

<http://www.phei.com.cn>



现代通信网实用丛书

面向未来的光交换网络 及其器件技术

© 洪小斌 郭宏翔 伍 剑 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

现代通信网实用丛书

面向未来的光交换网络及其器件技术

洪小斌 郭宏翔 伍 剑 编著

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书比较全面地介绍了光通信网络中的光交换网络技术和关键器件——光开关，通过相关的应用实例，阐述了这些技术和产品在当前网络中的应用情况，展望了未来光交换网络中可能采用的技术和器件。全书分为两大部分，第一部分介绍各种光开关器件技术、产品及应用，包括已经商用的电光开关、MEMS开关、声光开关和热开关，以及目前还处于研究阶段的全光开关和光开关矩阵；第二部分介绍电信领域正在商用的光电路交换网络及未来的光分组交换网络，介绍了分组交换网络在通信网络中的应用案例，包括实验系统和光子网格等。

本书可供电信运营商、设备商以及高等院校和研究机构中从事光纤通信系统和网络研发的科技人员阅读，使其对现有的和未来的光交换技术有一个比较全面的了解，也可作为企业员工的光交换技术培训教材或相关院校师生的教学参考资料。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

面向未来的光交换网络及其器件技术 / 洪小斌，郭宏翔，伍剑编著. —北京：电子工业出版社，2011.1
（现代通信网实用丛书）

ISBN 978-7-121-12413-6

I. ①面… II. ①洪… ②郭… ③伍… III. ①光通信—通信网—研究 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 231367 号

策划编辑：宋 梅

责任编辑：宋 梅

印 刷：北京市铁成印刷厂
装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×980 1/16 印张：13.75 字数：308 千字

印 次：2011 年 1 月第 1 次印刷

印 数：3 000 册 定价：36.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

出版前言

通信行业正处在一个新的转折时期，无论是技术、网络、业务，还是运营模式都在经历着一场前所未有的深刻变革。从技术的角度来看，电路交换技术与分组交换技术趋于融合，其主要体现为语音技术与数据技术的融合、电路交换与分组交换的融合、传输与交换的融合、电与光的融合。这将不仅使语音、数据和图像这三大基本业务的界限逐渐消失，也将使网络层和业务层的界限在网络边缘处变得模糊，网络边缘的各种业务层和网络层正走向功能乃至物理上的融合，整个网络将向下一代融合网络演进，终将导致传统电信网、计算机网和有线电视网在技术、业务、市场、终端、网络乃至行业运营管理和政策方面的融合。从市场的角度来看，通信业务的竞争已达到了白热化的程度，各个通信运营商都在互相窥视着对方的传统市场。从用户的角度来看，各种新业务应运而生，从而使用户有了更多、更大的选择空间。但无论从那个角度，在下一代的网络中，我们将看到三个世界：从服务层面上，看到一个 IP 的世界；从传送层面上，看到一个光的世界；从接入层面上，看到一个无线的世界。

在 IT 技术一日千里的信息时代，为了推进中国通信业的快速、健康发展，传播最新通信网络技术，推广通信网络技术与应用实践之经典案例，我们组织了一些当今正站在 IT 业前沿的通信专家和相关技术人员，以实用技术为主线，注重实际经验的总结与提炼，理论联系实际，策划出版了这套面向 21 世纪的《现代通信网实用丛书》。该丛书凝聚了他们在理论研究和实践工作中的大量经验和体会，以及电子工业出版社编书人的心血和汗水。丛书立足于现代通信中所涉及的最新技术和成熟技术，以实用性、可读性强为其自身独有特色，注重读者最关心的内容，结合一些源于通信网络技术实践的经典案例，就现行通信网络的结构、技术应用、网络优化及通信网络运营管理方面的问题进行了深入浅出的翔实论述。其宗旨是将通信业最实用知识、最经典的技术应用案例奉献给业界的广大读者，使读者通过阅读本套丛书可得到某种启示，在日常工作中有所借鉴。

本套丛书的读者群定位于 IT 业的工程技术人员、技术管理人员、高等院校相关专业的高年级学生、研究生，以及所有对通信网络运营感兴趣的人士。

在本套丛书的编辑出版过程中，我们得到了业界许多专家、学者的鼎力帮助，丛书的编著者们为之付出了大量的心血，对此，我们表示衷心的感谢！同时，也热切欢迎广大读者对本套提出宝贵意见和建议，或推荐其他好的选题（E-mail: mariams@phei.com.cn），以帮助我们在未来的日子里，为广大读者及时推出更多、更好的通信网络技术类优秀图书。

电子工业出版社

2005 年 1 月

序

去年的今天，网上传出一则消息，让全球从事光纤通信的科技工作者，特别是华人，兴奋不已：“光纤之父”高锟荣获 2009 年诺贝尔物理学奖。诺贝尔奖评委会颁奖词这样描述说：“光流动在细小如线的玻璃丝中，它携带着各种信息数据传递向每一个方向，文本、音乐、图片和视频因此能在瞬间传遍全球。”

