

上海交通大学硕士学位论文

↑

(宋体小2号字)

上海交通大学硕士学位论文格式模板

↑

(黑体2号字)

冒号左侧用黑体
4

硕 士 研	□ □ □
究 生	
学 号	□ □ □ □ □ □ □
导 师	□ □ □ 教授
副 导 师	□ □ □ 教授
申 请 学	工学硕士
位	
学 科	电路与系统
所 在 单 位	微电子学院
答 辩 日 期	2010年1月
授 予 学 位 单 位	上海交通大学

Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University
for the Degree of Master



(Times New Roman 小 2 号字)

**DISSERTATION TEMPLATE FOR
MASTER DEGREE OF ENGINEERING IN
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY**



(Times New Roman 2 号字加粗, 题目太长时可用小 2 号字)

Candidate : □ □ □

Student ID: □ □ □ □ □ □ □ □ □ □

Supervisor : Prof. □ □ □

Assistant Supervisor: Prof.

Academic Degree Applied for : Master of Engineering

Speciality : Circuits and System
Affiliation : School of Microelectronics
Date of Defence : Jan, 2010
Degree-Conferring-Institution : Shanghai Jiao Tong University



(Times New Roman 4 号字)

上海交通大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文《~~XXX~~》，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成

果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

上海交通大学

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构递交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 在____年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月

日

上海交通大学硕士学位论文格式模板

摘要

摘要上方的论文题目：黑体 3 号字，段前段后 0.7 厘米，单倍行距。

摘要二字中间空一个：黑体 3 号字，段前段后 0 行，单倍行距。

摘要与内容之间空一行。

摘要内容宋体四号字，1.25 倍行距。

学位论文是研究生从事科研工作的成果的主要表现，它集中表明了作者在研究工作中获得的新的发明、理论或见解，是研究生申请硕士或博士学位的重要依据，也是科研领域中的重要文献资料和社会的宝贵财富能。

为了提高研究生学位论文的质量，做到学位论文在内容和格式上的规范化与统一化，特制作本模板。

中文摘要应该将学位论文的内容要点简短明了地表达出来，应该包含论文中的基本信息，体现科研工作的核心思想。摘要内容应涉及本项科研工作的目的和意义、研究方法、研究成果、结论及意义。注意突出学位论文中具有创新性的成果和新见解的部分。摘要中不宜使用公式、化学结构式、图表和非公知公用的符号和术语，不标注引用文献编号。硕士学位论文中文摘要字数为 500 字左右。

摘要内容与关键词之间空一行。

关键词（四号黑体）：3-5 个关键词，按外延由大到小排列，建议采用 EI 标准检索词，四号宋体。学位论文、论文格式、规范化、模板

**DISSERTATION TEMPLATE FOR MASTER
DEGREE OF ENGINEERING IN
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY**

ABSTRACT

英文题目三号居中，全大写，每行左右两边至少留五个字符空格，Times New Roman 加粗，段前段后 0.7 厘米。

“ABSTRACT” 三号居中，Times New Roman 加粗，段前段后 0 厘米。

ABSTRACT 与摘要内容之间空一行。

摘要内容每段开头留四个字符空格，Times New Roman，四号字，1.25 倍行距。

Shanghai Jiao Tong University (SJTU) is a key university in China. SJTU was founded in 1896. It is one of the oldest universities in China. The University has nurtured large numbers of outstanding figures include JIANG Zemin, DING Guangen, QIAN Xuesen, Wu Wenjun, WANG An, etc.

SJTU has beautiful campuses, Bao Zhaolong Library, Various laboratories. It has been actively involved in international academic exchange programs. It is the center of CERNET in east China region, through computer networks, SJTU has faster and closer connection with the world.

摘要内容与关键字之间空两行。

KEY WORDS: SJTU, key university, outstanding figure, beautiful campus

目 录

↑

(黑体 3 号字, 段前 0.7 厘米, 段后 0 ; 目录题目与条目之间空两行)

上海交通大学硕士学位论文格式模板	I
摘 要	I
ABSTRACT	II

图 录



(黑体 3 号字, 段前 0.7 厘米, 段后 0 ; 目录题目与条目之间空两行)

未找到图形项目表。

这是一个自动目录。若要使用它, 请对进入目录的文本应用标题样式(“开始”选项卡上), 然后更新此目录。

如果您想要键入自己的条目, 请使用手动目录(与手动目录位于相同菜单中)。

第一章 绪论

1.1 引言

片上的多处理器系统通过高效地低频率的并行计算，已经成为嵌入式系统或者高性能计算系统中的主要平台。最好的片上多处理器系统往往都由成百上千个处理核组成。在最近的十年时间里，片上网络系统已经被广泛的应用到片上的通信系统中。随着片上核心数的增加，相对于传统的总线或者 ad-hoc 的网络系统，片上网络拥有更好的可拓展性[8]。然而由于电网络系统中存在高频噪声和寄生电容的影响，所以传统的片上电网络的功耗和带宽密度收到了限制，这也是制约片上网络发展的主要瓶颈。

对比传统的电网络连接，基于硅光器件的光互连可以显著的增加带宽密度，降低功耗和传输延迟。片上光网络主要由硅光基础开关原件和波导组成，它给片上网络通信提供了一种新的介质选项[9]。考虑到电网络在本地通信和控制通信上有着很高的效率，片上光网络会在电互联系统中对其进行控制和配置。三维的集成技术为基于电控制的片上光网络系统的实现提供了支持。[9]中Shacham等人实现了一种电路交换的片上光网络，2008 年基于 Crossbar 结构实现的片上光网络结构被提出，该网络在消耗大量硅光器件的基础上实现了高通信量[10]。

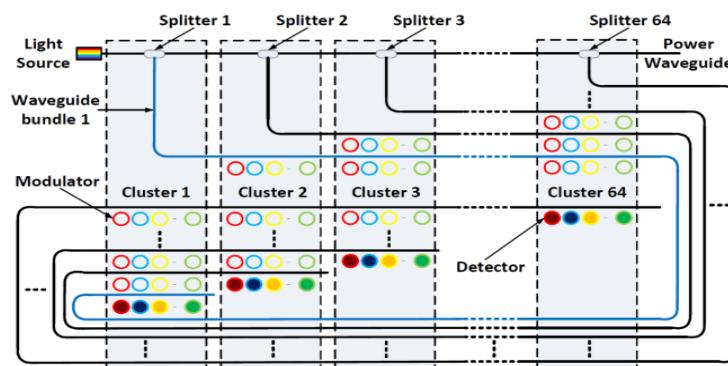


图 1-1-1 Corona 片上光网络结构[10]

Fig. 1.1.1 Corona: an optical NoC [10]

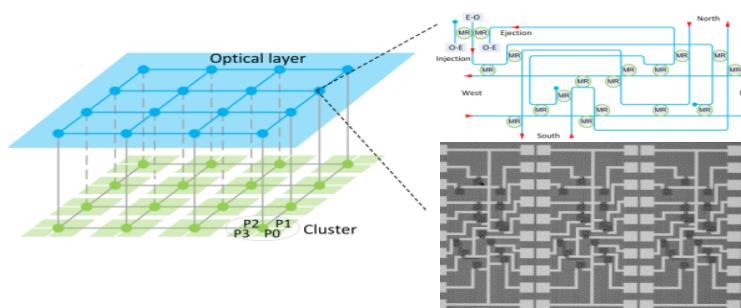


图 1-1-2 一种混合片上光电网络结构[11]

Fig. 1.1.1 A hierarchical hybrid optical-electronic NoC [11]

2010 年 Mo 等人提出了一种 Mesh 结构片上光网络，该结构使用电网络进行本地信号传输，使用电路通信进行全局的光传输[11]。2015 年 Werner 等人提出了一种全光的基于 mesh 架构的片上光网络，并实现了配套的路由算法[12]。

然而，由于硅光器件存在着热光效应的问题，对于片上光网络来讲，最大的挑战就是光器件的热敏感性问题，这可能会抵消光器件在功耗上相对于电器件的优势[13]。由于片上功耗的不平衡分布以及封装材料热导性的限制，片上的温度分布会产生波动。由于热光效应的，光基础开关元件微环谐振腔的谐振波长会随着温度的变化而产生变化。对于片上光网络的热效应问题的一个调查显示，热效应导致的激光器的发射波长和谐振腔的偏振波长之间的不匹配会导致严重的光损耗，因此会导致引起严重的功耗问题[13]。

为了解决热敏感性问题，不同层级的方案相继被提出来。器件级有通过 thermal tuning 技术和低热敏感性的器件来缓解微环谐振腔发生的波长偏移的现象的。此外系统级也有通过基于热敏感性的信噪比建模方法来克服片上光网络热敏感性问题的方案。

本文的工作为片上光网络功耗优化方法的研究，由于片上光网络功耗分布不均匀的问题，导致片上温度的动态变化。由于片上光网络存在不同的结构，大多数由 Mesh 或者 Torus 网络构成。每一对起始终点对，都存在多个可选的光路径，这样就可以通过网络级的路由算法，缓解片上温度分布不均匀导致的功耗急剧增加的情况。同时，对于热敏感性优化方法来说，仿真系统必须能够感应环境中温度的变化过程。我们需要搭建一个路由-温度协同仿真平台来验证热敏感性优化方法的效果，路由优化方法对于降低功耗方面的作用。

1.2 相关研究现状

在片上光网络的研究工作中，光学装置的热敏感性问题已经有过比较广泛的讨论。对于基于硅工艺的微环谐振腔来说，受温度影响的波长偏移达到了 50–100pm/K，这在实际环境中是不可忽略的[aehr-Jones et al. 2005; Padgaonkar and Arbor 2004; Dumon et al. 2006]。此外，对于 VCSEL(Vertical cavity surface emitting laser)的热敏感性的研究表明，其受温度影响的波长偏移和微环谐振腔是一个量级的，甚至会更加严重[Michalzik and Ebeling ; Mogg et al. 2004]。进一步来说，VCSEL 的发射波长和峰值增益下的谐振波长之间的不匹配会随着温度升高而变得更加严重，这样在高温环境下，导致 VCSEL 的功率损失严重[Syrbu et al. 2008]。对于基于 Ge 工艺的光电探测器，研究表明其对温度的变化不敏感，光学特性在高温时，没有明显变化。

为了解决硅工艺的微环谐振腔在高温下谐振波长偏移的问题，一些设备级的热兼容性方案被提了出来。本地加热器进行 thermal-tuning 是可选方案之一，

[Gan et al. 2007; Geng et al. 2009]。其确定是加强速度比较慢并且功率损耗比较大。另一个方案是使用热敏感更低的材料生产微环谐振腔。[Lee et al. 2007; Raghunathan et al. 2010]中，其使用了合适的材料作为 MR 的上表层，达到了更低的温度敏感性甚至是温度不敏感的。但对于 CMOS 工艺的 MR 来说，依然会面临热兼容性问题。

从系统级层面来看，为了降低温度分布不均匀的问题，实时热管理技术和 D-VFS(dynamic voltage and frequency scaling)已经被提出来[Li et al. 2010; Zhang et al. 2014]。由于热管理技术的性能限制，设备级的热兼容技术依然是需要的。在[Ye et al. 2012]工作中，作者系统性提出了片上光网络的热模型并且提出了几项低热敏感性的技术。在[Li et al. 2015a]的工作中，作者基于稳定状态热分析和信噪比分析，提出一种面向热敏感性的设计片上光网络中 VCSELs 分布的方法。

从网络层级的角度来看，适应性路由已经被应用到片上光网络的路由工作中。适应性路由可以根据网络状况动态路由。在[Xiang et al. 2013]中，作者提出了一种容错且 deadlock-free 的路由算法。该路由算法可以提高片上光网络整体的稳定性，降低光互联器件受温度波动和制造工艺不稳定的影响。此外，一种利用 node-reuse 技术实现的动态路由算法可以容忍片上光网络中 MR 信号错误，这可以有效的提升包传输的延迟性能和降低信噪比[Guo et al. 2015]。在[Yang and Ampadu 2016]的工作中，作者提出了一种面向热敏感性的容错路由结构。该路由结构采用动态路由的方法解决片上温度分布不均匀的问题。在[Asadi et al. 2016]中，作者提出将 turn-model 动态路由算法引入到片上光网络的结构中，用来优化光网络中光损耗问题。实验证明，相对确定性路由，动态性路由可以有效的降低光损耗，对于不同的动态路由算法，可选路径越多，优化效果越好。

1.3 本文研究内容及安排

本文聚焦于片上光网络的功耗优化方法研究。通过完善片上光网络的功耗模型，提升片上光网络仿真器的仿真性能，提出系统级的功耗优化方案来解决片上光网络的功耗问题，具体研究内容如下：

第二章：首先介绍了片上光网络的基本组成结构，包括光基本开关原件，光路由结构和光网络结构；然后介绍了片上光网络的热敏感性模型，详细说明了光网络结构中各个期间的热敏感性模型；最后介绍了光网络模型中常用的路由算法，包括确定性的路由和适应性的路由算法。

第三章：首先介绍了我们在器件级提出的功耗优化方案，然后介绍了我们在网络级提出的路由优化方案，并详细的介绍了基于学习方法的热敏感性优化方法。对所提出的路由算法做了详细的描述。

第四章：为了验证我们在热敏感环境下的优化方案，必须建立一个路由-温度协同仿真环境。首先，我们详细介绍了我们提出的路由算法在仿真器中的具体实现，然后我们详细的介绍了路由-温度协同的片上光网络仿真平台的主要结构。

第五章：为了验证优化方案的优化效果，设计和实现了不同的实验。首先介绍了片上光网络的具体结构和参数配置，然后我们做了实验一，路由算法收敛性实验，详细介绍了实验方法，实验数据和实验结论，最后我们进行了实验二，路由算法性能实验，并介绍了实验结果和实验数据。

