

光片上网络中基于 NSGA-II 的多目标映射方法研究

王佳辉, 魏雯婷, 王 领, 顾华玺

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 片上网络(Network-on-Chip, NoC)是众核处理器中核间通信的重要载体. 光片上网络(Optical NoC, ONoC)采用光互连的方式实现 IP 核间通信, 具有带宽密度高、通信时延低、系统功耗低等优势, 能有效解决众核处理器带宽和能效瓶颈. 由于硅光器件及光信号的传输特性, ONoC 性能的提升受到串扰噪声、插入损耗等众多因素制约, 如何设计高可靠、低功耗的光片上网络 IP 核映射优化方案是 ONoC 的关键问题之一. 本文提出了一种基于 NSGA-II 算法的多目标 IP 核映射方法, 通过建立串扰噪声、插入损耗多目标联合优化的光片上网络 IP 核映射模型, 设计求解多目标优化的进化算法 NSGA-II, 以实现高可靠、低功耗的光片上网络 IP 核映射优化. 实验结果表明, 本文的 IP 核映射方法相比串扰噪声单目标优化平均降低了插入损耗 15.5%, 相比插入损耗单目标优化平均降低了串扰噪声 82.7%.

关键词: 光片上网络; IP 核映射; 串扰噪声; 插入损耗

中图分类号: TN47

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)10-2372-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20201418

Research on NSGA-II Based Multi-Objective Mapping Method in ONoC

WANG Jia-hui, WEI Wen-ting, WANG Ling, GU Hua-xi

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Network-on-Chip(NoC) is an important communication fabric in many-core processors. Optical NoC (ONoC) using light as transmission medium has shown significant advantages in bandwidth, communication latency and power consumption, which can mitigate bandwidth and energy efficiency bottlenecks in many-core processors. Due to some intrinsic characteristics of silicon optical devices and optical signals, the performance of ONoC is restricted by some factors such as crosstalk noise, insertion loss, etc. In order to minimize the crosstalk noise and insertion loss of ONoC, the IP core mapping optimization scheme has become a key issue for high performance ONoC design. In this paper, an NSGA-II based multi-objective IP-core mapping method is proposed. It builds a multi-objective IP-core mapping mathematical model to optimize the insertion loss and crosstalk noise of ONoC at the same time. Moreover, an improved NSGA-II algorithm is applied to this model to obtain an appropriate mapping result. Experiment results show that, compared with the single-objective algorithms for crosstalk, the proposed IP-core mapping method can reduce insertion loss by average 15.5%, and compared with the single-objective algorithms for insertion loss, it can reduce crosstalk noise by average 82.7%.

Key words: optical networks-on-chip; IP cores mapping; crosstalk noise; insertion loss

1 引言

随着云计算、大数据等应用的快速发展, 单芯片上需要集成的处理核数急剧增加. 为满足多处理核间的通信需求, 片上网络(Network-on-Chip, NoC)成为处理核间互连的基础通信设施^[1]. 使用光互连的 NoC 称为光片上网络(Optical NoC, ONoC). 核间通信需求是决定

NoC 性能的关键因素之一, 而核间通信需求由应用程序的线程在处理器上的分布决定. 将线程分配到多核片上系统(Multi-Processor System-on-Chip, MPSoC)的处理核上称为 IP 核(Intellectual Property Core, IP Core)映射问题. 本文将通过优化 IP 核映射来提升 ONoC 的性能.

由于光信号与光器件的特有属性, 光信号在经过光器件时由于不完全耦合会导致光功率泄漏, 损失的

收稿日期: 2020-12-11; 修回日期: 2021-03-17; 责任编辑: 王天慧

基金项目: 国家重点研发计划(No.2018YFE0202800, No.2018YFC0831200); 国家自然科学基金(No.61634004, No.61934002); 陕西省杰出青年自然科学基金(No.2020JC-26); 陕西高校青年创新团队以及中央高校基本科研业务费(No.XJS200119, No.JB190105)

光功率称为插入损耗.若泄漏的光信号耦合到了其他光信号的传输路径上便成了噪声信号,这些噪声即为串扰噪声.插入损耗会降低 ONoC 的能效,而串扰噪声影响信噪比,可能会导致整个 MPSoC 无法工作.通过优化 IP 核映射提高 ONoC 性能是一种可行的优化方法,这是因为 ONoC 上的 IP 核映射方案确定了 MPSoC 上各处理核间的通信流量分布,进而对插入损耗与串扰噪声产生影响.图 1 给出了通过映射优化串扰噪声与插入损耗的示意图.其中图 1(a)是应用程序通信关系图,图 1(b)是 4 种不同的映射结果.为直观地表示插入损耗与串扰噪声的相对大小,这里简单地认为光信号经过的跳数越多插入损耗越大,通信对之间的重叠越多串扰噪声越大.图 1(b1)展示了未经优化的映射结果中有两条光信号重叠的链路,其串扰噪声为“2”,所有通信对的总跳数为 8,因此规定其插入损耗为“8”;图 1(b2)展示了优化插入损耗的映射结果,其串扰噪声为“1”,插入损耗为“5”;图 1(b3)展示了优化串扰噪声的映射结果,其串扰噪声为“0”,插入损耗为“6”;图 1(b4)展示了同时优化插入损耗与串扰噪声的映射结果,其串扰噪声为“0”,插入损耗为“5”.

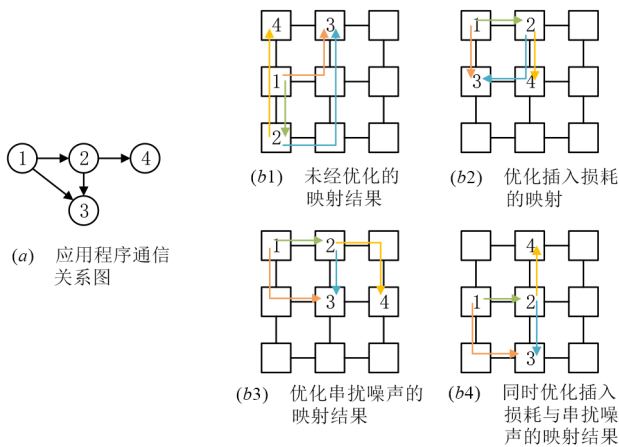


图 1 IP 核映射优化示意图

由于 IP 核映射问题是 NP 难的,无法通过穷举的方式得到目标性能最佳的映射方案,往往需要通过启发式算法来求解 IP 核映射问题.现有文献通常选择串扰噪声或插入损耗作为 ONoC 的 IP 核映射优化目标. Fusella 等人^[2]提出通过随机映射算法、遗传算法等方法将应用程序映射到基于网格(Mesh)的 ONoC 上,以优化最坏情况下的串扰噪声.文献[3]中以优化 ONoC 的串扰噪声与热平衡为目标,提出了一种将改进的遗传算法与模拟退火算法结合在一起的 IP 核映射算法——CGSA 算法.以上两篇文献都将插入损耗作为 IP 核映射的优化目标,没有考虑 ONoC 的插入损耗,这导致了 IP 核映射结果无法保证 ONoC 的插入损耗性能.文献