高锟早期对于“光在纤维中传导方面的研究为光纤通信带来开拓性进展”，这集中地表现在他发表于 1966 年的题为《用于光频的介质纤维表面波导》的论文中。是他，发明了通信用的光纤。

44 年后的今天，光纤通信的发展远远超乎高锟当年的预期。光纤放大器和波分复用技术的成功应用，使得光纤通信的频谱效率正在向着每赫每秒 5 比特的“仙农极限”逼近。

然而，正在逼近“极限”的仅仅是光纤的传送速率。在光网络的节点，光的交换和路由速率却百倍千倍地落后于传送速率，因为在光网络的节点，人们仍然采用“光-电-光”转换，用电子技术完成信号处理的方法来完成交换和路由，而“电子瓶颈”难以逾越。

最近十多年来，越来越多的研究人员探索光交换的可能性。洪小斌博士、郭宏翔博士和伍剑教授是国内较早从事光交换、光路由研究的学者。洪、郭两位博士分别在加拿大和日本完成了博士后的研究，回国工作以后，又参与多项国际合作项目；伍剑教授多年来一直是一个 80 多人研究团队的科研项目的组织者。他们整理完成的这一本介绍光交换及其器件的书籍，不仅是理论的阐述，更是实际经验的介绍，又有对于研究前沿的展望。我相信，它的出版必定有利于工程师、博士生、硕士生了解光交换技术，有助于推动光交换技术在中国的研究和发展。



北京邮电大学教授，前校长
中国通信学会会士，前副理事长
英国 IET 协会会士
2010 年 9 月于北京

前 言

近 10 年间，基于波分复用（WDM）技术的光传输技术极大地扩充了通信网络的带宽资源，成为现代通信网络的技术基础。与光传输巨大的容量相比，节点交换的能力却始终无法取得突破，与目前通信网络中光传输和电交换的组合形式相比，光传输和光交换这种组合无疑更能够充分发挥光通信技术高速、宽带的优点，不仅可以克服“电子瓶颈”导致的通信网络容量受限问题，而且还能够简化网络的结构和复杂性，大大提高网络的灵活性和生存性，实现网络速率和协议的透明性，是通信网络的最终解决方案。正是基于这样的愿景，光交换技术在通信技术领域一直是一个热点研究领域，得到广泛重视。对光交换技术的研究也从来没有停止过，不断有新的光交换概念和新的光交换器件出现。

本书旨在对当前光交换的技术和应用从各个方面进行一个比较全面的描述，不仅讨论了当前成熟的并且在通信领域广泛应用的光交换器件和网络技术，还展望了未来可能应用的光交换器件和网络技术。主要内容包括两大部分，第一部分介绍了光交换的各种光开关器件的基本原理和技术特性，主要包括电光开关、声光开关、热光开关和微机械（MEMS）光开关等已商用的光开关以及还处于研究阶段的全光开关，简单讨论了这些光开关器件的制造技术、产品形式和商业应用；第二部分介绍了如何利用光开关器件构成一个光交换矩阵所涉及的技术，建立在不同光交换技术基础上的光交换系统和网络技术及其商业应用情况，其中包含交换矩阵的构造、矩阵的控制算法和矩阵的性能分析。对于不同光交换技术的交换速度和交换粒度，光交换系统和网络就具有不同的架构、协议和信令等，如光电路交换和光分组交换。物联网技术在政府的推动下风起云涌，产业应用空前高涨，由网格计算演化而来的云计算已成为物联网关键技术之一，在本书的最后讨论了光交换技术与网格计算结合形成的光子网格技术。

本书每章内容都是光交换技术研究领域内的一部分内容，都力图自成一个小的体系，其中有分析也有描述性的内容，不仅包含理论和实验，也包含具体的应用实例，既有学术研究方面的观点，也有业界实际应用的考虑。另一方面，通过精心的组织，各章内容又紧密地联系在一起，形成一个对光交换技术的全面、系统的描述，从而使读者对这个领域的技术和应用有一个完整的认识 and 了解。因此，在这个意义上，本书面向的读者群是比较广泛的，它既可以作为相关院校高年级本科生或光交换技术领域研究生的教科书，也可作为信息通信领域内其他专业师生的参考书，无论是器件技术还是网络应用，它都是对相关内容一个很好的补充。对光网络领域的研究人员来说，本书也具有很好的参考价值，它不仅提供了一个对光交换技术总体方面概括性的描述，在具体技术上也有较深入的阐述和讨