第六章：对全文的研究内容和研究结论做了总结和归纳，并对之后工作和研究方向做了展望和规划。

第二章 片上光网络

1.1 光基本开关单元

片上系统的多处理器结构(MPSoC, Multiprocessor system-on-chip)已经成为了提升系统性能和降低功耗的重要方式,其可以将并行的将处理任务分配到大量的逻辑处理单元上。随着技术的发展和IP(Intellectual Property)数量的快速增长,传统的片上通信架构已经不再适合这样的系统。因为传统的片上通信系统受到了带宽、扩展性和功率消耗等方面的限制。为了去解决这方面的问题,片上网络被引入进来,进而解决片上的通信方面的问题,首先我们可以通过将互相见通信较为频繁的IP核放到更近的地方的方法,降低网络中远程通信的通信量,降低通信压力。

International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)表示片上本地时钟的速率在2010年会达到73GHz,在片上系统的多处理器结构中,带宽、系统连接间的高功率消耗将会成为系统的瓶颈。而片上光网络正好具有低延迟、高带宽和低消耗的特点。片上光网络由光路由器,光波导和IP处理核组成。微环谐振腔作为主要的光基本单元被应用在光路由器之中,起到开关函数的功能。几项关于使用波导和微环谐振腔作为基础元件的片上光网络的工作已经发表出来。Shacham等人提出了一种片上光网络系统,这种系统用光网络来做大数据量的传输,使用电网络来传输控制数据包和小的数据包[7-11]。Corona是一种新的片上光网络架构,它使用了纯光网络结构[7-12]。Batten等人另外一种光网络结构,他提出一种在全局的Crossbar的网络拓扑结构下,将网络中的节点通过Mesh光网络结构[7-13],其光通路被用来做高数据量的通信,电网络被用来本地开关控制。

1.1.1 光基本开关单元

光基本开关单元通过改变微环谐振腔的谐振波长控制光信号的传输通路。通过不同的微环谐振腔的组合可以形成不同的路由控制结构。所有的光路由器原件都是由两种基本的 1×2 开关单元组成,如图中所示,包括平行开关单元和交叉基础单元。两个基础开关单元都是由一个微环谐振腔和2段波导组成。当微波谐振腔处于打开状态时,其对应一个打开状态谐振波长 λ_{on} ,波长为 λ_{on} 光信号会被谐振进微波的谐振腔中并导出到drop端口。当微环谐振腔处于关闭状态时,波长为 λ_{on} 光信号将直接从through端口导出。不同的多进多出路由单元可以通过配置该基本开关而实现。

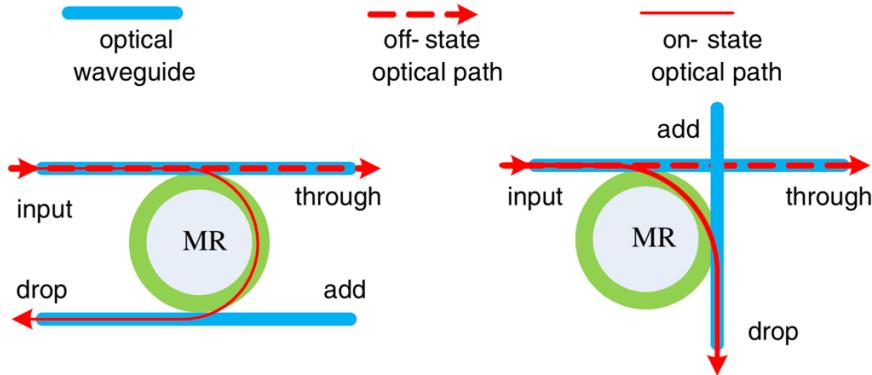


图 2-1-1 水平开关单元

Fig.2-1-1 parallel switching element

图 2.1.2 交叉开关单元

Fig.2-1-2 crossing switching element

1.1.2 光路由结构

片上光网络是基于片上光路由器和光互联的网络结构。光路由结构是一个重要的组成结构，其实现了路由和流控制的功能。本文中，我们主要使用了 Cygnus，其是在[2-14]中首次被提出。Cygnus 是一个严格的非阻塞 5×5 光路由器，主要用来实现 Mesh 或者 Torus 网络结构。每个 Cygnus 路由都有 5 对双向的路由，包括 injection/ejection、north、south、west 和 east 端口。每一对 injection/ejection 端口都可以通过光电转换接口和功能单元之间连接起来。功能单元可以是处理器或存储控制器。如图中所示，Cygnus 路由结构主要有光基本开关单元和电控制单元组成。

正如上一节的描述，光基础开关单元控制光信号从输入端口到对应的输出端口。Cygnus 优化了波导的交叉数量和功率消耗。其充分的利用 through 端口去尽量减少在微环谐振腔环中的功率消耗。如果光信号是在 east 和 west 端口之间或者在 south 和 north 端口之间传输，没有微环谐振腔会处于打开状态。当光信号必须要转弯或者使用到 injection/ejection 端口时，也只有一个微环谐振腔处于打开状态。

电控制单元使用传统的 CMOS 工艺实现。其使用电信号通过开关不同的微环谐振腔去配置光路由器。每一个电控制单元也都有 5 个对应的端口。

1.1.3 光网络结构

我们的片上光网络结构中，有两层重叠的网络结构，包括数据传输光网络和一个控制电网络。数据传输光网络是由 Cygnus 光路由结构之间通过光互联组成。而控制电网络是一个将 Cygnus 控制单元通过金属导线连接起来的网络。我们通过将两层网络通过物理隔离放到 3D 芯片的不同层中，然后通过 TSV 连线将对应

的单元连接起来。此外，控制信息和数据信息被分离为路由控制包和数据包，路由控制包通过电网络传输，以实现控制光路径的预定。数据包通过光网络实现快速传输。

拓扑结构决定了网络中节点的连接方式。在多步传输的拓扑结构中，数据包需要经过中间节点的转发到目标节点。在片上网络结构中，主要的拓扑结构包括 Mesh 结构和 Torus 结构。图 2-3-1 描述了一个 4x4Mesh 结构的 3D 片上光网络。该网络是一个基于 TSV 技术实现的两层 3D 芯片结构。光层网络集成了一个数据传输光网络，该网络将所有的 Cygnus 路由结构通过光互联材料连接起来。电层网络包含了 Cygnus 路由控制单元连接起来的网络。同时，每个路由控制单元都和一个功能单元之间相连。功能单元同时也通过 E0/OE 接口和对应的光基础开关单元连接。我们使用 1-bit 宽的双向光连接用于数据传输光网络，同时使用 32-bit 宽的金属数据链路用于传输路由控制信息。

1.2 片上光网络的热效应

多核系统的性能，例如片上光网络上的多核系统，不仅由单独分离的核决定，也有核与核之间的通信和连接的效率决定。对于片上光网络来说，就是多核之间建立光通路的效率。在硬件的层面，通信网络的结构决定了通信的效率。片上光网络作为正在出现的通信架构，其可以提供超高的通信带宽和在多核系统中提供低延迟的性能。对于片上光网络自身来讲，光器件的热敏感性是不能避免的话题。由于光敏感性直接影响了光器件的相关物理性质，导致在环境温度发生变化的时候，功耗性能会发生较大的变化。

本章系统性对片上光网络的热效应进行了建模，并对相应的影响做了量化的分析。本章会分别介绍光发射器、光路由单元、光接收器和光波导的热模型，最后我们介绍了基于片上光网络热效应模型建立的热光效应仿真平台。该平台系统级的仿真了片上光网络上热光效应下不同情况的功耗情况。

1.2.1 光发射机的热敏感性

光发射器通过调制 VCSEL 的驱动电流将电信号转化为光信号。基于近年的快速发展，VCSELs 被应用到很多的片上光网络系统中。VCSELs 对于温度参数特别的敏感。正如公式(1)的描述，发射波长是由腔共振导致的，这里的 n 代表谐振腔的平均反射系数， l_{vcSEL} 是谐振腔内腔的长度， m 是谐振腔的共振序。VCSELs 发射波长受温度影响程度的主要决定因数是 n ，这个参数由材料的 Bragg 系数和内腔来决定。

对于发射波长在 800–1000nm 范围内的 VCSELs 来说，每度的温度变化，会导致 0.07nm 的波长的偏移，最大的偏移范围会达到 0.32nm 每度。对于一个 1330nm 的 VCSEL 的研究也显示了相似的实验结果[1, 19]。随着温度变化的 VCSELs 门槛

电流 I_{th} 遵循公式(2)描述的规律, 这里 alpha 是最小的驱动电流, β 是与增益性质有关的系数, T_{th} 是当谐振腔波长对齐最高增益时的温度。

$$I_{th} = \alpha + \beta(T - T_{th})^2$$

如果驱动电流高于了阈值电流, 光发射器输出的功率会随着驱动电流线性增长。

1.2.2 光路由单元的热敏感性

每一条光发射器和光接收器之间的光通路, 是由很多的光路由单元组成。光路由装置将光信号路由到不同的波导直到抵达目标单元。图 1-1 中, 我们使用了一个简化的微环模型展现了其路由功能。微环的峰值谐振波长 λ_{MR} 符合公式(1-4), l_{MR} 是微环的单圈的周长, m_{MR} 是一个表征这个微环的等级常量, n_{eff} 是波导在微环中的反射系数。

$$l_{MR} \cdot n_{eff} = m_{MR} \cdot \lambda_{MR}$$

l_{MR} 和 m_{MR} 均是常量, 所以谐振波长 λ_{MR} 正比于 n_{eff} 。因为 n_{eff} 随着温度而变化, 谐振波长也就随着温度而变化。理论分析和实验结果都验证了温度的变化和谐振波长的偏移之间存在着线性的关系。这个线性关系可以用公式(1-5)来表示, ρ_{MR} 被定义为微环谐振波长的温度相关偏移量, λ_{MR_0} 是在初始温度时的谐振波长, σ_{eff} 是与反射系数相关的热光系数, n_g 是波导的群折射率。实验结果表明微环每度的温度变化下会发生 50pm 的谐振波长的偏移 [1-22]。

$$\rho_{MR} = \frac{\lambda_{MR_0}}{n_g} \cdot \sigma_{eff}$$

在任何制造工艺下的谐振腔下, 光损耗是始终存在的。与完美状况下的偏差程度被定义为质量系数 Q, 其与波导在内腔中的传输时间成正比。环状微波谐振腔的质量系数的定义如(1-6)所示, λ_{MR} 指谐振腔的谐振波长, 2δ 是 drop-port 端口输出 3dB 功率对应的频带宽度, k_e^2 指输入波导和谐振环之间功率传输的摩擦系数, k_d^2 指输出波导和谐振环之间功率传输的摩擦系数, k_p^2 指环内的光损耗系数。在[1-24]中介绍了质量系数 Q 从 1500 到 100000 的微环谐振腔。

$$Q = \frac{\lambda_{MR}}{2\delta} = \frac{2\pi n_g l_{MR}}{\lambda_{MR}(k_e^2 + k_d^2 + k_p^2)}$$

微环谐振腔的功率传输函数是一个洛伦兹函数, 其峰值位于微环的谐振波长 λ_{MR} 。对于输入的波长为 λ_s , drop-out 端口的功率传输函数如公式(1-7-1)所示, through-out 端口的功率传输函数如公式(1-7-2)所示。当 $k_e^2 + k_d^2 \gg k_p^2$, 在峰值谐振点, 几乎所有的功率都会被传输到 drop-out 端口, 微环谐振腔只会产生很小的光损耗。物理实现表明一个微环谐振腔引入的光损耗可以降低到 0.5dB。

$$\frac{P_{drop}}{P_{in}} = \left(\frac{2k_e k_d}{k_e^2 + k_d^2 + k_p^2} \right)^2 \cdot \frac{\delta^2}{(\lambda_s - \lambda_{MR})^2 + \delta^2}$$

$$\frac{P_{through}}{P_{in}} = 1 - \frac{4k_e^2(k_d^2 + k_p^2)}{(k_e^2 + k_d^2 + k_p^2)^2} \cdot \frac{\delta^2}{(\lambda_s - \lambda_{MR})^2 + \delta^2}$$

根据公式(1-7),当入射波的波长与峰值谐振波长产生偏差时,会在 drop-out 端口造成很大的光损耗,特别是对高质量系数的微波谐振环来说。对于一个谐振波长在 1550nm 的微波谐振环,10°C 的温度变化会造成 0.5nm 的谐振波长的变化,进而会对其传输的光信号产生 16dB 的损耗。对于每条光连接来说,都会经过多阶的路由单元。随着经过多个路由单元,光信号强度会变得更加微弱。

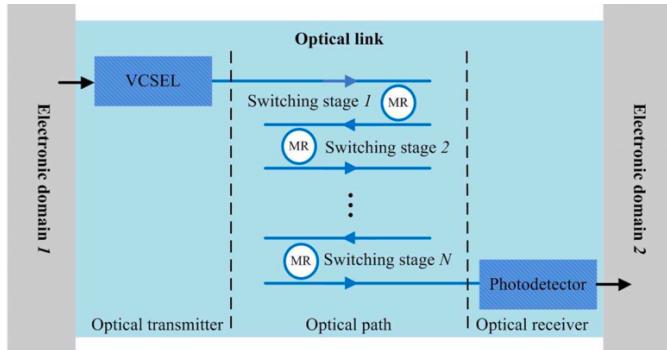


图 1-1 光通路连接的示意图

Fig.1-1 the optical link in ONoCs connecting two electronic domains

1.2.3 光接收器的热敏感性

光接收器使用光电探测器将光信号转化为电信号,以便于电信号域的处理器或存储器使用。因为Ge在红外波段附近具有较高的吸收系数并且在 COMS 制造过程具有较好的兼容性,大多数光电探测器都使用Ge作为吸收材料。通过将基于 Ge 工艺的光电探测器集成到高速 TIA-LA 电路中,一个 10Gbps 的光接收器在 BER(a bit error rate) 小于 10^{-12} 的条件下,可以达到 -14.2dBm 的敏感性。主要的关注点在于,当光电探测器处于高环境温度时,可能会产生较大的暗电流。研究表明,当温度从室温升高到 86°C,一个基于 $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ Ge-SOI 工艺的光电探测器产生的暗电流会从 20nA 增加到 192nA,但是接收器的敏感性没有明显的变化 [1-30, 31]。虽然光电接收器的暗电流会随着温度升高而升高,但是不会影响光电接收器的性能。基于以上的分析和观察,我们认为,光接收器的敏感性不会受环境温度变化的影响。