[4]提出了一种离线多应用损耗感知映射算法,用来将多个应用映射到 ONoC 上,以改善 ONoC 的插入损耗以及应用映射平均等待时间.文献[5]考虑光片上网络的可扩展性问题,在提出一种新的 ONoC 架构——CCC (Cube-Connected Cycles)架构的基础上提出了一种针对此架构的以优化 ONoC 插入损耗为目标的 IP 核映射方式.文献[6]提出了一种以减少激光功耗为优化目标的自动映射 IP 核到 ONoC 上的方法.然而,上述方案没有考虑 ONoC 的串扰噪声性能,映射结果可能无法满足 ONoC 对信噪比需求的情况.此外,现有工作往往只考虑基于单波长 ONoC 上的 IP 核映射问题,而为了获取更高的通信带宽,基于波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)的 ONoC 使用多种波长的光信号进行片上通信.

现有的 ONoC IP 核映射算法没有同时优化插入损耗与串扰噪声,导致所得映射结果无法同时保证上述两种性能.在现有研究的基础上,本文对基于光片上网络的 IP 核映射问题进行建模,分别构建了 IP 核映射与光片上网络插入损耗和串扰噪声之间的数学模型,并利用非支配排序遗传算法-II(Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II)^[7]求解以插入损耗和串扰噪声为优化目标的 IP 核映射优化方案.实验证明,本方案在串扰噪声与插入损耗性能方面要优于单目标优化方案.

2 光片上网络性能建模

2.1 光器件的插入损耗与串扰噪声模型

基于 WDM 的光元件结构和光交换单元如图 2 所示.

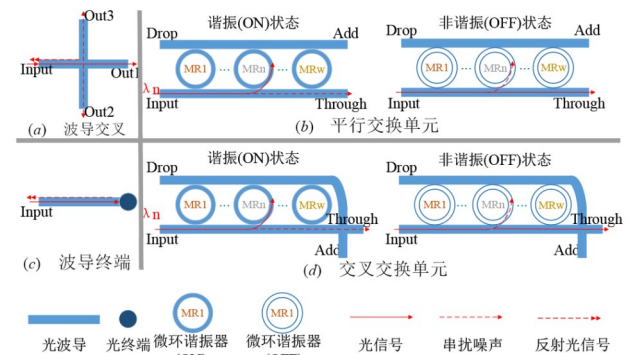


图 2 基本光元件和光交换单元示意图

如图 2(a)所示,波导交叉各端口的输出光功率的计算方式为

$$P_{Out1}^{\lambda_n} = L_c P_{in}^{\lambda_n} P_{Out2}^{\lambda_n} = P_{Out3}^{\lambda_n} = K_c P_{in}^{\lambda_n} P_{Re}^{\lambda_n} = K_r P_{in}^{\lambda_n} \quad (1)$$

其中, $P_{in}^{\lambda_n}$ 表示波长为 λ_n 的光信号在 Input 端口的输入光功率; $P_{Out1}^{\lambda_n}$, $P_{Out2}^{\lambda_n}$, $P_{Out3}^{\lambda_n}$ 与 $P_{Re}^{\lambda_n}$ 分别表示在端口 Out1, Out2, Out3 与 Input 的输出功率;其余参数的含义与描述如表 1 所示.

表 1 插入损耗与串扰噪声参数表

符号	含义	数值
L_c	波导交叉损耗	-0.04 dB
L_p	传输损耗/cm	-0.274 dB/cm
L_b	波导弯曲损耗	-0.005 dB/90°
L_{p0}	OFF 状态下 MR 平均通过损耗	-0.005 dB
L_{p1}	ON 状态下 MR 平均掉入损耗	-0.5 dB
L_m	平均调制损耗	-0.005 dB
K_c	波导交叉串扰系数	-40 dB
K_r	波导交叉反射系数	≈0
K_{p0}	OFF 状态下 MR 串扰系数	-20 dB
K_{p1}	OFF 状态下 MR 串扰系数	-25 dB
K_t	光终端反射系数	-50 dB

图 2(c) 中光终端返回的光功率通过式(2)计算:

$$P_{Rt}^{\lambda_n} = K_t P_{in}^{\lambda_n} \quad (2)$$

光信号在经过微环谐振器时在 Drop 端口处的输出功率与输入光功率的大小关系为

$$\frac{P_{drop}^{\lambda_n}}{P_{in}^{\lambda_n}} = \psi(\lambda_n, \lambda_{MRn}) = \frac{\delta^2}{(\lambda_n - \lambda_{MRn})^2 + \delta^2} \quad (3)$$

其中, $P_{in}^{\lambda_n}$ 表示光信号的输入功率, $P_{drop}^{\lambda_n}$ 表示光信号在 Drop 端口的输出功率; $\psi(\lambda_n, \lambda_{MRn})$ 表示 Drop 端口的输出光功率与 Input 端口的输入光功率的比值; λ_{MRn} 表示该微环谐振器的谐振波长且 $\lambda_n \neq \lambda_{MRn}$; 2δ 是微环谐振器的 3 dB 带宽, 可以通过 $Q = (\lambda_{MRn}/2\delta)$ 计算得到, Q 为该微环的品质因素.

由式(3)可知, 当波长为 λ_n 的光信号经过一个谐振波长为 λ_{MRn} ($\lambda_{MRn} \neq \lambda_n$) 的微环时, 一部分光功率将会被耦合到 Drop 端口. 光信号的波长与微环谐振器的谐振波长差值越大, 泄漏的功率越少.