论。此外，本书对电信领域的相关人员也有一定的参考价值。

光交换技术并不是一个单一的技术领域，它实际包含多个方面的具体技术，从底层的物理器件到上层的网络架构和协议，涉及多个学科领域。要完全理解或掌握光交换这个交叉学科领域内所有方面的知识是十分困难的，即使尝试去完整、全面地描述也存在不小的困难。

本书凝聚了编著者所在项目组多年来的教学和科研成果，全书由洪小斌、郭宏翔、伍剑执笔，洪小斌统稿，特别感谢吴冰冰、张文甲、曹孝元、王敏学、李兰兰、刘雷和邱菊芳在本书撰写过程中帮助收集和整理相关资料。

本书编著者在写作过程中广泛收集了大量的国内外资料，充分总结了编著者及所在研究组在光交换技术方面多年的研究成果，力图对当前的光交换技术进行比较准确、全面、完整的阐述，但由于所涉及的技术还在不断发展之中，加之编著者水平有限，难免有疏漏与错误之处，恳请同行和广大读者批评指正。

编著者

2010年9月5日

目 录

第 0 章 引言	1
0.1 光交换网络及其发展历程	2
0.2 光开关的性能参数	5
0.3 光开关矩阵的性能参数	6
第 1 章 电光开关	9
1.1 晶体中的电光效应	11
1.1.1 光在晶体中的传播特性	11
1.1.2 铌酸锂晶体的电光特性	14
1.2 马赫-泽德干涉型 (MZI) 电光开关	17
1.3 定向耦合器电光开关	19
1.3.1 波导中的耦合模理论	19
1.3.2 定向耦合器型电光开关	21
1.4 Y 分叉型电光开关	23
1.5 多模电光开关	28
1.6 掺镧锆钛酸铅 (PLZT) 电光开关	29
1.6.1 PLZT 的电光特性	30
1.6.2 PLZT 电光开关	31
1.7 PLZT 电光开关的商业应用	33
参考文献	34
第 2 章 MEMS 光开关	37
2.1 MEMS 光开关的工作原理和驱动方式	38
2.1.1 MEMS 光开关的工作原理	38
2.1.2 MEMS 光开关的驱动技术	40
2.2 MEMS 光开关的结构	42
2.2.1 二维平面结构 MEMS 光开关	42
2.2.2 三维空间光束结构 MEMS 光开关	45
2.3 MEMS 光开关的设计与制作	46
2.3.1 高斯光束及损耗	46
2.3.2 光束成像系统	47

2.3.3	光程变化的影响	48
2.3.4	偏振相关损耗	48
2.3.5	MEMS 开关的制作工艺	49
2.4	MEMS 光开关的集成	51
2.4.1	传统矩阵型 MEMS 光开关架构	51
2.4.2	L 型 MEMS 光开关架构	52
2.4.3	Spark-Benes 型 MEMS 光开关架构	54
2.4.4	5 镜型 MEMS 光开关架构	55
2.4.5	大规模 MEMS 光开关的集成架构	57
2.5	MEMS 光开关的商业应用	58
	参考文献	59
第 3 章	声光开关	61
3.1	晶体中的声光效应	62
3.1.1	声致折射率调制	62
3.1.2	声致布喇格衍射	63
3.2	基于光束偏振的声光开关	66
3.2.1	声光耦合模方程	66
3.2.2	声光开关的工作原理	67
3.2.3	AOTF 的理论分析及制作	69
3.3	其他类型的声光开关	73
3.4	声光开关的商业应用	74
	参考文献	75
第 4 章	热光开关	77
4.1	热光开关的结构和工作原理	78
4.1.1	光波导中的热光效应	78
4.1.2	定向耦合器热光开关	80
4.1.3	M-Z 干涉仪热光开关	81
4.1.4	数字热光开关	82
4.2	热光开关的设计和制作	83
4.2.1	硅基热光开关	83
4.2.2	聚合物热光开关	84
4.3	热光开关的商业应用	84
	参考文献	86

第 5 章 全光开关	89
5.1 基于非线性光学环路镜的全光开关	90
5.2 马赫-泽德型光控光开关	94
5.3 基于 SOA 的全光开关	95
5.3.1 基于太赫兹光非对称解复用器的全光开关	95
5.3.2 基于 UNI 的全光开关	97
5.4 光子晶体全光开关	98
5.4.1 通过光子带隙迁移	99
5.4.2 通过缺陷模式迁移	100
5.4.3 通过非线性频率转换	100
5.4.4 利用光子态密度	100
5.4.5 利用双稳态	101
5.4.6 利用波导和微腔的耦合	101
5.5 几种光开关的性能分析和比较	102
参考文献	103
第 6 章 光交换矩阵	105
6.1 光交换矩阵的特性	106
6.2 空间交换矩阵	108
6.2.1 基本光开关模型	108
6.2.2 Crossbar 交换矩阵	109
6.2.3 Clos 交换矩阵	111
6.2.4 Benes 交换矩阵	113
6.2.5 Spanke 交换矩阵	114
6.3 交换矩阵的连接控制算法	115
6.3.1 路径搜索算法	116
6.3.2 重排算法	119
6.4 AWG 交换	121
6.4.1 AWG 的结构和原理	122
6.4.2 AWG 波长路由选择器	122
6.5 波长选择开关交换	127
6.5.1 波长选择开关	127
6.5.2 基于 MEMS 的波长选择开关	128
6.5.3 基于 AOTF 的波长选择开关	131
参考文献	135