1.2.4 光波导的热模型

片上光网络通过使用光波导将光发射器,光路由单元和接受器连接起来形成完整的光通路。在外包氧化层(BOX, Buried Oxide)上覆盖一层硅基隔离层的

SOI(silicon-on-isolator) 硅基波导可以防止光波的泄露。由于热光效应的影响，波导的传播损耗和延迟都收到温度的影响。

波导的核心硅对能量的吸收是可以忽略不计的，传播损耗主要由侧壁的粗糙层度和撞击导致。在直线波导中的传播损耗可以用公式(1-4-1)来表示，其中 ϵ 是用来描述内壁的粗糙层度的参数， k_0 是空隙大小， β 指传输常量， h 指横向的传输常量， ϕ 指波导和外壁材料间的折射系数差。 $E_s^2 / \int E^2 dx$ 为波导中心归一化后的电场强度。

$$L_{WG} = \frac{4\epsilon^2 k_0^2 h}{\beta} \cdot \frac{E_s^2}{\int E^2 dx} \cdot \phi^2$$

正如公式(1-4-1)所示，波导的传输损耗和波导中心和外壁材料的折射系数差成正比。由于核心材料和外壁材料存在不同的热光系数(dn/dT)，传递系数会随着操作温度的变化而变化。假设波导上温度的分布符合从 T_0 到 $T_0 + \Delta T$ 的均匀分布，其对应的波导传输损耗如公式(1-4-2)所示，其中 L_{WG_0} 指室温 T_0 下的传播损耗， σ_c 和 σ_d 分别指外壁材料和波导中心材料的热光系数(dn/dT)。对于一个使用硅做中心材料使用二氧化硅作为外壁材料的波导，折射率差大约为 2。

$$L_{WG} = L_{WG_0} \cdot \left(1 + \frac{\sigma_c - \sigma_d}{\phi} \cdot \Delta T + \frac{(\sigma_c - \sigma_d)^2}{3\phi^2} \cdot (\Delta T)^2\right)$$

根据公式(1-4-2)所示，对于一个使用硅做中心材料使用二氧化硅作为外壁材料的波导，30°C温差会导致 0.22% 的传递损耗。相对于路由单元中的光损耗来讲，波导中的光损耗对于温度的敏感性要更小，产生的影响也要更小。

1.2.5 片上光网络的热敏感性

为了确保片上光网络的正常工作，一个必要条件是光接收器接收的光信号功率不能比接收器的敏感性要小。这个条件可以用公式(1-10)来描述， P_{TX} 是光发射器输入到链路中光信号的输出功率， L_{SW} 是链路中所有路由单元产生的光损耗， L_{WG} 是波导上产生的光损耗，而 S_{RX} 是光接收器的敏感度。

$$P_{TX} - L_{SW} - L_{WG} \geq S_{RX}$$

正如我们之前描述的一样，在高温度环境下，VCSELs 的输出功率会恶化。当 VCSELs 被驱动电流 I 驱动，该电流大于阈值电流小于输出功率会随电流升高而下降的电流节点时，我们可以通过公式(1-11)来表示 P_{TX} ，这里 $T_{VCSELs} \in [T_{min}, T_{max}]$ 为 VCSELs 的工作温度，其他参数在 1.1 节已做描述。

$$P_{TX} = (I - \alpha - \beta(T_{VCSEL} - T_{th})^2) \cdot (\varepsilon - \gamma \cdot T_{VCSEL})$$

环境温度的波动会造成 VCSELs 的发射波长和路由单元的谐振波长之间的不匹配。VCSELs 的发射波长会随着温度的变化发生线性的红移，如公式(1-

12) 的描述。 λ_{VCSEL_min} 为 VCSELs 在 T_{min} 时的发射波长, ρ_{VCSEL} 为 VCSEL 波长随温度变化的系数。

$$\lambda_{VCSEL} = \lambda_{VCSEL_min} + \rho_{VCSEL}(T_{VCSEL} - T_{min})$$

微环谐振腔的谐振波长也会随着温度的升高发生线性的红移。对于一个工作在 $T_{MR} \in [T_{min}, T_{max}]$ 的微环谐振腔来说, 谐振波长满足公式(1-13), 这里 λ_{MR_min} 为 T_{min} 时对应的谐振波长。

$$\lambda_{MR} = \lambda_{MR_min} + \rho_{MR}(T_{MR} - T_{min})$$

正如上一节所述, 通过将路由单元进行连接, 我们可以组成如图 2 所示多进多出的路由单元。路由单元的光损耗主要由 drop-out 端口损耗, through-out 端口损耗, 光链路交叉点光损耗组成。一个多进多出的光路由器的光损耗满足公式 (hello-1), L_{ij} 是光信号从端口 i 输入从端口输出时产生的光损耗, A_{ij} 是光信号光信号从端口 i 输入从端口 j 输出时经过的 drop-out 端口的数量, L_{drop} 是 drop 端口光损耗的 dB 比值, P_{ij} 指光信号从端口 i 输入从端口 j 输出时经过的 through-out 端口的数量, $L_{through}$ 指 through 端口光损耗的 dB 比值, C_{ij} 是指光信号从端口 i 输入从端口 j 输出时经过的波导交叉节点的数量, L_c 指单个交叉节点产生的光损耗。

$$L_{ij} = A_{ij} \cdot L_{drop} + P_{ij} \cdot L_{through} + C_{ij} \cdot L_c$$

当光源从 VCSEL 发射, 到光接收机接收光信号, 需要经过多阶的路由器单元, 根据不同的路由结构和不同的起始点和出发点决定。当一个光信号从节点 s 出发, 到达节点 d, 经过了 N 个路由器单元时, 其产生的光损耗 $L_{sw}(s, d)$ 满足公式 (hello-17)。

$$\begin{aligned} L_{sw}(s, d) &= \sum_{m=1}^N L_{ij}^m = \sum_{m=1}^N A_{ij}^m \cdot L_{drop}^m + P_{ij}^m \cdot L_{through}^m + C_{ij}^m \cdot L_c \\ &= \sum_{m=1}^N \left(A_{ij}^m \cdot 10 \log \left(\left(\frac{2k^2 + k_p^2}{2k^2} \right)^2 \cdot \frac{\delta^2 + (\lambda_{VCSEL} - \lambda_{MR}^m)^2}{\delta^2} \right) + P_{ij}^m \right. \\ &\quad \left. \cdot 10 \log \left(\frac{4k^2(k^2 + k_p^2)}{(2k^2 + k_p^2)^2} \cdot \frac{\delta^2}{(\lambda_{VCSEL} - \lambda_{MR}^m)^2 + \delta^2} \right) + C_{ij}^m \cdot L_c \right) \end{aligned}$$

基于以上的分析, 我们得到片上光网络的热功耗模型如公式(1-15)所示。其中最后一项 L_{WG} 表示在波导上的光损耗。由于 VCSEL 的入射波长和微环谐振腔的谐振波长都容易受到温度的影响, 这个热模型也显示芯片温度的突变会造成很大的光损耗, 为了保证充足的光信号达到光接收器, 更多的输入功率会被输入到光链路中。

$$\begin{aligned}
& 10 \log ((I - \alpha - \beta(T_{VCSEL} - T_{th})^2) \cdot (\varepsilon - \gamma \cdot T_{VCSEL})) \\
& - \sum_{m=1}^N \left(A_{ij}^m \cdot 10 \log \left(\left(\frac{2k^2 + k_p^2}{2k^2} \right)^2 \cdot \frac{\delta^2 + (\lambda_{VCSEL} - \lambda_{MR}^m)^2}{\delta^2} \right) + P_{ij}^m \right. \\
& \left. \cdot 10 \log \left(\frac{4k^2(k^2 + k_p^2)}{(2k^2 + k_p^2)^2} \cdot \frac{\delta^2}{(\lambda_{VCSEL} - \lambda_{MR}^m)^2 + \delta^2} \right) + C_{ij}^m \cdot L_c \right) - L_{WG} \\
& \geq S_{RX}
\end{aligned}$$

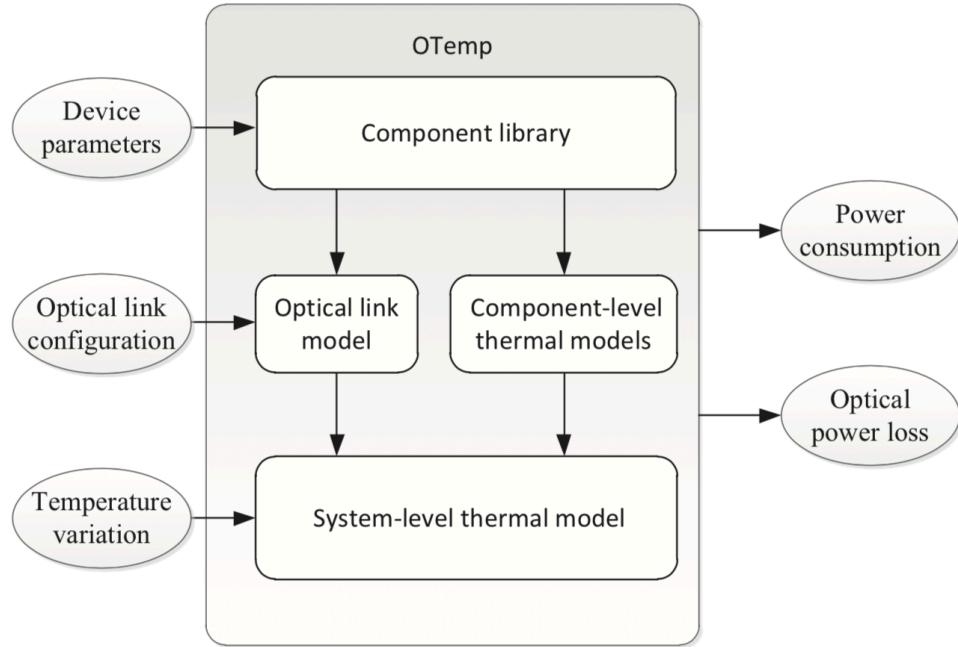
1.2.6 热光效应仿真平台

光连接(包括片上光连接和板上光网络)是一个发展出来的通信技术。在多处理器环境中，光连接技术可以提供超高的通信带宽和低延迟。在光互联技术中，热敏感性对于光器件来讲是一种自身特性和潜在被关注的特征点。片上温度会波动。片上的稳定温度分布在片上运行不同的工作内容时会产生不同的温度分布。由于热光效应的影响，温度变化可能会造成光网络功率消耗激增。为了充分理解热光效应对片上光网络功率消耗的影响，系统级的光连接的热模型是必须建立的。

为了仿真热光效应对片上光网络的影响，我们建立了热光效应仿真平台OTemp。OTemp 是一款用 C++ 开发的程序，其用来分析复杂温度分布条件下片上光网络的功率消耗和片上网络的光损耗。系统的输入包括光器件参数、光连接配置文件和温度的分布文件。OTemp 的组件库包括 BOSE (basic optical switching element)，BOME (basic optical modulation element)，和 BOFE (basic optical filter element) 等基础组件。在组件级，OTemp 建立了热效应模型，然后根据不同组件之间的连接关系建立系统级的热模型。这节我们，首先会介绍 OTemp 仿真平台的模型架构，接着会介绍该仿真平台的参数文件格式、配置文件格式和输出文件格式。

1.2.6.1 模型架构

OTemp 的模型架构如图 1-6-1 所示。装置参数元器件的基本参数和基本原件的库文件共同组成基础原件的功率消耗模型。光互联的配置文件构成了光互联模型。通过输入的原件参数和组件库组成完整的组件级的热敏感功耗模型；光互联配置信息作为输入建立光互联网络；根据网络互联关系和组件及的热敏感功耗模型，建立完整的系统级功耗模型，在不同的分布温度环境条件下，得到功耗输出和光损耗输出。



1.2.6.2 文件格式

本章按顺序列出了 OTemp 的三个相关文件格式。光器件参数格式、光连接配置文件和输出文件的格式。光器件参数格式列出了所有光器件的相关参数如表 2-1 所示。光连接的配置文件列出了对于多波段热分析的相关参数，如表 2-2 所示。输出文件主要显示了功率损耗和光损耗的情况，如表 2-3 所示。

表 2-1 光器件参数格式

Table 2-1 The parameters of optical device parameters

参数名称	详细信息
T_0	室温
lambda_VCSEL_0	VCSEL 室温下的发射波长，单位为 nm
row_VCSEL	VCSEL 的发射波长相对温度变化系数，单位 nm/degree
alpha	VCSEL 的最小阈值电流，单位 mA
beta	VCSEL 阈值电流相关系数
T_th	阈值电流最小时对应的温度
epsilon	VCSEL 在 0 度时的效率系数
gamma	与 epsilon 相关的系数
L_MR_resonance_peak	MR 在谐振时的射入损耗 单位 dB
row_MR	MR 的谐振波长相对温度变化系数，单位 nm/degree
fabrication_sigma	高斯分布的方差

P_MR_on	开启 MR 的平均功耗, 单位 mW
Modulation_speed	VCSEL 的传输速度, 单位 Gbps
S_RX	信号接收器的敏感度, 单位 dBm
L_propagate	波导传输损耗, 0.17dB/mm
L_crossing	波导交叉损耗, 0.12dB/crossing
link_length	光连接长度, 单位 mm
crossing_number	光通路中波导交叉的数量
E_serializer	信号系列化能量损耗, 单位 pJ/bit
E_driver	信号驱动能量损耗, 单位 pJ/bit
E_PD	激光探测器能量损耗, 单位 pJ/bit
E_deserializer	信号反序列化能量损耗, 单位 pJ/bit
E_TIA_LA	TIA-LA 器件能量损耗, 单位 pJ/bit
U_slope	VCSEL 的 U(V)-I(mA)关系的斜率
U_th	VCSEL 的 U(V)-I(mA)关系的截距
P_thermaltuning	thermal tuning 调节能量损耗率, 单位 mW/nm
lambda	激光波长, 单位 nm
elec_switch_off_on	电开关产生的蓝移长度, 单位 nm
thermal_switch_off_on	热效应开关产生的红移长度, 单位 nm
modulation_0_1	电调节器到
lambda_misplace_factor	misplace 区 0.46dB 的损耗
P_modulator_data_0	谐振器在无数据传输时的输出功率