图 2(b) 展示了平行光交换单元(Parallel Switch Element, PSE)在谐振状态(ON)与非谐振状态(OFF)下波长为 λ_n 的光信号的传输情况. 当 PSE 处于谐振状态时, 光信号的 λ_n 大部分功率将被耦合到 Drop 端口, 实现光信号的转向, 但是由于微环的不完全耦合, 仍有一部分光功率未能耦合到微环中, 输出到 Through 端口. 波长为 λ_n 的光信号经过谐振状态的 PSE 时, 上述端口的输出功率可以通过式(4)计算:

$$P_{Tpse, on}^{\lambda_n} = K_{p1} L_{p0}^{W-1} P_{in}^{\lambda_n} P_{Dpse, on}^{\lambda_n} = L_{p0}^{2(n-1)} L_{p1} P_{in}^{\lambda_n} \quad (4)$$

其中, $P_{Tpse, on}^{\lambda_n}$ 和 $P_{Dpse, on}^{\lambda_n}$ 分别表示波长为 λ_n 的光信号通过谐振状态的 PSE 时在 Through 端口和 Drop 端口的输出功率; W 表示 ONoC 中使用的光波长的数目; 微环谐振器是按照其谐振波长从小到大依次排列, 即第 m 个微环谐振器的谐振波长表示为 λ_{MRm} , 同理, λ_n 表示按照波长大小升序排列的第 n 个光信号的波长, 且有 $1 \leq m, n \leq W$; L_{p0} 为光信号通过非谐振状态的微环谐振器的平均

损耗系数; L_{p1} 表示光信号经过谐振波长等于自身波长的微环谐振器时的平均插入损耗系数; K_{p1} 表示光信号经过谐振状态的微环谐振器时的平均串扰系数.

当 PSE 处于非谐振状态时, 处于谐振状态时谐振波长为 λ_{MRn} 的微环谐振器的谐振波长会转变为 $\lambda'_{MRn} = \lambda_{MRn} + \varepsilon$. 在非谐振状态下, 经过微环谐振器的光信号会有少部分功率泄漏到 Drop 端口, 而其余的光功率由 Through 端口输出. Drop 与 Through 端口的输出功率分别为

$$P_{Tpse, off}^{\lambda_n} = L_{p0}^W P_{in}^{\lambda_n}$$

$$P_{Dpse, off}^{\lambda_n} = K_{p0} L_{p0}^{2(n-1)} P_{in}^{\lambda_n} + \sum_{j=1, j \neq n}^W \left(L_{p0}^{2(j-1)} \psi(\lambda_n, \lambda'_{MRj}) \right) P_{in}^{\lambda_n} \quad (5)$$

其中, $P_{Tpse, off}^{\lambda_n}$ 和 $P_{Dpse, off}^{\lambda_n}$ 分别表示波长为 λ_n 的光信号在经过处于非谐振状态下的 PSE 时, Through 端口和 Drop 端口的输出功率; K_{p0} 表示微环谐振器处于非谐振状态时的平均串扰系数.

图 2(d) 展示了交叉交换单元(Crossing Switch Element, CSE)在谐振状态(ON)与非谐振状态(OFF)时光信号传输情况. 当 CSE 处于 ON 状态时, 其 Through 与 Drop 端口的输出功率分别为

$$P_{Tcse, on}^{\lambda_n} = K_{p1} L_{p0}^{W-1} L_c P_{in}^{\lambda_n}$$

$$P_{Dcse, on}^{\lambda_n} = L_{p0}^{2(n-1)} L_{p1} P_{in}^{\lambda_n} \quad (6)$$

其中, $P_{Tcse, on}^{\lambda_n}$ 和 $P_{Dcse, on}^{\lambda_n}$ 分别表示波长为 λ_n 的光信号在经过处于谐振状态下的 CSE 时, Through 端口和 Drop 端口的输出功率.

当 CSE 处于非谐振状态时, 式(7)给出了各端口的输出功率计算方式:

$$P_{Tcse, off}^{\lambda_n} = L_{p0}^W L_c P_{in}^{\lambda_n}$$

$$P_{Dcse, off}^{\lambda_n} = K_{p0} L_{p0}^{2(n-1)} P_{in}^{\lambda_n} + \sum_{j=1, j \neq n}^W \left(L_{p0}^{2(j-1)} \psi(\lambda_n, \lambda'_{MRj}) \right) P_{in}^{\lambda_n}$$

$$+ L_{p0}^W K_c P_{in}^{\lambda_n} \quad (7)$$

$$P_{Acse, off}^{\lambda_n} = L_{p0}^W K_c P_{in}^{\lambda_n}$$

其中, $P_{Tcse, off}^{\lambda_n}$, $P_{Dcse, off}^{\lambda_n}$ 和 $P_{Acse, off}^{\lambda_n}$ 分别表示光信号在经过处于非谐振状态下的 CSE 时, Through 端口、Drop 端口和 Add 端口的输出功率.

光调制器与光接收器的关键结构^[8]如图 3 所示. 图 3(a) 展示了光发送端示意图, 输出到 Out 端口的光功率通过式(8)计算:

$$P_{Msignal}^{\lambda_n} = L_m L_{p0}^{W-n} L_b^2 L_{p1} P_v^{\lambda_n} \quad (8)$$

其中, $P_{Msignal}^{\lambda_n}$ 表示光发送端的输出光功率; $P_v^{\lambda_n}$ 表示激光器输出的光功率大小.

图 3(b) 展示了光接收端示意图. 探测器接收到的信号功率与噪声功率表示为

$$P_{Dsignal}^{\lambda_n} = L_{p0}^{n-1} L_{p1} P_v^{\lambda_n} P_{Dnoise}^{\lambda_n} = L_{p0}^{n-1} \left(\sum_{j=n+1}^W \psi(j, \lambda'_{MRj}) \right) P_{in}^{\lambda_n} \quad (9)$$

其中, $P_{\text{Dsignal}}^{\lambda_n}$ 表示波长为 λ_n 的光信号在接收端的光-电探测器的输入信号功率; $P_{\text{Dnoise}}^{\lambda_n}$ 表示该信号在接收端遭受的串扰噪声功率。

