ganguly A, et al. Design of an efficient NoC architecture using millimeter-wave wireless links [A]. *13th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED)* [C]. California: IEEE, 2012. 165 – 172.
- [21] Yu X, Baylon J, Wettin P, et al. Architecture and design of multichannel millimeter-wave wireless NoC [J]. *IEEE Design & Test*, 2014, 31(6): 19 – 28.

作者简介



欧阳一鸣 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 中国计算机学会高级会员, 研究方向为片上网络 (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



钱昌 男, 1994 年生, 硕士研究生, 研究方向为片上系统及片上网络容错方法, 无线片上网络。
E-mail: qc-1994@qq.com