表 2-2 光连接参数格式

Table 2-2 The configuration file for WDM-based thermal analysis

参数名称	详细信息
flag_OnChipVCSEL	“1”为片上 VCSEL, “0”片下 VCSEL
flag_BOME	“1”为使用 BOME 原件, “0” 使用 MR 原件
flag_guard_ring	“1”为使用保险环作为温度调节器
flag_lambda_MR_0	“0”为使用 MR 的默认设置, “1” 为使用优化设置
channel_spacing	WDM 通道空间, 单位 nm
M	WDM 波长数量

flag_switching	“1”使用电开关，“0” 使用热开关
N_active_BOSE	active 状态的元件数量
N_park_BOSE	parking 状态元件的数量
Q	谐振腔的质量系数

表 2-3 输出文件格式

Table 2-3 The format of the output file

参数名称	详细信息
E_default_w_thermal_average	在 thermal_tuning 条件下，平均能量损耗
E_default_o_thermal_average	无 thermal_tuning 条件下，平均能量损耗
E_optimal_w_thermal_average	使用 thermal_tuning 最优设置下，平均能量损耗
E_optimal_o_thermal_average	无 thermal_tuning 最优设置下，平均能量损耗

1.3 片上光网络路由算法

路由算法决定了包数据包从起点到终点的传输路径。高效的路由算法对整个系统的性能表现是十分重要的。片上光网络的路由算法按照路由的方式可以分为确定性路由和适应性路由。确定性路由是指，对于一对起始点对，分配的路由始终是一样的，代表性的算法有源路由和 XY 路由算法；适应性路由是指，对于任一起始点对，路由算法分配的路径会发生变化，代表算法有 DyXY 算法等。

1.3.1 XY 路由算法

XY 路由算法是一种维度有序的确定性路由算法。因为其简单有效，而被广泛的应用于 2D-Mesh 网络结构中。XY 算法首先将在 X 方向上路由，然后在 Y 方向上路由。图 3-1 描述了 XY 算法中的可转弯路径。两种转弯选项是不可选的，算法描述了这个路由算法的伪代码。

```

if at destination then // 抵达目的地
    arrive
else if destination is west then
    go WEST

```

```

else if destination is east then
    go EAST
else if destination is north then
    go NORTH
else if destination is south then
    go SOUTH
end if

```

1.3.2 West-First 路由算法

West-First 路由算法同样也是转弯模式算法。如果目的节点位于当前节点的西方向，包会首先向西方向路由，然后向北或者向南到达目的节点。如果目的节点不是位于当前节点的西方向，数据包可以任意的按照当前的位置的最小路径选项选择目标方向。图 3-2 描述 West-First 算法有效的转弯方向和无效的转弯方向。Algo2 描述了这个算法的伪代码。

```

if at destination then // 抵达目的节点
    arrive
else if destination in same column then
    if destination is north then
        go NORTH
    else
        go SOUTH
    end if
else if destination in same row then
    if destination is east then
        go EAST
    else
        go WEST

```

```

end if

else if destination is west then
    go WEST

else if destination is north then
    go NORTH or EAST // 既可以向北也可以向东

else if destination is south then
    go SOUTH or EAST // 既可以向南也可以向东

end if

```

1.3.3 Negative-First 路由算法

Negative-First 算法禁止了从正向方向到负向方向的转弯。正向方向是指东和南，负向方向是指北和西。图 3-3 展示了 Negative-First 算法允许的转弯方向。Algo3 展示了该算法的伪代码。使用这个算法路由的包，当目标节点位于北方向时，可以动态的选择北或者东方向。当目标节点位于南方向节点时，可以动态的选择南或者东方向。

```

if at destination then // 抵达目的节点
    arrive

else if destination in same column then
    if destination in same column then
        go NORTH

    else
        go SOUTH

    end if

else if destination in same row then
    if destination is east then
        go EAST

    else

```

```

go WEST

end if

else if destination is north east then

    go NORTH or EAST

else if destination is north west then

    go WEST

else if destination is south east then

    go SOUTH

else if destination is south west then

    go SOUTH or WEST

end if

```

1.3.4 Odd-Even 路由算法

Odd-Even 算法根据列的序号将列分为奇数列和偶数列。第一列的序号为 0 即为偶数列，第二列的序号为 2，即为奇数列，以此类推。Odd-Even 算法分别在奇数列和偶数列上禁止不同的转弯方向。在偶数列上，包被禁止做从西到南或者从西到北的转向。在奇数列上，包被禁止做从东到南或者从东到北的转向。

这个算法同样是 Deadlock free 的。如果要形成死锁，必须要形成环状的互相依赖的关系。也就是肯定存在最有方向的边。由于分别在奇数列和偶数列分别禁止了特定的最有边上可以存在的转弯方向，所以这里是沒有环状依赖形成的，也就不会形成死锁。

相对其他的适应性路由算法，Odd-Even 的适应性要更好。Algo4 描述了 Odd-Even 算法的伪代码。

```

Valid Directions =  $\emptyset$  // 可路由方向集合

if at destination then

    arrive

else if destination in same column then

    if destination is north then

```

```

    Set Valid Directions = (Valid Directions ∪ NORTH) // 添加北方
    向到可选方向集合

    else

        Set Valid Directions = (Valid Directions ∪ SOUTH)

        end if

    else if destination is east then

        if destination in same row then

            Set Valid Directions = (Valid Directions ∪ EAST)

        else

            if this column is odd then

                if destination is north then

                    Set Valid Directions = (Valid Directions ∪ NORTH)

                else

                    Set Valid Directions = (Valid Directions ∪ SOUTH)

                end if

            end if

            if destination is odd or more than one column away then

                Set Valid Directions = (Valid Directions ∪ EAST)

            end if

        end if

    end if

else

    Set Valid Directions = (Valid Directions ∪ WEST)

    if this column is even and destination is not in the same row then

        if destination is north then

            Set Valid Directions = (Valid Directions ∪ NORTH)

        else

```

```

    Set Valid Directions = (Valid Directions ∪ SOUTH)

    end if

    end if

end if

adaptively choose a direction from Valid Directions // 动态的选择可选
方向

```

1.3.5 Q-routing 路由算法

Q-routing 路由的主要目标是在网络中找到最佳的路由策略。Q-routing 中使用 Q-learning 算法去找到当前的路由的最佳策略。路由的最佳策略通过 Q-value 表示出来。Q-value 帮助路由器做出路由的选择。网络中的每个结点存储的 Q-value 代表了当前节点的网络状况。当路由到当前节点 x，路由控制单元通过 Q-value 的值的大小选择一个最佳的相邻节点作为路由目标，直到到达目标节点。

当前节点 x 需要发送数据包到目标节点 d，其相邻节点中的节点 y，节点 y 需要将其最优 Q 值回传给节点 x，如公式(3-3. 5)。这里的 $N(y)$ 表示 y 的相邻节点集合。

$$Q_y(z, d) = \min_{n \in N(y)} Q_y(n, d)$$

这里的 $Q_y(z, d)$ 表征了从 z 节点到目的节点的损耗。节点 y 会将本节点上的损耗累加。计算出 $Q_x(y, d)$ ，也就是表征 y 节点到目的节点的损耗。如公式(3-3-6)。其中 q_y 表示 y 节点上的损耗

$$Q_x(y, d) = Q_y(z, d) + q_y$$

节点 x 收到节点 y 反馈的 $Q_y(z, d)$ 值后，会更新本地 Q-table 中的 $Q_x(y, d)$ ，更新算法如下公式(3-3-7)。

$$Q_x(y, d)_{new} = Q_x(y, d)_{old} + \gamma \cdot (Q_y(z, d) + q_y - Q_x(y, d)_{old})$$

这里 γ 指 Q-value 的更新速率，其决定了新 Q 值更新旧值的速率。其范围在 0 和 1 之间，0 表明不会学习新的 Q 值，1 表明使用最新的 Q 值。

Q-routing 算法通过 Q-learning 算法更新每个节点中的 Q-table，路由选择中根据本地 Q-table 做最优路由的选择。

第三章 功耗优化方法

3.1 基于 thermal-tuning 的功耗优化方法

由于热光 tuning 技术可以大范围的调节光材料的光学系数，其已经被广泛的应用到光过滤系统中。片上光网络的系统需要使用一连串悬挂的微波谐振腔。由于普通的微环谐振腔缺少包裹层，使得其不具备自动调节微环光学性质的能力。这使得微环谐振腔装置成为了光学性质不稳定的器件，限制了其可用性。因此为了使微环谐振腔成为更加可靠稳定的光学组件，其光学特性必须变得更加稳定可靠。

通过探索热光效应，一些关于调节微环谐振腔光学性质的技术已经被提出来。例如通过使用 Peltier 元素样例芯片[5-6]或者在装置中注入一个激光器，将激光器光能转化为热能[5-3]。在[5]中，作者利用热光效应设计了一个电加热装置，实现了一种全集成的 tuning 个技术，该技术可以可控的调节片上的组件，将微环谐振腔比变为了一个主动可调节的器件。

通过主动的调节微环谐振腔的光学特性可以有效的缓解装置的热敏感性导致的功耗剧增的现象。在应用 thermal-tuning 技术时需要对装置进行一个初始设置。由于可靠的 thermal-tuning 技术只能通过点加热电路对光学器件的谐振波长进行红移，不能向相反的方向对谐振波长进行调节。如果微环谐振腔的谐振波长比入射光的波长小 $\Delta\lambda$ ，通过 thermal-tuning 技术可以将谐振波长红移至入射光的波长。注意微环谐振腔的谐振波长是周期的，周期有分离的两个谐振腔之间的空间间隔(FSR, Free Spectral range)决定，其大小在 10 几个纳米的量级。如果微环谐振腔的谐振波长比入射波长大 $\Delta\lambda$ ，为了去匹配入射波长，我们需要将微环谐振腔的谐振波长调节一段更长的距离 $FSR - \Delta\lambda$ 。为了去减少 thermal-tuning 导致的功率消耗，我们提出了一种初始装置设置的方法，该方法可以有效的减少 thermal-tuning 的调节距离，进而减少功率的消耗。

对于一个位于路径中的微环谐振腔来说，假定其工作在 T_{MR} 温度下，其谐振波长 λ_{MR} 满足公式(1-13)，这里 λ_{MR_0} 表示室温 T_0 时的谐振波长， ρ_{MR} 波长随温度变化的系数， T_{MR} 指当前环境温度。理论分析和实验数据都表明，谐振波长和环境温度之间存在线性关系。假定位于起始节点的激光源工作在 T_{VCSEL} 温度下，并且光源波长满足公式(1-12)。为了确保谐振波长始终都可以通过 thermal-tuning 技术红移匹配到入射波长，对应于室温下的初始微环谐振腔谐振波长 λ_{MR_0} 必须满足下列公式(5-1)的要求。这里我们假设片上温度的可变范围为 $[T_{MIN}, T_{MAX}]$ 。

$$\lambda_{MR_0} = \lambda_{VCSEL_0} + \rho_{VCSEL} \cdot (T_{MIN} - T_0) - \rho_{MR} \cdot (T_{MAX} - T_0)$$

根据我们的初始设定，微环谐振腔的谐振波长始终比光源的入射波长要小，因此 thermal-tuning 技术可以利用红移来将谐振波长和入射光源的波长匹配起来。调节距离满足公式(5-2)。

$$\Delta\lambda_{tuning} = \rho_{VCSEL} \cdot (T_{VCSEL} - T_{MIN}) + \rho_{MR} \cdot (T_{MAX} - T_{MR})$$

根据调节距离，我们可以估算出 thermal-tuning 所消耗的功耗，其满足公式(5-3)。

$$P_{tuning} = c \cdot \Delta\lambda_{tuning}$$

3.2 基于路由的功耗优化方法

路由算法可以被分为确定性路由和适应性路由。对于 Mesh 结构或者 Torus 网络结构来讲，传统的基于方向顺序的路由算法是一种确定性路由，对于同一起始终点对，其总是选择相同的路径。由于确定性路由的特性，其不能根据网络状况的变化，选择可靠的路径。与确定性路由不同，适应性路由可以根据网络状况的不同做出不同的路由决定。Q-routing 是一种基于 Q-learning 算法的适应性路由算法。基于 Q-routing 算法的片上网络结构中，网络中每个节点都保存一个 Q-table，该表存下了当前节点的 Q-value。Q-value 代表可选路径的质量或者是损耗(例如网络拥堵程度)。每个节点通过接受相邻节点发来的 Q-values 更新当前节点的状况，并利用 Q-tables 中值动态的做出路由决定。

在片上光网络中，片上温度分布的不均匀会导致很引起很严重的光损耗和功率消耗。我们提出了一种基于学习算法的动态路由算法来优化片上光网络的路由选择。实验结果也表明该算法可以有效的减少片上光网络上的能量消耗。

3.2.1 L-value

在传统的基于 Q-routing 的片上电网络中，Q-values 用来代表可选路径的延迟状况，Q-learning 算法也是用来降低网络的拥堵状况。其主要用来优化延迟情况。对于片上光网络上温度不平衡导致的功耗问题，我们专注于优化温度引起的功耗问题。在 Mesh 或者 Torus 网络结构中，存在一系列最短路径。这些路径被提供给路由选择算法。我们使用 Q-learning 算法得到网络和温度相关的功耗状况并且为每一对起始终点路径对找到最优的消耗能量最小的路径。

片上光网络的每一个节点都保存有一个 E-value，其保存 E-values。E-values 代表了可选路径的预估光损耗。每个节点都通过接受相邻节点发出的 E-values 包学习本地的网络状况。当一个节点接收到从相邻接点发出更新好的 E-values 值，该节点就会更新本地的 E-table 中对应的 E-values。对于一个从起始节点 s 发送到终点 d 的路由确定包来说，假定其路径去定包从节点 x 经过，当前在 y 节点，如图(5.2.1)所示。假定 $N(y)$ 是当前节点的可选下一跳可选方向的集合，我们定