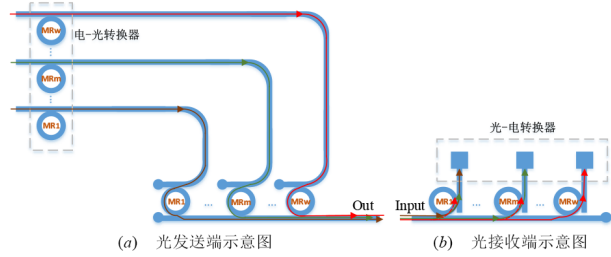


图3 光发送端与接收端示意图

2.2 光路由器的插入损耗与串扰噪声模型

基于对光元件和光交换单元的分析, 本小节将对基于 WDM 的光路由器中的插入损耗与串扰噪声进行分析建模. 本文以基于 Mesh 的 ONoC 为研究对象, 其使用 5×5 的 Crux^[9] 光学路由器来连接 MPSoC 上各核心. Crux 光路由器结构如图 4 所示. 该路由器有 5 个端口, 其中本地端口标记为 I_0 , 北向、东向、南向、西向端口分别标记为 I_1, I_2, I_3 和 I_4 . Crux 路由器使用 XY 路由算法, 因此禁止光信号从端口 I_1 或 I_3 到端口 I_2 和 I_4 . 当波长为 λ_n 的信号从路由器 s 中的第 i 个端口传输到第 j 个端口时, 输出功率可以由式(10)计算:

$$P_{s,ij}^{\lambda_n} = L_{ij}^{\lambda_n} P_s^{\lambda_n} \quad (10)$$

其中, $P_{s,ij}^{\lambda_n}$ 表示波长为 λ_n 的光信号由路由器 $s \in S$ 的 I_i 到 I_j 的输出光功率, S 是波长为 λ_n 的光信号所经过的光路由器的集合; $L_{ij}^{\lambda_n}$ 表示波长为 λ_n 的光信号经过路由器 s 的 I_i 到 I_j 经历的插入损耗系数; $P_s^{\lambda_n}$ 表示光信号在进入路由器 s 前的光功率。

例如, 光信号从 I_2 到 I_4 时, 对应的插入损耗系数表示为 $L_{2,4}^{\lambda_n} = (L_{\text{Tcse,off}}^{\lambda_n})^3 L_{\text{Tpse,off}}^{\lambda_n}$, 其中 $L_{\text{Tcse,off}}^{\lambda_n}$ 表示光信号经过

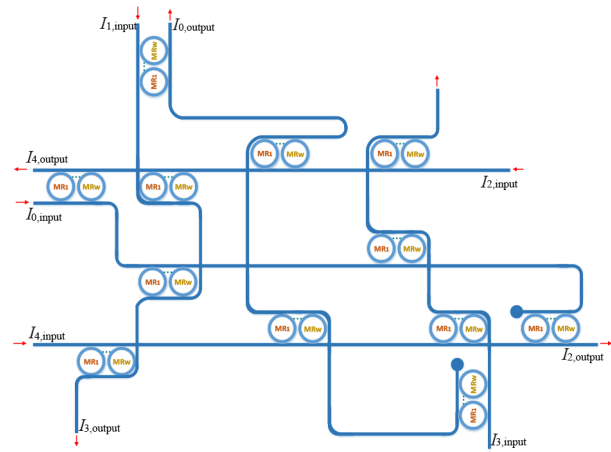


图4 Crux 路由器结构图

OFF 状态的 CSE 时对应的插入损耗系数, 而 $L_{\text{Tpse,off}}^{\lambda_n}$ 则对应于光信号经过 OFF 状态的 PSE 时对应的插入损耗系数. $L_{\text{Tcse,off}}^{\lambda_n}$ 和 $L_{\text{Tpse,off}}^{\lambda_n}$ 可以通过基本光交换器件的分析得到, 以 $L_{\text{Tcse,off}}^{\lambda_n}$ 为例, 根据式(7), $L_{\text{Tcse,off}}^{\lambda_n} = P_{\text{Tcse,off}}^{\lambda_n} / P_{\text{in}}^{\lambda_n} = L_{p0}^W L_c$.

当波长为 λ_n 的光信号经过路由器 s 时, 同时在 s 中传输的其他光信号可能会对该光信号产生串扰噪声. 串扰噪声根据输入光信号与干扰光信号的光波长可分为同波长串扰噪声和非同波长串扰噪声. 对于同波长串扰噪声, 不论从任何地方被耦合到当前光信号的传输链路中的串扰噪声, 都将会一直存在, 在光信号被接收端接收时对光信噪比产生影响. 设主信号的波长为 λ_n , 光路由器 s 中与 λ_n 同时存在的同波长光信号为 $\lambda_k \in C_{s,\lambda_n}$, 各串扰信号输入功率为 $P_{in}^{\lambda_k}$, 则主信号 λ_n 在 s 处受到的串扰噪声大小可通过式(11)计算:

$$P_{s,\text{crosstalk}}^{\lambda_n} = \sum P_{in}^{\lambda_k} C_{\lambda_k,p,q}^{\lambda_n,i,j} \quad (11)$$

其中, $P_{s,\text{crosstalk}}^{\lambda_n}$ 表示波长为 λ_n 的光信号在路由器 s 中遭受的同波长串扰噪声功率; $C_{\lambda_k,p,q}^{\lambda_n,i,j}$ 是 λ_k 的串扰系数, i 和 j 表示 λ_n 的输入、输出端口, p 和 q 表示 λ_k 的输入、输出端口。

对于非同波长串扰噪声, 仅需考虑与主信号有相同接收端且在主信号之后被接收的光信号产生的串扰。

2.3 光片上网络的插入损耗与串扰噪声模型

在 ONoC 中, 接收端接收到的光信号功率可通过式(12)计算:

$$P_{\text{signal}}^{\lambda_n} = L_{\text{Msignal}}^{\lambda_n} \left(\sum_{s_{i,j}^k \in S} L_{i,j}^{\lambda_n} \right) L_{\text{Dsignal}}^{\lambda_n} P_v^{\lambda_n} \quad (12)$$

其中, $P_{\text{signal}}^{\lambda_n}$ 表示波长为 λ_n 的光信号在接收端的光功率; $s_{i,j}^k \in S$ 表示光信号 λ_n 经过的第 k 个路由器, 且输入、输出端口分别为 i 和 j ; $L_{\text{Msignal}}^{\lambda_n}$, $\sum_{s_{i,j}^k \in S} L_{i,j}^{\lambda_n}$ 和 $L_{\text{Dsignal}}^{\lambda_n}$ 分别表示光信号在光调制器、光传输路径以及光探测器处的插入损耗系数, 这些系数都可以通过光器件与光路由器的插入损耗模型得到。

在各光信号的发送光功率相同的情况下, 波长为 λ_n 的光信号在 ONoC 中传输过程中遭受的插入损耗可以表示为

$$P_{\text{loss}}^{\lambda_n} = P_v^{\lambda_n} - P_{\text{signal}}^{\lambda_n} \quad (13)$$

其中, $P_{\text{loss}}^{\lambda_n}$ 表示光信号在 ONoC 中传输时损失的光功率。

光信号到达目的节点的光-电转换器前收到的串扰噪声功率可以表示为

$$P_{\text{noise}}^{\lambda_n} = L_{p0}^{n-1} \left(\sum P_{in}^{\lambda_k} C_{\lambda_k,p,q}^{\lambda_n,i,j} \right) + L_{p0}^{n-1} \left(\sum_{j=n+1}^W \psi(j, \lambda_{\text{MRn}}) P_{in}^{\lambda_j} \right) \quad (\lambda_k \in C_{s,\lambda_n}, s \in S) \quad (14)$$

其中,等号右边的第一部分表示同波长串扰信号产生的串扰噪声功率,第二部分表示非同波长串扰信号产生的串扰噪声功率.

综上,光信号 λ_n 的光信噪比表示为

$$\text{OSNR}_{\lambda_n} = 10 \log \left(\frac{P_{\text{signal}}^{\lambda_n}}{P_{\text{noise}}^{\lambda_n}} \right) \quad (15)$$

3 光片上网络 IP 核映射问题建模

应用程序通信关系图表示为有向图 $\text{CG} = G(C, E)$.

其中, C 表示应用程序通信关系图中的各线程的集合, 将各线程表示为 $c_i \in C (i \in [1, |C|])$; E 表示应用程序通信关系图中连接各线程的有向边的集合, 各条有向边 $e_{i,j} \in E$ 表示线程 c_i 到线程 c_j 的通信关系.

ONoC 拓扑结构图使用有向图 $\text{NG} = G(T, L)$ 表示.

其中 T 表示 MPSoC 中核心的集合, 各核心表示为 $t_i \in T$; L 表示 ONoC 中单向物理链路的集合, 各条单向物理链路 $l_{i,j} \in L$ 表示从核心 t_i 到核心 t_j 的单向物理链路.

IP 核映射结果使用一个行向量 $v \in V$ 表示, 且 $|v| = |C|$, v 中非零元素的个数为 $|C|$. v 的行索引表示 MPSoC 中核心的编号, 索引对应的值表示映射到该核心的应用程序线程的编号值, 若该值为 0, 则表示没有线程被映射到该核心上.

将一个具有 8 个线程的应用程序映射到一个 3×3 的基于 Mesh 的 ONoC 上, 映射过程如图 5 所示. 按照本文中使用的 IP 核映射方案的表示方法, 则该映射结果表示为 $v = (4, 1, 8, 5, 2, 0, 6, 3, 7)$.

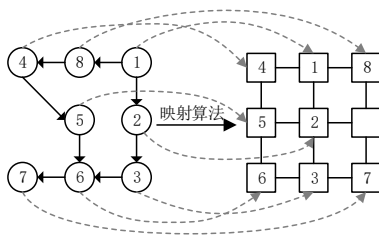


图 5 映射过程示例

本文中假设所有的光信号的发射功率相同, 所以用接收端接收到的光信号功率来衡量插入损耗性能. 本文的双目标优化模型可以表示为

$$\begin{aligned} \text{Opt.} \quad & \begin{cases} \max \text{OSNR}_{\text{wc}} \\ \min \text{IL}_{\text{wc}} \end{cases} \\ \text{s. t.} \quad & \forall c_i \in C, \Omega(c_i) \in T \\ & \forall c_i \neq c_j \in C \Leftrightarrow \Omega(c_i) \neq \Omega(c_j) \in T \end{aligned} \quad (16)$$

约束条件表明, MPSoC 中的每个核心至多容纳一个线程, 且线程数目不多于 MPSoC 的核心数目.

4 基于 NSGA-II 的双目标模型求解

本文选择使用 NSGA-II 算法求解所建串扰噪声与插入损耗联合优化模型, NSGA-II 算法实现如算法 1 所示.

NSGA-II 算法的复杂度由种群中的个体数目 N 以及优化目标个数 M 决定. 在最坏情况下, 非支配排序的时间复杂度为 $O(M(2N)^2)$, 为个体分配拥挤度的时间复杂度为 $O(M(2N)\log(2N))$, 选择个体的时间复杂度为 $O(2N(\log(2N)))$, 因此总的最坏情况下的时间复杂度由非支配排序的时间复杂度决定, 且为 $O(M(2N)^2)$.

算法 1 NSGA-II

Input:

$\text{CG} = G(C, E)$: 应用程序 IP 核图

$\text{NG} = G(T, L)$: ONoC 拓扑结构图

N : 种群个体数目

K : 迭代次数

Output:

Mapping result set mapping_solutions

Begin:

Generate an initial population O_0

Fast-Nondominated-sort(O_0)

for each $n \in O_0$ do

$\text{nd} \leftarrow \text{Crowding-Destination-Calculate}(n)$

endfor

$t = 0$

for $t = 0$ to K do

for $i = 0$ to $N/2$ do

if $\text{random}(1) < \text{pc}$ then

$[\text{parent1}, \text{parent2}] \leftarrow \text{Select-Operation}(O_t)$

$[p, q] \leftarrow \text{Crossover-Operation}(\text{parent1}, \text{parent2})$

$Y_t \leftarrow Y_t \cup \{p, q\}$

else then

$Y_t \leftarrow Y_t \cup \{\text{parent1}, \text{parent2}\}$

endif

endif

endfor

if $\text{random}(1) < \text{pm}$ then

$q \leftarrow \text{Mutation-Operation}(y)$

$Y_t \leftarrow (Y_t - y) \cup \{q\}$

endif

endfor

$R_t = O_t \cup Y_t$

Fast-Nondominated-sort(R_t)

for each $r \in R_t$ do

Calculate rd

endfor

$O_{t+1} \leftarrow \text{Select-Operation}(R_t)$

endfor

End

5 算法仿真及性能分析

5.1 仿真参数设置

本节将通过实验对本文所提出方案进行验证. 使用最差情况下的光信噪比表示串扰噪声性能, 使用最差情况下接收端光-电转换器接收到的信号功率表示插入损耗性能. 按照轮询的方式为各通信对分配通信波长. 实验参数设置如表 2 所示.