义 $E_y(n, d)$ 为下一跳方向 $n \in N(y)$ 到终点 d 之间预估光损耗。如公式(1-12)所示，相邻节点 $z \in N(y)$ 是最小预估光损耗方向的下一跳节点，所以其所在方向被选为了下一跳的方向。

$$E_y(z, d) = \min_{n \in N(y)} E_y(n, d)$$

当节点 y 向下一节点 z 发送包时，节点 y 会向之前的节点 x 发送一个反馈的 E-values 包 $E_x(y, d)_{best}$ ，其是从节点 y 到终点 d 之间预估光损耗。如公式(1-13)所示， $E_x(y, d)_{best}$ 等于两项之和， $E_y(z, d)$ 代表了最小的下一条节点到目标节点之间的光损耗， e_y 代表了在节点上消耗的光损耗。

$$E_x(y, d)_{best} = E_y(z, d) + e_y$$

当节点 x 收到从节点 y 发出的最佳预估 E-value 值 $E_x(y, d)_{best}$ 后，其会跟新本地的 E-value。Q-learning 算法会按照公式(1-14)更新本地的 E-values，这里的 γ 代表了学习率，其决定了新的 E-value 覆盖旧 E-value 的速率。

$$E_x(y, d)_{new} = E_x(y, d)_{old} + \gamma \cdot (E_x(y, d)_{best} - E_x(y, d)_{old})$$

对于片上光网络的包传输，由于温度分布不均匀导致的功耗增加，主要是路径中光损耗的激增导致的。对于一个从起始节点 s 出发，当前在节点 i 的包来说，我们定义 $l(i)$ 为当前节点引入的光损耗。由于当前节点的光器件谐振波长对温度敏感，所以 $l(i)$ 也是对温度敏感的。当节点 x 和节点 y 是路径中两个分离的节点，我们定义 $L(x, y)$ 在此处键入公式。为节点 x 到节点 y 之间所产生的光损耗之和。我们可以将每一个从起始节点发送到终止节点的光损耗分为三个部分：(1) 从起始节点到节点 x 之间引入的光损耗 $L_y(s, x)$ ；(2) $l(y)$ 在 y 节点上引入的光损耗；(3) $L_y(z, d)$ ，从节点 z 到终点 d 之间引入的光损耗。所以整条路径的光损耗 $L(s, d)$ 如公式(6-6)所示。

$$L(s, d) = L_y(s, x) + l(y) + L_y(z, d)$$

3.2.2 L-table

Table 1 展示了一个 3x3 Mesh 网络结构中坐标为 (1, 1) 的节点 y 的 L-table 结构。L-table 由三列构成：状态空间列 (the state space)、指令空间列 (the action space) 和 L-value 列。状态空间列存储了当前节点的地址信息，目标节点信息。指令空间列存储了当前节点可选的下一跳的可选方向。对于基于 Mesh 或者 Torus 网络的片上光网络，存在下列可选的方向：left、right、up、down 和 local 方向。例如，在一个 3x3 的 Mesh 网络中，一个以 (0, 0) 作为起始节点的线路建立包需要传输数据到目标节点 (2, 2)，当该包当前位于坐标为 (1, 1) 的节点 y 时，其可选的下一跳接口包括下一跳节点为 (1, 2) 的 up 方向和下一跳节点为 (2,

1) 的 right 方向。L-value 存储了对应方向所决定的下一跳节点到终点的预估光损耗。路由通过对比不同可选方向对应 L-value 的值，选出最佳的路径。

3.2.3 路由算法

算法 1 阐述了基于学习方法的热敏感路由算法的路由选择的过程。对于一个从起始节点 s 发送到终止节点 d 的路由线路建立包 $p(s, d)$ ，假定其当前在节点 y ，路由单元首先根据最短路径方法获取可选的输出方向集合 $Set_{output-port}$ ，这保证了所建立的路径是最短路径，使得网络性能上有了保证。接着，最优选择函数会将可选输出方向集合 $Set_{output-port}$ 中具有最小预估光损耗的方向作为输出方向。算法 2 详细描述了最优选择函数的内容，如果集合 $Set_{output-port}$ 中只有一个元素，则该方向即为输出方向，如果集合 $Set_{output-port}$ 中有多个方向，则根据 L-table 中对应的预估光损耗选择输出方向。在当前节点选择好下一跳节点后，当前节点的路由单元会发送一个 L-value 包给上一跳路由节点。上一路由节点在收到相邻节点发送的 L-value 包后，根据收到包的方向更新本地的 L-table 中对应的 L-value。

第四章 温度-路由协同仿真平台

对于片上光网络上的对于温度敏感性路由算法的研究，一个温度路由协同仿真平台是必须的。传统的片上光网络仿真器都是首先获取温度分布，然后仿真在该温度下的温度敏感性路由。随着研究的发展，越来越多的仿真器采用了 Shang et al. [5]提出的温度-路由协同仿真的方法。对于片上光网络的路由仿真来说主要由路由网络模型、功耗模型和温度模型组成。在仿真过程中，片上光网络仿真器复制利用适应性路由在不同节点间数据。功耗模型基于不同的通信量和核运算状况得到不同节点上能量的消耗状况，这样可以产生功率跟踪文件 (power trace file)。温度仿真模型用获取到功率跟踪文件更新不同节点的温度分布。最后基于温度敏感性的确定性路由就可以根据更新好的路由做出适应性的路由选择。

本章提出了一个温度-路由协同仿真平台，下面分别介绍其三个主要的组成部分：片上光网络仿真结构、基于学习方法的路由仿真结构和协同仿真结构。

4.1 片上光网络仿真结构

片上光网络的仿真结构是一个基于 SystemC 开发的以时钟为基准的网络仿真器。主要的组成单元有：处理器结构、网络结构、路由结构。处理器结构的主要处理路由包的产生、发送、接受和处理。网络结构主要有光网络结构和电网络结构组成。在每两个核之间通过光网络传输数据包开始之前，一条光通路需要被预定和配置好。而配置光通路的线路建立数据包需要在电网络结构中传输。当光通路被预定和配置好之后，两个核之间才通过光通路传输数据。这样就可以在多路由之间实现无 Buffer 的高速光通信。在完成高速的数据通信之后，之前被预定和配置好的光通路会被释放，释放的过程中的通信也通过电网络中的通信完成。

4.2 基于学习方法的路由仿真结构

我们将基于学习方法的路由模型集成到了片上光网络的仿真器中。路由模型如图所示。

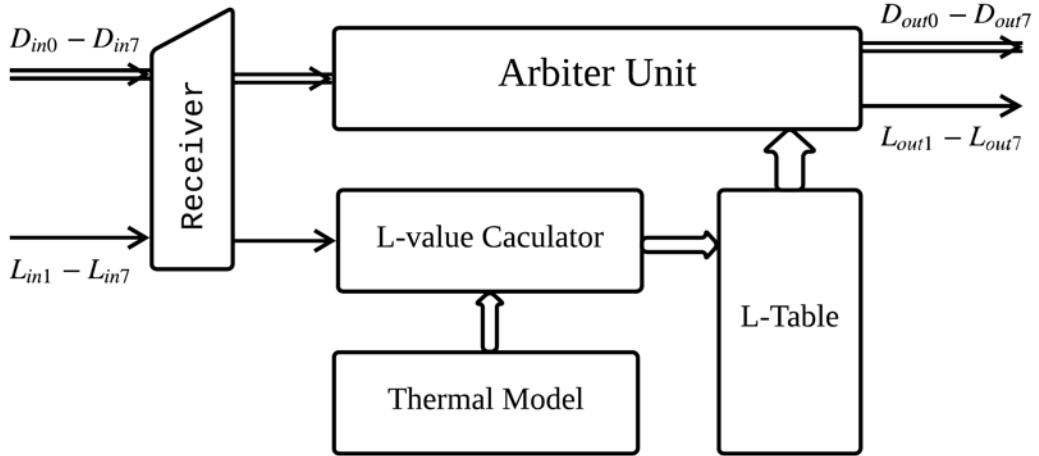


图 6-2-1 基于学习方法的路由结构

Receiver 是路由器的接收单元, D_{in} 接口负责数据信号的接收, L_{in} 接口负责 L-value 信号的接收。Arbiter Unit 指路由仲裁单元, 负责将包路由到下一跳的方向。Thermal Model 指热敏感的功耗计算模型。L-value Calculator 指 L-value 的计算单元, 其根据 Thermal Model 提供的功耗模型计算 L-value 的值。L-Table 为该节点存储的不同方向的光损耗信息。仲裁单元会依赖 L-Table 中的值做选择出路由方向, D_{out} 指数据信号输出端口, L_{out} 指 L-value 信号输出端口。当路由单元从相邻节点方向接收到 L-value 包后, L-value calculator 会基于输入的 L-value 和热敏感功耗模型计算出最优的 L-value 值。接下来, L-value Calculator 会按照 5.2 节提出的更新算法, 更新 L-Table 中对应的 L-value。当路由单元从相邻节点方向接收到数据包时, Arbiter Unit 会依据输入端口和 L-Table 中对应的值确定输出端口, 并且 Arbiter Unit 会同时发送 L-value 包到上一节点。

4.3 协同仿真结构

传统的仿真结构都是利用先产生好的功率跟踪文件 (power trace file) 计算出稳定的温度分布, 在该温度分布的条件下, 仿真片上光网络的多核之间的通信。传统的仿真方法的问题在于, 在网络仿真的过程中, 仿真器不能更新温度的分布。由此, 传统的仿真器是不能验证片上光网络中针对热敏感性的优化设计方法的。一个路由-温度协同仿真平台是更加适合验证热敏感性设计方法的结构。我们提出的路由-温度协同仿真平台的结构如图所示。图中 $\text{Power}(t_i, t_j)$ 是指 t_i 到 t_j 时间段所产生的功率跟踪文件, $T(t_i, t_j)$ 指 t_i 到 t_j 时间段所更新的最新温度。片上光网络仿真器会先运行一个间隔时间的多核之间的通信, 并将此间隔时间内产生的功率跟踪文件传递给温度仿真模型。其中的功率跟踪文件也是根据网络的功率模型和处理器的运行状况生成的。这里我们利用 Hotspot 作为温度仿真模型。HotSpot

是一个准确并且快速的温度仿真工具，已经被广泛的应用到硬件温度仿真的领域。HotSpot 根据功率跟踪文件和不同的片上的系统结构仿真得到最新的温度分布。整个协同仿真平台在光网络和温度仿真工具之间形成了一个循环。这样整个协同仿真平台可以在网络仿真期间更新最新的温度分布。这对于热敏感设计方法的研究是必须的。

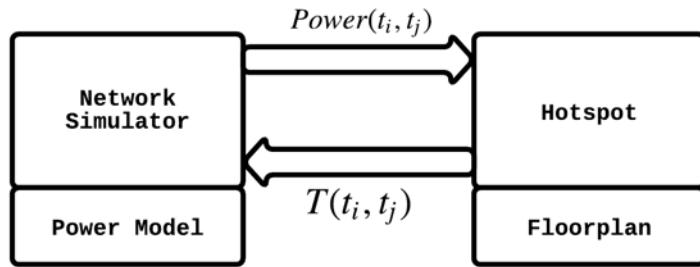


图 6-3-1 温度-路由协同仿真结构

4.4 本章小结

本章提出了一个路由-温度协同仿真平台。对于针对热敏感问题提出的优化方法，一个能够更新温度的仿真平台是必须的。这样才能验证优化方法对于温度变化环境的适应性。本章先介绍了仿真平台的基础片上光网络仿真结构，接着详细的介绍了基于学习方法的路由结构，该结构对基于学习方法的路由方法做了具体的仿真实现。最后重点介绍了路由-温度仿真的协同仿真架构，对网络仿真和温度仿真之间的信息通信做了详细的介绍。本章完整的阐述了片上光网络的路由-温度协同仿真环境。

第五章 仿真实验和结果

为了验证我们提出的基于学习方法的路由对片上光网络功耗问题的改善效果，我们搭建了完整的路由-温度协同仿真环境。在该实验环境下，我们设计了两个完整的实验方案。实验一，首先是为了验证提出的学习算法的整个收敛过程，其次其验证了再路由-温度协同仿真环境中，针对热敏感性的优化方法在温度条件发生变化情况下的适应能力。实验二中，我们对比了我们提出的基于学习方法的路由算法相对于其他适应性路由和确定性路由在不同仿真路由和不同温度分布条件下功耗情况和网络通信方面的性能。本章首先介绍了实验环境中仿真平台搭建和温度分布条件的生成，接着介绍了收敛实验的实验设置，数据和结论，最后详细的介绍了实验二片上光网络的性能和优化效果的实验设置，数据和结论，并且从功耗优化，通信性能的角度上对实验结果进行了对比。

5.1 实验环境建立

我们基于 System C 开发一个片上光网络的仿真器。该仿真器为一个时钟准确度的时序仿真器，并且集成了 Mesh 或 Torus 的网络结构。仿真器中，我们搭建了路由-温度协同仿真的结构。在网络仿真的过程中，温度仿真模块会动态的更新片上个结点的温度分布。仿真器的路由模块支持不同的路由算法，包括动态路由算法和静态路由算法，以及我们提出的基于学习方法的路由算法。

为了合理的评估提出的路由算法，我们使用了一系列具有代表性的合成通信模式，包括 uniform random、bit reverse、bit complement 和 transpose。由于在高负载的片上光网络中，建立光通路所耗费的时钟是非常宝贵的，所以为了增加网络通信的性能，数据包大小应该比传统电网络中的数据包要大一些。尽管如此，在片上光网络中，由于缺少虚拟通道(virtual channel)和数据 Buffer，太大的数据包可能导致网络堵塞。因此在我们的仿真环境中，我们将最大的数据包大小定位 10000bits，这是在链接效率和网络拥塞层度之间的一个折中方案。同样为了验证我们提出的算法在不同的应用路由条件下的性能，我们使用了一系列实际应用的路由，包括 FPPPP、H264DH、SAMPLE 和 SATELL。我们舍弃启动阶段的路由数据和结束阶段的路由数据，选取中间稳定路由时间段的数据作为实验结果。由于光通路中的光损耗是导致功耗增加的主要原因，光损耗也是我们学习方法的首要优化目标，这里的实验对比方案中，我们选择了平均每条通路的光损耗，每条通路归一化功耗作为对比对象。