表 2 仿真参数配置

符号	含义	数值
W	波长数目	4
FSR	自由光谱范围	59 nm
λ_0	最短波长	1 550 nm
P_v	VSCSEL 输出功率	50 mW
ϵ	谐振波长偏移量	0.16 nm
Q	品质因素	9 000
N	群体规模	200
K	迭代次数	100
pc	交叉概率	0.9
pm	变异概率	0.1

本文选择 8 种不同的应用程序用于实验仿真, 并将各应用程序映射到边长相等的基于 Mesh 的 ONoC 上, 且 MPSoC 上的核心数目大于应用程序的线程数目, 因此各应用映射到的 ONoC 的大小在 3×3 到 5×5 之间. 在仿真中使用到的应用程序的通信关系图如图 6 所示.

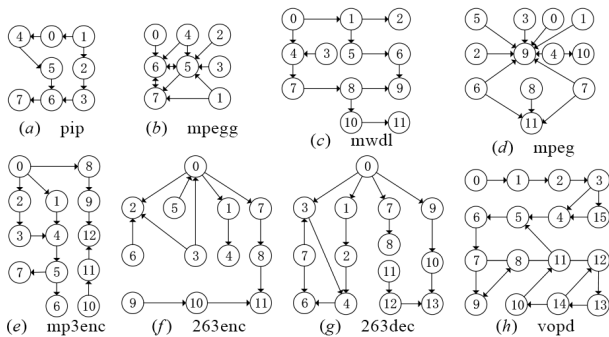


图 6 应用程序的通信关系图

使用 NSGA-II 求解各应用的 IP 核映射优化模型得到的结果为一个映射解集, 这是由双目标优化的固有特性所决定的. 不同于单目标优化中只通过一个指标来评价结果的好坏, 双目标优化中需要同时考虑两个优化目标, 因此最后所得结果中往往没有任何一个结果可以实现两个性能最佳, 因此最后输出的结果为映射解集是合理的.

本文所采用的对比方案描述如下.

(1) 随机搜索算法 (Random Search, RS): 随机生成五万个映射解并选择特定性能最优映射解.

(2) 遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)^[10]: 虽然文献

[10] 中仅使用 GA 求解以插入损耗为优化目标的 IP 核映射问题, 但 GA 求解的问题不局限于特定问题, 因此为了更加全面、公平地评价算法性能, 本文分别以插入损耗与串扰噪声为优化目标, 使用 GA 求解 ONoC IP 核映射问题.

本文共进行了 50 次实验, 并取各项性能指标的平均值进行分析比较.

5.2 最佳串扰噪声性能映射解

本节比较 3 种算法所得串扰噪声性能最佳映射解的性能, 即 RS 与 GA 是优化串扰噪声. 选择映射解集中串扰性能最佳的映射解与其余两种算法作比较, 并计算 95% 置信区间, 结果如图 7 所示. 图 7(a) 表示 3 种算法所得映射解的串扰噪声性能, 用光信噪比表示, 单位为 dB; 图 7(b) 表示插入损耗性能, 用接收端接收到的光功率表示, 单位为 mW. 在图 7(a) 与图 7(b) 中, “RS-Crosstalk” 和 “GA-Crosstalk” 表示优化串扰噪声的 RS 和 GA 所得映射解的性能, “NSGA2-Crosstalk” 表示双目标映射解集中串扰噪声最佳映射解的性能.

从图 7(a) 可知, 通过 NSGA-II 得到的最佳串扰性能的最佳映射解和通过 GA, RS 所得映射解的串扰性能相差无几, 差距在 1.1% 以内.

由图 7(b) 可得, NSGA-II 比 GA 所得映射解插入损

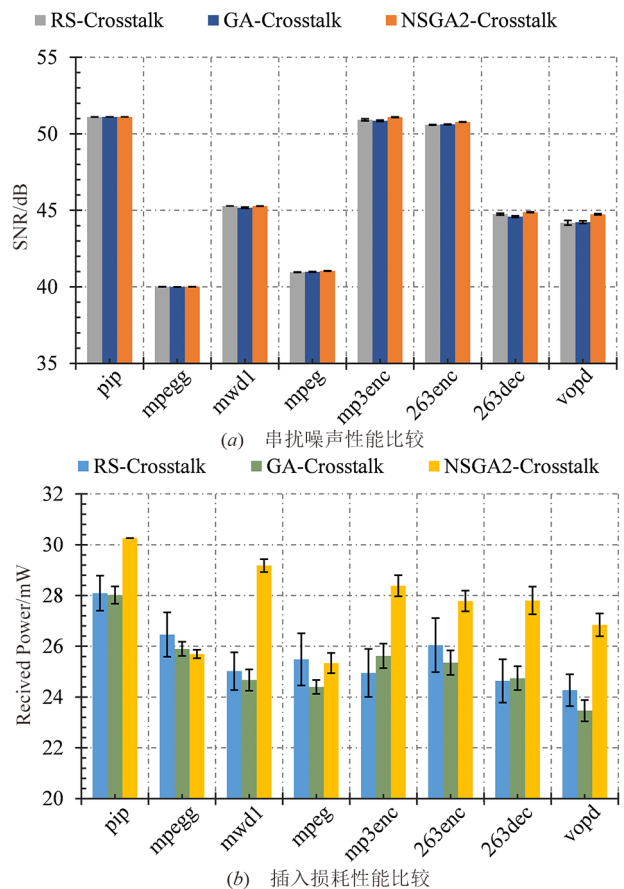


图 7 最佳串扰噪声映射解的性能比较

耗性能平均提高了8.4%。由此可得,虽然NSGA-II所得串扰性能最优映射解在串扰性能方面与优化串扰的单目标映射算法相差很小,但其在插入损耗性能方面具有优势。这是因为双目标优化算法在映射过程中不仅考虑串扰噪声,同时还考虑插入损耗。因此即便是双目标串扰最优映射解,仍比单目标映射解具有更好的插入损耗性能。

5.3 最佳插入损耗性能映射解

插入损耗性能最佳映射解与优化插入损耗的RS和GA所得映射解的对比结果如图8所示。图8中各图例名称的含义与图7一致,“NSGA2-Loss”表示使用双目标优化算法得到的插入损耗性能最佳的映射解的性能,同时“RS-Loss”“GA-Loss”中的“Loss”表示相应单目标优化算法的优化目标为插入损耗。

由图8(a)可知,双目标映射解插入损耗最高提升仅为5.6%。由此可得:仅对插入损耗(或串扰噪声)进行

优化得到的映射解与使用双目标优化算法得到的在插入损耗(或串扰噪声)具有最优性能的映射解在插入损耗(或串扰噪声)的性能差异很小。

由图8(b)可知,双目标优化映射解的串扰性能均优于单目标映射解,串扰性能最高提升达到80.6%,平均提升达到47.4%。

5.4 性能均衡映射解

性能均衡映射解是根据最佳插入损耗映射解与最佳串扰噪声映射解确定的。具体地,假设在所有映射解中,最佳接收端光功率为 L_{max} ,最佳接收端光信噪比为 C_{max} ,各映射解对应的最坏接收端光功率表示为 L_i ,最坏光信噪比表示为 C_i 。计算各映射解的最差接收端光功率与最差光信噪比与对应的最佳值之间的差值,即 $(L_i - L_{max})/L_{max} + (C_i - C_{max})/C_{max}$,并选择差值最小的映射解作为性能均衡映射解。图9展示了性能均衡映射解与单目标映射解的比较。“NSGA2-Balance”表示性能均衡映射解的性能。

由图9(a)可得,性能均衡映射解的串扰性能相比于双目标映射解集中串扰噪声性能最佳的映射解有所下降,但是与单目标映射解相比并没有表现出很大的劣势。以263dec为例,性能均衡映射解与最佳串扰噪声映射解相比于遗传算法所得映射解的串扰噪声性能仅下降了1.0%。如图9(c)所示,性能均衡映射解的插入损耗性能明显优于GA的映射解,平均提升了15.5%。从对比结果可得,虽然性能均衡映射解不能达到单项性能最优,但是其串扰噪声与插入损耗的综合性能更加具有优势。

双目标性能均衡映射解与优化插入损耗的单目标映射解的比较结果如图9(b)和图9(d)所示。由图9(b)可得,性能均衡映射解的插入损耗性能与优化插入损耗的RS和GA的映射解的插入损耗性能相比,总体上略差于单目标映射解,但是最大差距仅为5.3%。从图9(d)可得,均衡映射解的串扰噪声性能相比于单目标映射解的提升十分明显,平均串扰性能提升为82.7%。性能均衡映射解之所以相比于优化插入损耗的单目标映射解在串扰噪声方面具有巨大的性能提升,主要是因为单目标映射算法仅考虑插入损耗的优化,而串扰性能受到多种因素的影响,不同的映射解对应的串扰噪声的取值范围相比于插入损耗要更大,忽视串扰噪声使得这些映射解的串扰噪声性能无法得到保证,很难得到较好的串扰噪声性能。虽然优化串扰噪声的单目标映射解的插入损耗性能也无法得到保证,但是插入损耗的取值范围较小导致了在双目标映射解的比较中差距较小。