我们仿真了一个 8x8 的 Mesh 网络结构，利用该网络结构产生了仿真温度所需要的功率跟踪文件。我们假设单核的运算速率为 1-GHz，使用 45-nm 的制程，

供电电压为 1.2V。整体芯片的大小为 10mm x 10mm, 单核的大小为 1.2mm x 1.2mm。为了评估优化方案在不同的温度分布条件下的优化效果, 我们仿真了不同的应用下产生的不同的温度分布场景。表 7-1 列出了不同温度分布的特性。图 7-1-1 展示了不同生成场景下的温度分布。

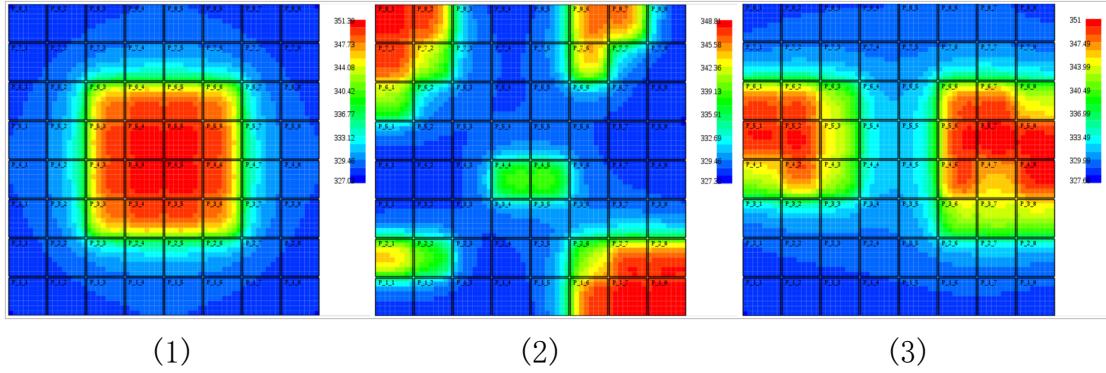


图 6-2-1 不同的温度分布, (1) 为 center block 温度分布,
(2) 为 Corner block 温度分布, (3) 为 Narrow btrait 温度分布

5.2 实验一：路由算法的收敛性实验

6.1 中本文详细的介绍了本文提出的基于学习方法的路由算法。为了验证该算法在热敏感环境下的收敛性能, 我们在上小节介绍的仿真平台下建立一个 8x8 的 Mesh 片上光网络。在该网络结构下, 我们使用提出的路由算法运行 uniform 模拟路由。同时, 在仿真运行期间, 第一阶段我们会将温度分布设置为 center block 温度分布状态, 在一定时间段之后, 转变温度分布到 corner block 状态。这样的实验设置可以测试两个方面, 首先可以测试基于学习方法的路由算法的收敛能力和节约功耗的能力, 第二个方面可以测试基于学习方法的路由算法在温度变化的环境中, 动态优化的能力。光基础开关元件的 3-dB 带宽设置为 1.24nm。图 7-2 展示了热敏感性下光损耗的收敛过程, 横坐标对应的是该线路按时先后顺序接收到的数据包, 纵坐标对应的是该数据包从起点到终点所产生的光损耗。从图中可以发现三组对比数据, 分别是, 起点为 0 号核终点为 63 号、起点为 0 号核终点为 47 号和起点为 0 号核终点为 31 号核的随着接受数据包过程中光损耗的收敛过程。对于每一个固定的起始终点节点对来讲, 光损耗情况会随着接收到的数据包的个数收敛, 直到收敛到最佳的路线情况, 对应最低的光损耗。对于起点为 0 号核终点为 63 号核的数据包来说, 其在 5 个数据包之后就在首个温度分布下收敛到最佳路径, 其最佳路径所对应的光损耗为 80dB, 当温度分布发生改变后, 路径对应的光损耗重新进入到收敛过程中, 在第二次中, 其在发送三个数

据包后收敛到最佳状态，其最佳路径对应的光损耗为 78dB。对于起点为 0 号核终点为 47 号核的数据包来说，其在接受 3 个数据包后收敛到最佳路径，其最佳路径对应的光损耗为 59.3dB。当温度分布发生改变后，路径对应的光损耗重新进入到收敛过程中，其第二次收敛同样发送了三个数据包，其最佳路径对应的光损耗为 67.3dB。对于距离最近的起点为 0 号核终点为 31 号核的情况来说，其同样是在接受三个数据包后收敛到最佳状态，其最佳路径对应的光损耗为 40.6dB，在温度分布发生变化之后，该数据同样重新的自动的发生收敛，第二次收敛其同样也只接受了三个数据包，其收敛到最佳路径对应的光损耗为 45.4dB。

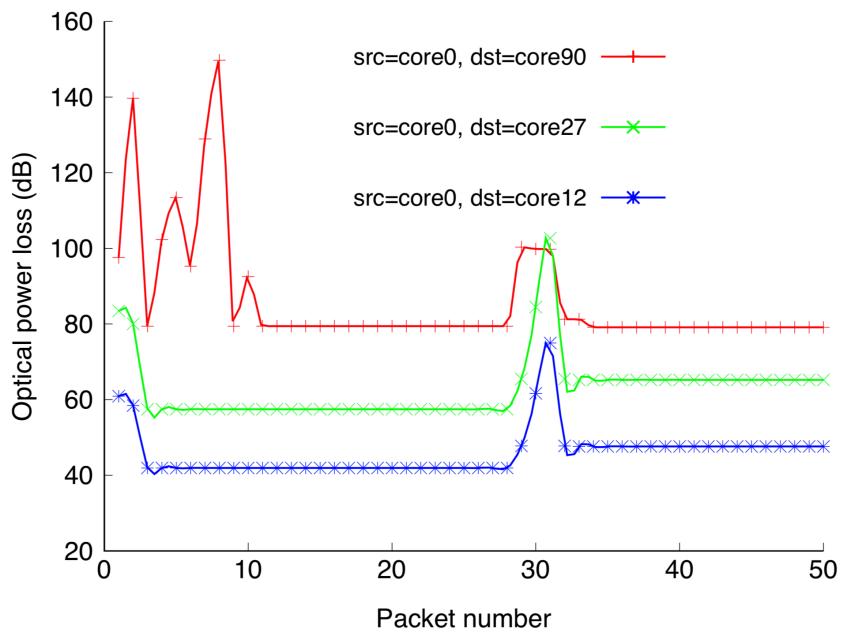


图 6-2-1 不同的温度分布，(1) 为 center block 温度分布，
(2) 为 Corner block 温度分布，(3) 为 Narrow btrait 温度分布

分析数据可以看出，从收敛的角度来看，单组数据都可以较好的收敛到最佳路径，并且在温度分布发生变化的时候，都可以自动的重新开始收敛，该结果验证了我们提出的基于学习方法的路由优化算法的收敛能力。对比三组数据之间的关系可以看出，路径光损耗的总量与路径的长度有关，随着路径长度的增加光损耗会随之增加，由于光损耗主要是有光基础开关原件产生，路径更长，经过的基础原件更多，损耗就会随之增加。从收敛速度的角度分析，路径更长时，由于空间中收敛的范围和参数格式更多，收敛的速度会随之减慢，收敛到最佳路径所需要的数据包个数会随之增多。对比三组数据，也验证了我们的理论，从收敛速度所需要的包的个数的数值来看，远比温度变化的时间长度要短，收敛过程中光损耗也占比较少，对整体优化效果影响不大。

5.3 实验二：路由算法性能实验

为了验证我们提出的基于学习方法的热敏感路由算法对于解决片上光网络热敏感问题的好处，我们设计了路由算法性能实验，从光损耗和功率消耗等角度分析了该算法对于缓解片上光网络的热敏感导致的功耗问题。第二个方面，从性能方面，我们应用性能的角度，对比了我们提出的路由算法同其他适应性路由算法和确定性路由算法的应用性能。本小节会先介绍我们实验方案上面的设计，然后介绍实验相关的数据结果，最后分析得出实验的结论。

5.3.1 实验方案

为了验证热敏感路由算法对于片上光网络系统性能的提升，我们开发了一个温度-路由协同仿真平台，该平台的详细信息见 6.2 节。这样我们可以实时的得到温度环境的变化。同样，在该仿真平台上，我们搭建了一个 8x8Mesh 结构的片上光网络。我们假设单核的运算速率为 1-GHz，使用 45-nm 的制程，供电电压为 1.2V。整体芯片的大小为 10mm x 10mm，单核的大小为 1.2mm x 1.2mm。温度分布方面，我们选择了很多不同的温度分布场景，见图。为了充分验证我们的路由算法对于不同的路由分配方案的效果，我们在不同的温度分布条件下，在几个仿真路由方案和几个实际路由方案下，对比了我们提出的路由算法和其他算法在光损耗和功率方面的仿真结果。对于光网络的功率消耗主要包括光基础开关元件上的功率消耗和光电转换开关上的功率消耗。我们将微环谐振腔的开关功耗设置为 $20\mu\text{W}$ [6-19]。由热敏感性引入的功率损耗如公式(6-3)所示，这里的 3-dB 带宽被设置为 1.24nm。VCSEL 设置为 off-chip 的片下状态，这样会减少其他状态对算法验证的影响。表 7-2-1 展示了主要光电转换器件的功率消耗。

表 7-2-1 光电转换器件的功率

Table 7-2-1 Energy Efficiency of O/E Interface

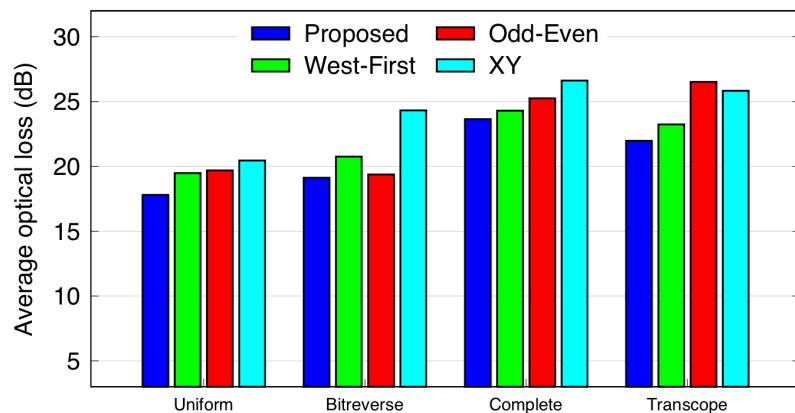
光电转换接口组件	功率(pJ/bit)
VCSEL driver[6-21]	0.1125
Photodetector[6-22]	0.0003
TIA-LA circuit[6-21]	0.3375
Serializer[6-23]	0.16
Deserializer[6-23]	0.128

5.3.2 实验数据

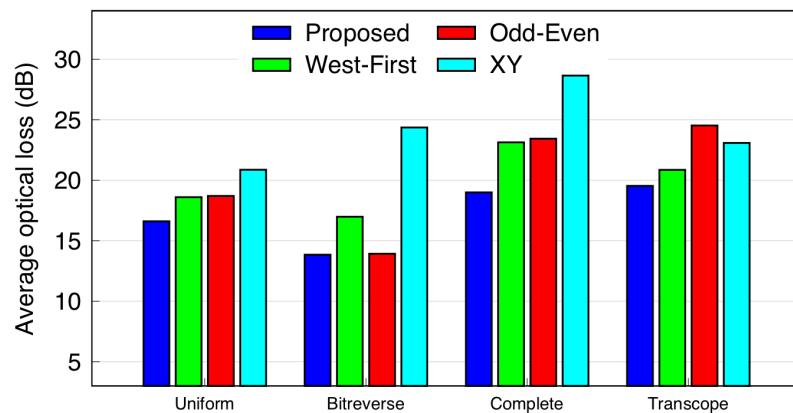
基于我们设置的仿真环境，我们在仿真路由方案 Uniform, Bit-reverse, Complete, Transcope 下，在如图 7-1 下的三种温度分布方案 center block、corner block 和 narrow strait 下，对比了我们提出的路由算法和其他动态路由算法及确定性路由在平均每个数据包光损耗方面的数据比较。

如图 7-3-1 所示，三张子图分别展示了不同路由方法在不同的温度分布下的光损耗。从在 Center Block 温度分布下的数据来看，在四种不同的仿真路由方式中，我们提出的路由方法的光损耗优化效果最好。在不同的路由方式下，相对确定性的路由可以优化 10%-20%。相对其他的适应性路由，平均光损耗也可以减少 5%-10%。在 Bit-Reverse 路由下优化效果最好。从 Corner Block 的温度分布的数据结果来看，同样最好的优化效果是 Bit-Reverse 路由方式下的数据，我们提出的路由算法可以优化 50%的光损耗，相对于确定性的 XY 路由。相对适应性路由来讲，可以降低 10%-20%的光损耗，优化效果更加的明显。从 Narrow Block 温度分布的数据来看，相对表现最差的 XY 路由来讲，可以平均可以优化 10%，在四种不同的路由方式条件下，我们提出的路由算法都是光损耗最佳的路由方式。整体的优化效果相对于另外两种温度分布，没有那么明显。

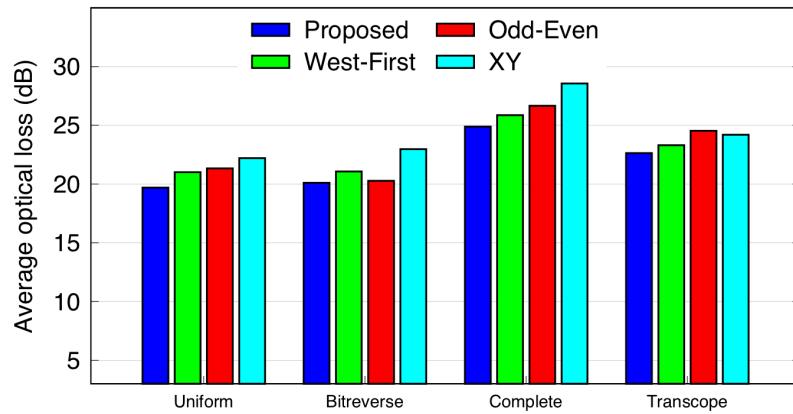
由于光损耗是片上光网络光器件功耗的主要因素，下面是不同的路由方式所产生的在不同的温度分布条件下功耗数据的表现。图 7-3-2 展示了不同的温度分布下，我们提出的路由算法同其他的适应性路由和确定性路由在功耗提升方面的对比结果。首先，在三个不同的温度分布的整体表现来看，我们提出的路由算法相对确定性的路由算法 XY 来讲，可以减少大部分的功耗，其他的适应性功耗在部分的温度分布条件下表现良好，但是在一些温度分布下的表现，比确定性路由 XY 要差。具体到三个不同的温度分布来看，在 Center block 温度分布条件下，我们提出的路由算法相对于确定性路由 XY 来讲，可以降低 30%-40%的功耗。在 Transcope 的路由方式下的提升效果最好，可以达到 43%。其他