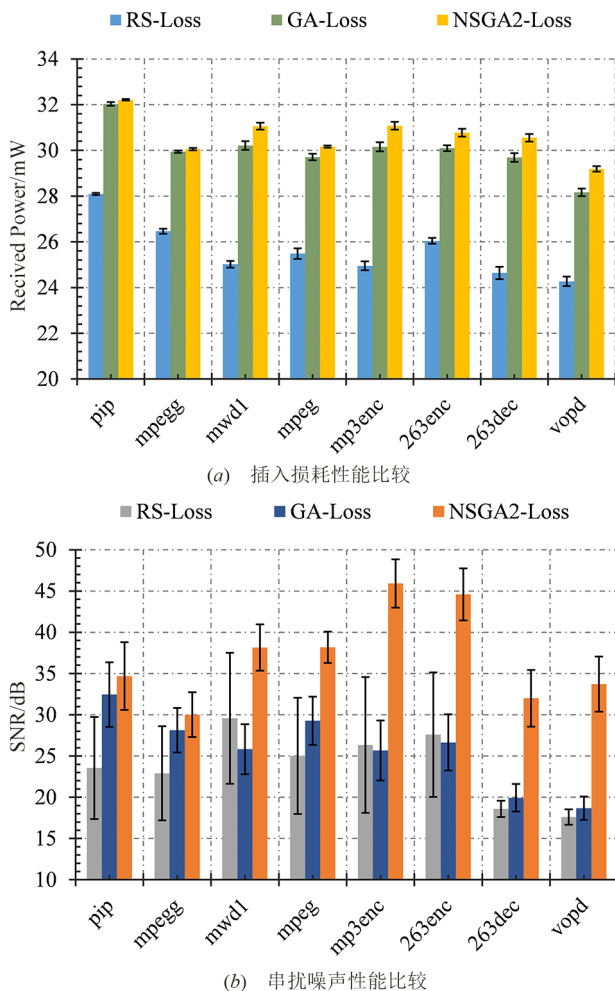


图8 最佳插入损耗映射解的性能比较

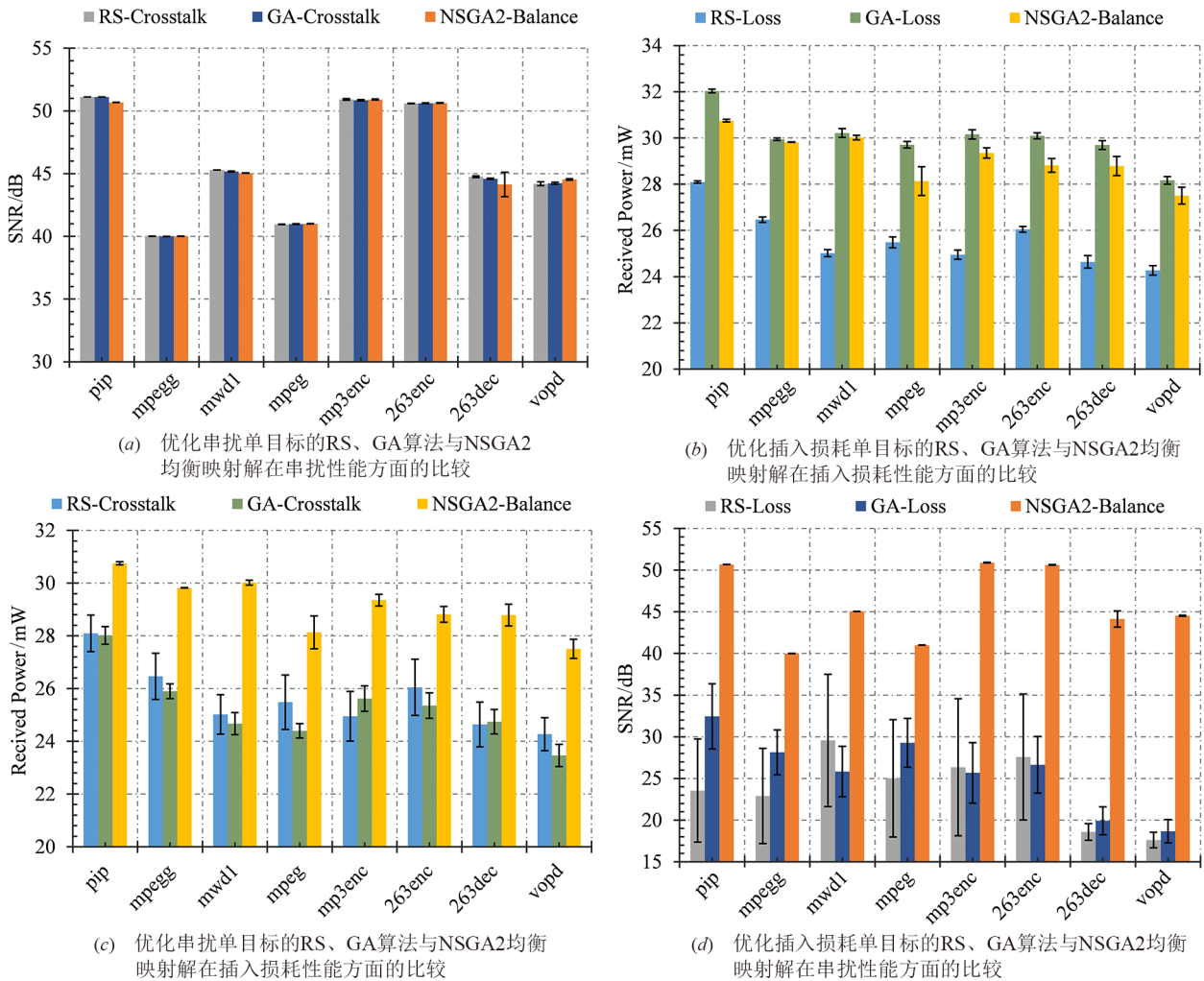


图9 均衡映射解与单目标映射解的性能比较

6 结束语

针对多波长的 ONoC 应用场景,联合考虑插入损耗与串扰噪声,本文提出了一种基于插入损耗与串扰噪声的联合优化模型,并采用NSGA-II算法对所提模型进行求解. 本文所提优化模型同时对串扰噪声和插入损耗进行优化,并通过NSGA-II算法对所提双目标优化模型进行求解. 最后通过MATLAB对所提算法进行验证. 实验结果表明,所提算法可以同时 ONoC 的串扰噪声与插入损耗进行优化,验证了所提模型与算法的有效性.

参考文献

[1] 杨盛光, 李丽, 高明伦, 等. 面向能耗和延时的NoC映射方法[J]. 电子学报, 2008, 36(5): 937-942.
 YANG S G, LI L, GAO M L, et al. An energy- and delay-aware mapping method of noc[J]. Acta Electronica Sinica,

2008, 36(5): 937-942. (in Chinese)
 [2] FUSELLA E, CILARDO A. Crosstalk-aware automated mapping for optical networks-on-chip[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems(TECS), 2016, 16(1): 16.
 [3] GUO L, GE Y, HOU W, et al. A novel IP-core mapping algorithm in reliable 3D optical network-on-chips[J]. Optical Switching and Networking, 2018, 27: 50-57.
 [4] REZA A, MIRZAEI R F. Non-preemptive offline multi-job mapping for a photonic network on a chip[J]. Nano Communication Networks, 2017, 11: 11-23.
 [5] ABDOLLAHI M, MOHAMMADI S. Insertion loss-aware application mapping onto the optical cube-connected cycles architecture[J]. Computers & Electrical Engineering, 2020, 82: 106559.
 [6] FUSELLA E, CILARDO A. Reducing power consumption

of lasers in photonic NoCs through application-specific mapping[J]. ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems(JETC), 2018, 14(2): 1-11.

- [7] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [8] NIKDAST M, XU J, DUONG H K L, et al. Crosstalk noise in WDM-based optical networks-on-chip: A formal study and comparison[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration(VLSI) Systems, 2014, 23(11): 2552-2565.
- [9] XIE Y, NIKDAST M, XU J, et al. Crosstalk noise and bit error rate analysis for optical network-on-chip[C]// Design Automation Conference. Anaheim: IEEE, 2010: 657-660.
- [10] FUSELLA E, CILARDO A. Minimizing power loss in optical networks-on-chip through application-specific mapping[J]. Microprocessors and Microsystems, 2016, 43: 4-13.

作者简介



王佳辉 男,1995年生,内蒙古商都人.西安电子科技大学硕士研究生.主要研究方向为软件定义网络、光片上网络映射.
E-mail: jiahui.wang.xidian@foxmail.com



魏雯婷(通讯作者) 女,1988年生,山西大同人.西安电子科技大学讲师,硕士生导师,陕西省青年创新团队核心骨干.长期致力于数据中心网络、片上网络、智能化网络资源管控等方向的研究.主持1项国家自然科学基金青年项目、1项国防科技重点实验室基金项目以及1项中央高校基本科研业务费专项资金资助项目;作为技术骨干参与国家重点研发计划、国家自然科学基金重点项目、华为创新研究项目等.

E-mail: wtwei@xidian.edu.cn



王 领 男,1989年生,安徽合肥人.西安电子科技大学科技大学讲师.主要研究方向包括片上网络、AI加速器等.

E-mail: lingwang@xidian.edu.cn



顾华玺 男,1977年生,河北石家庄人.西安电子科技大学通信工程学院教授,博士生导师.陕西省青年创新团队负责人,陕西省自然科学杰出青年基金项目获得者.主持国家重点研发计划项目1项、国家自然科学基金重点项目1项、陕西省杰出青年科学基金1项、国家自然科学基金面上项目2项以及青年项目1项;与中电集团研究所、中科院计算所、Intel中国研究院等知名研究机构以及华为、中兴通讯等行业领军企业开展合作项目多项.主要研究方向包括网络交换技术、光互连、片上网络、软件定义网络、数据中心网络以及面向分布式AI应用的网络关键技术等.

E-mail: hxgu@xidian.edu.cn