(1)



(2)



(3)

图 7-3-1 仿真路由下，在不同温度分布下的平均光损耗，(1) 为 Center block，(2) 为 Corner block，(3) 为 Narrow Strait

Fig. 7-3-1 The average thermal-induced optical power loss under synthetic traffic patterns, with center block(1), corner block(2), Narrow strait (3) temperature distributions

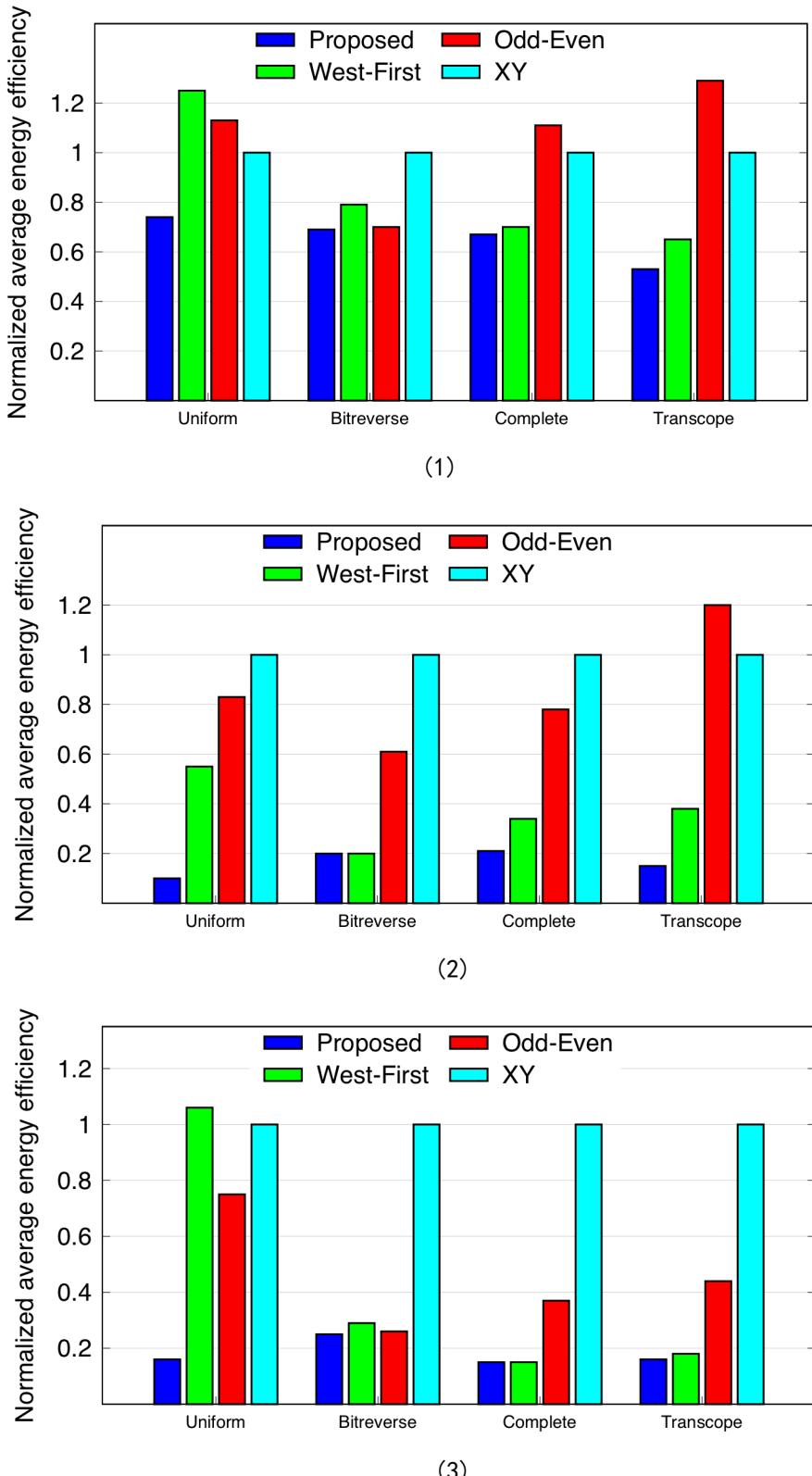


图 7-3-2 仿真路由下，在不同温度分布下的归一化平均功耗，(1) 为 Center block，(2) 为 Corner block，(3) 为 Narrow Strait

Fig. 7-3-2 The average thermal-induced optical energy efficiency under synthetic traffic patterns, with center block (1), corner block (2), Narrow strait (3) temperature distributions

路由在 Bit-Reverse 和 Complete 路由方式下的表现也较好，但是在 Odd-Even 路由算法在 Uniform 和 complete 路由方式下都比确定性路由 XY 的表现要差；从 Corner block 温度分布的数据来看，降低功耗的效果会更加的明显。相对于确定性路由 XY，我们提出的路由算法可以将功耗降低到 70%-80%，相对于其他的路由算法的优势也比较的明显。从数据来看，在 Corner block 的数据分布下，适应性路由算法的相对于确定性路由算法对于降低功耗来讲作用更加的明显。从 Narrow Block 温度分布的数据来看，我们提出的路由算法同样提升效果明显，在不同的路由方式下都可以将功耗降低 70%-80%，同样其他适应性路由算法的提升效果也比较的明显。只是 West-First 路由算法在 Uniform 路由方式下的表现比确定性路由 XY 的表现要差。

为了更加全面的验证我们的路由算法，我们同样在更加接近实际应用的路由方式的条件下去对比和其他路由的仿真结果，这里我们使用的实际应用路由包括 FPPPP、H264DH、SAMPLE 和 SATELL。同样我们对比了四种不同的路由算法在三种不同的温度分布条件下的对光损耗和功率降低方面的表现。

图 7-3-3 分别展示了在不同的温度分布条件下，不同的路由算法在四种不同的实际应用的路由状态下的光损耗降低的情况。从三张图的中体表现来看，我们提出的路由算法不仅相对于确定性路由 XY 有明显的提升，而且在相对于其他的动态路由算法也都有提升。分析三种不同温度分布下的数据情况，在 Center Block 温度分布条件下，相对于与确定性路由 XY 的表现来讲，光损耗平均可以降低 5%-15%，其中表现最好的是 H264DL，其可以降低光损耗到 15%，提升不明显的 SAMPLE 实际应用下，也可以达到 5%。在 Corner block 温度分布条件下，光损耗的提升效果更加的明显。平均状态下，相对于确定性路由 XY 来讲，我们提出的路由算法可以降低光损耗 5%-20%，其中在 H264DH 的实际应用路由中，提升效果最好，达到了 25%以上，相对其他的适应性路由算法，也有比较好的优势。从 Narrow strait 温度分布的数据来分析，整体降低功耗达到了 5%-20%，其中在 H264DH 和 SATELL 两种实际应用中都有比较明显的提升。整体来看，相对于确定性路由 XY，其他的动态路由算法的数据都要更好一些，其中最优的算法依然为我们提出的基于学习方法的路由算法。

跟仿真路由的分析方式一样，除了分析光损耗的提升的情况，我们也将实际应用下的不同情况下的功耗数据做出了对比。将三个不同的温度分下的数据放在一起分析来看，我们提出的基于学习方法的路由算法都是功率消耗最小的路由算法。部分的适应性路由算法在部分的路由状态下的功率消耗情况弱于确定性路由 XY。分别从不同的温度分布的角度来分析，在 Center block 温度分布的数据中，降低功耗最好的是 H264DH 状态下的路由，降低功耗的比例打到了 25%，其他的实际应用的路由方式提升层度也达到了 20%左右。其他的适应性路由算法相对于

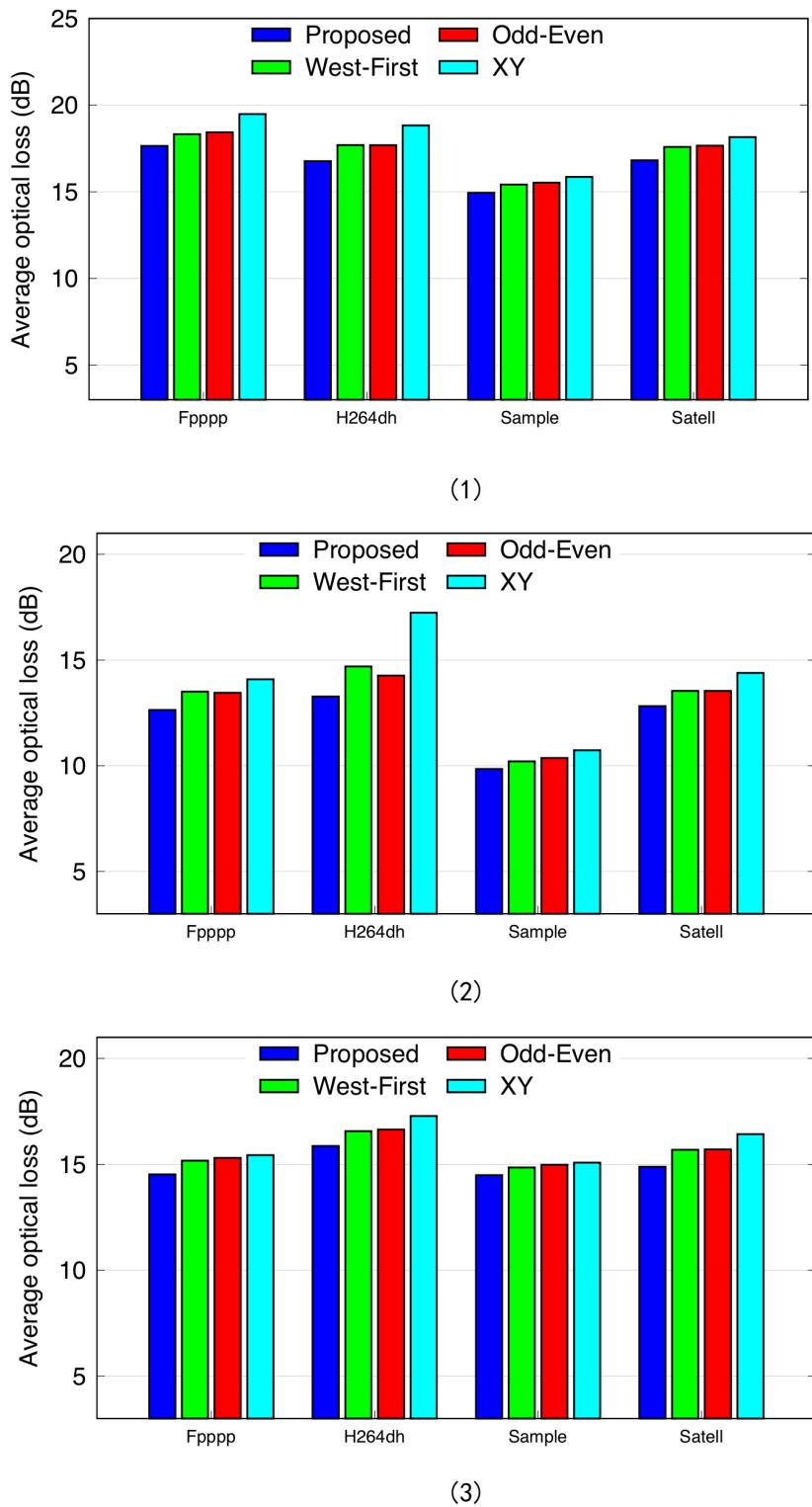


图 7-3-3 实际应用路由下，在不同温度分布下的平均光损耗，(1) 为 Center block，(2) 为 Corner block，(3) 为 Narrow Strait

Fig. 7-3-3 The average thermal-induced optical loss under real application, with center block(1), corner block(2), Narrow strait (3) temperature distributions

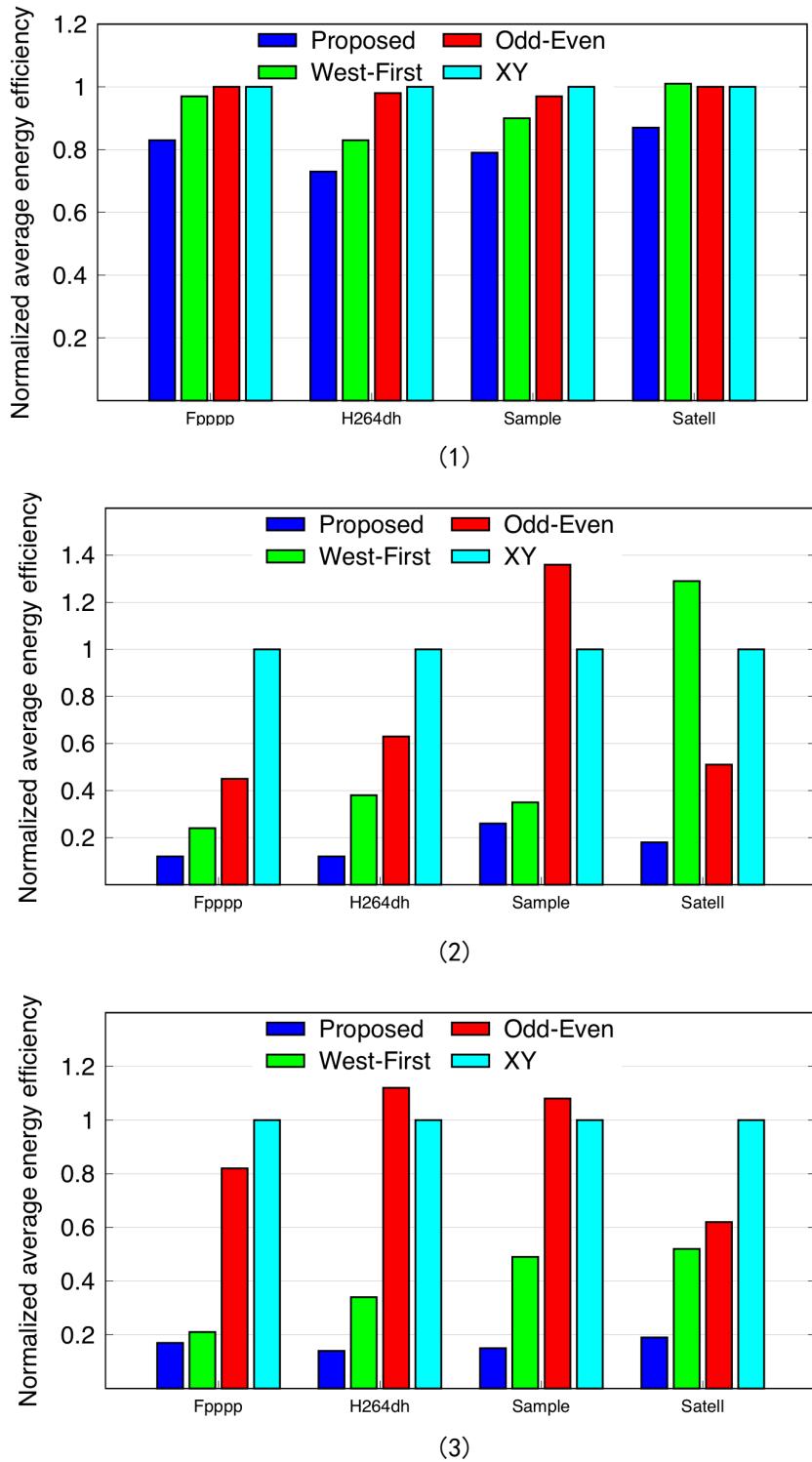


图 7-3-4 实际应用路由下，在不同温度分布下的归一化功耗，(1) 为 Center block，(2) 为 Corner block，(3) 为 Narrow Strait

Fig. 7-3-4 The average thermal-induced optical energy efficiency under real application, with center block(1), corner block(2), Narrow strait (3) temperature distributions

确定性路由 XY 来讲也有一定的提升，但是提升的效果只有 5%-10%，没有本文提出的饿路由算法的效果明显。从 Corner block 温度分布的数据来看，相对于确定性路由 XY 来讲，我们提出的路由算法提升的效果非常的明显，功率损耗降低了 80%-85%。其中 FPPPP 和 H264DH 实际应用都将功耗降低了 85%以上，其他的适应性路由算法相对于确定性路由也有一定的提升，但是部分的路由情况，如 SAMPLE 实际应用下的 Odd-Even 路由算法和 SATELL 实际应用下的 West-First 路由算法的功耗表现没有确定性路由 XY 的好。最后，从 Narrow strait 温度分布的数据来看，我们提出的路由算法的表现很好，相对于确定性的路由 XY，不同实际应用的路由状态下，功耗都降低了 80%以上。其他的适应性路由也相对于确定性路由有功耗表现上的提升，部分情况，如 Odd-Even 路由算法在 H264DH 和 SAMPLE 两种实际应用的路由状态下的表现是不如确定性路由 XY 的。

在验证完我们提出的路由算法在光损耗和功耗方面的性能后，我们还需要验证算法在可用性方面的性能表现，这里我们同样在不同的温度分布条件下，对比了不同的路由算法在实际应用路由方式下的路由表现，该路由表现的数据为完成一组该实际应用的路由所需要的时钟数。

图 7-3-5 展示了不同的温度分析下，不同的路由算法对于不同的实际应用路由方式的路由表现。从整体分析来看，不同的路由算法在不同的路由方式下的实际应用的路由表现的差异不大，在不同的应用和温度条件下，表现各有优劣。从 Center-block 温度分布数据表现来看，我们提出的路由算法的整体性能稍高于确定性路由 XY，单次应用完成所需要消耗的时钟数高于确定性路由 XY，达到 1%-2%。性能表现相对于其他的适应性路由要稳定一些。从 Corner block 温度分布下的性能表现情况来看，FPPPP 应用下，我们提出的路由算法要稍优于确定性路由 XY 的表现，其他三个的性能表现，确定性的路由 XY 的性能表现要更好一点。另外两个适应性路由的表现介于我们提出的路由算法和 XU 算法之间。最后在 Narrow strait 的性能表现与其他两种温度分布下的表现大致相当，我们提出的路由算法在不同的应用下的性能表现都和确定性路由 XY 的表现相当，只有 West-First 路由算法在 SAMPLE 引用下的表现稍差一点，其相对确定性路由 XY 的性能要差 7%。

5.3.3 实验结论

上一小节，我们对比了我们提出的算法在不同的路由方式和不同的温度分布条件下对光损耗和光器件功耗的优化性能和路由性能。观察光损耗的优化数据特

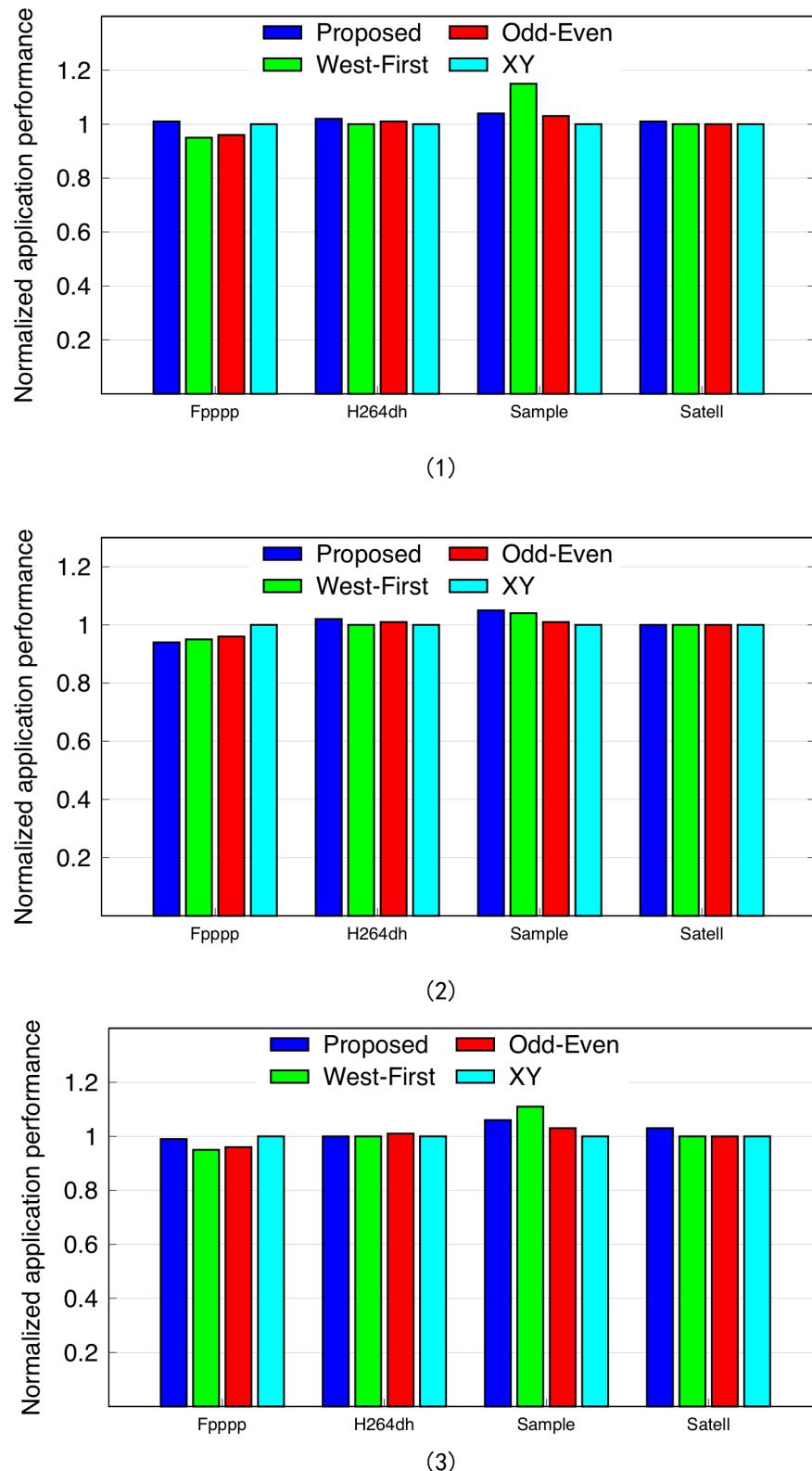


图 7-3-5 实际应用路由下，在不同温度分布下的路由表现，(1) 为 Center block，(2) 为 Corner block，(3) 为 Narrow Strait

Fig. 7-3-5 The normalized performance under real application, with center block (1), corner block (2), Narrow strait (3) temperature distributions

点，我们可以验证我们的算法在优化光损耗上的有效性，通过学习算法，我们找到了不同温度分布下，光损耗较少的路径。避免了片上出现热点之后，导致出现功耗剧增的情况。对比三个不同的温度分布的特点和优化的结果可以看到，当温度分布的越不均匀，分散热点越多的时候，优化的效果越好，如在 Corner block 中的优化效果要优于 Center block。由于 Center block 中热点分布较集中，导致可优化的空间没有 Corner block 那么大，这样也验证了我们提出的算法在不同优化层度中都可以找到最优路径。通过对比优化功耗的数据来看，由于优化的光损耗是光器件功耗的主要来源，并且光损耗和光器件的功耗成指数相关，所以在功耗优化的层度上要更加的明显。不管是仿真路由方式还是真实应用的路由方式，功耗都可以降低 80%，说明在路由空间中，的确有很大的空间去降低功耗，使整个系统在热敏感的环境下，达到可用的状态。对比如仿真路由和真实应用的情况来看，由于真实应用的数据包大多数的传输路径比较短，这样的优化空间没有仿真路由的优化空间大，所以在仿真路由方法的数据中，优化的层度会更大，也更好的体现出了我们提出的基于学习方法的路由算法的优越性。最后，我们验证我们提出的路由算法在应用性能上和传统的确定性路由或者其他适应性路由的应用性能相差不大，是完全满足片上光网络的传输需求的。综合来讲，我们提出的基于学习方法的路由算法可以很好的缓解热敏感环境下，光器件光损耗增大，功耗剧烈增加的情况，并且在应用性能上的牺牲不大。

5.4 本章小结

本章首先介绍了整个实验环境的搭建过程和相关参数的设置，温度仿真的结果。实验阶段，本章为了验证我们提出的路由算法在热敏感环境下的优越性，我们通过一个收敛性实验，验证了学习算法随着路由过程不断优化学习路径的过程。通过对比不同的算法在不同的温度分布条件下的光损耗性能和功耗性能，体现了我们提出的基于学习方法的路由算法的优化能力。由数据可知我们提出的路由算法相对于确定性路由 XY，可以降低光损耗 10%-20%，降低功耗最优可以降低 80%。显著的改善片上光网络上路由导致的光器件功耗激增的问题。最后通过对比不用的路由算法在不同实际应用路由方式的路由性能，我们可以验证我们提出的算法在应用性能上和传统的确定性路由算法 XY 相当，同其他适应性路由算法的应用性能也相当。综合来说，我们提出的基于学习方法的路由算法可以很好的缓解热敏感环境下，光器件光损耗增大，功耗剧烈增加的情况。

第六章 总结与展望

6.1 总结

片上光网络系统由于受到光器件热光效应的影响，光器件的功耗问题已经成为了制约片上光网络应用的主要瓶颈。由于光器件的功耗问题主要有其热敏感性导致，所以对于各级光器件需要一个更加完备的热敏感性模型。为了降低片上光网络上的功耗，需要在器件级和网络级提出不同的功耗优化方案。本文首先完整的搭建了片上光网络的功耗模型，并设计了系统级的功耗优化方案。为了验证热敏感性路由算法在片上光网络上的效果，我们还搭建路由-温度协同仿真平台，具体工作如下：

- 在片上光网络的热敏感性模型中，光基础开关元件的热敏感性模型是产生光损耗最大，最受温度影响的器件。光基础开关元件的模型主要由 L_{active} 和 $L_{passive}$ 两种状态下的光损耗模型组成，本文完善了关闭状态下光基础开关元件的光损耗 $L_{passive}$ 模型，使得片上光网络的热敏感模型更加的完整。
- 为了

itive Power Optimization Approach for Optical NoC

[5] Integrated Thermal Tuning of Suspended Micro-Resonators.

[6] A Learning-Based Thermal-Sensitive Routing for Power Optimization of Optical NoCs

[7] A Hierarchical Hybrid Optical-Electronic Network-on-Chip

[8] Dally, W. and Towles, B. 2001. Route packets, not wires: on-chip interconnection networks. In Proc. Design Automation Conf. 684 - 689.

[9] Shacham, A., Bergman, K., and Carloni, L. 2007. On the design of a photonic network-on-chip. In First Int. Symp. Networks-on-Chip. 53 - 64.

[13] Ye, Y., Wang, Z., Yang, P., Xu, J., Wu, X., Wang, X., Nikdast, M., Wang, Z., and Duong, L. H. K. 2014. System-level modeling and analysis of thermal effects in wdm-based optical networks-on-chip.

IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems 33, 11, 1718 - 1731.

- [10] Mo, K. H., Ye, Y., Wu, X., Zhang, W., Liu, W., and Xu, J. 2010. A hierarchical hybrid optical-electronic network-on-chip. In IEEE Computer Society Annual Symp. VLSI. 327 - 332.
- [12] Werner, S., Navaridas, J., and Lujn, M. 2015. Amon: An advanced mesh-like optical noc. In 2015 IEEE 23rd Annual Symposium on High-Performance Interconnects. 52–59.