第 7 章 光电路交换	137
7.1 光电路交换概述.....	138
7.1.1 光电路交换的原理.....	138
7.1.2 光路保护及恢复.....	142
7.2 自动交换光网络.....	150
7.2.1 传送平面.....	152
7.2.2 控制平面.....	152
7.2.3 管理平面.....	157
7.2.4 DCN.....	158
7.2.5 接口和参考点.....	158
7.3 光电路交换商用系统.....	159
参考文献.....	161
第 8 章 光分组交换	163
8.1 光分组交换 (OPS).....	164
8.1.1 光分组交换的原理.....	164
8.1.2 光分组交换网络的关键技术.....	169
8.2 光突发交换 (OBS).....	173
8.2.1 OBS 网络原理.....	174
8.2.2 OBS 网络节点结构.....	174
8.2.3 OBS 网络关键技术.....	176
8.3 光分组交换技术的应用.....	183
8.3.1 光突发交换试验平台与现场实验.....	183
8.3.2 基于 OBS 的以太网 EtherBurst.....	184
参考文献.....	186
第 9 章 光子网络	189
9.1 网络技术.....	190
9.2 光子网络技术.....	192
9.2.1 基于 OCS 网络的光子网络.....	193
9.2.2 基于 OBS 网络的光子网络.....	195
9.2.3 基于 OBS/OCS 混合式网络的光子网络.....	200
参考文献.....	202



第0章 引言

本章要点

- 光交换网络的发展历程
- 光交换网络的类型
- 描述光开关性能的参数
- 描述光交换矩阵性能的参数



本章导读

光网络技术作为电信业务网络的支撑技术，在因特网的飞速发展和各种业务需求高速增长的推动下，不断推陈出新，但数据交换的瓶颈一直是网络技术一道无法逾越的鸿沟，光交换技术普遍认为是解决交换技术瓶颈的终极解决方案。本章将介绍光网络技术和光交换技术的发展历程，详细阐述光开关和光开关矩阵等光交换技术的基本单元技术的性能参数。

0.1 光交换网络及其发展历程

电信业务尤其是数据业务（比如 Internet）的飞速发展对当前的电信网络提出了更高的要求，一方面，要求传输链路具有足够的传输容量及良好的扩容升级性能；另一方面，又要求网络节点具有灵活的高速数据处理能力，以实现大批量数据的无阻塞、无延迟的交换与路由。

在信息社会巨大需求的推动下，以光纤通信技术为基础构建的通信网络得到了巨大的发展。光纤通信系统的容量，更准确地说是光通信系统的传输容量，从最初的几十 Mbps 发展到目前商用系统超过 10 Tbps，提高了接近一百万倍。然而，仔细审视通信网络的两大支撑技术——传输及路由和交换——可以发现，由于“电子瓶颈”的限制，网络节点信息处理能力的增长速度远落后于网络传输能力的增长速度，从而导致这两大支撑技术的发展极不平衡：网络节点的路由交换的容量远小于网络的传输容量。以目前的商用技术水平为例，单根光纤承载的信息容量超过 10 Tbps，单根光缆超过 500 Tbps，而最高端路由器单端口的电子信息处理能力为 10 Gbps（极限不超过 100 Gbps），路由交换容量小于 1 Tbps（一般为 640 Gbps），因此信息传输能力和处理能力之间相差 100~1 000 倍，传输容量和路由交换容量之间相差约 500 倍，就如同具有 500 个车道的高速公路，而在交叉路口却只有 1 个车道。这种情况导致了在目前的网络中，为迎合网络节点处路由器或交换机的处理能力，实际只能使用光缆或光纤的一小部分传输容量。若要将一根光缆的传输容量全部利用起来，网络的节点处就需要有近 500 台交换机或路由器来处理这一根光缆承载的信息，平均每台交换机或路由器分不到一根光纤，实际中这是不可承受的。因此，光网络节点的信息处理（路由和交换）能力，实际已成为提升整个信息通信网络性能的限制性因素。

在光交换方面的研究首次出现在 20 世纪 70 年代, 90 年代初, 已经有相当多的研究人员致力于光交换的研究工作。科学工作者在电子开关、光电子器件、光计算和光通信领域的研究成果对光交换都起到了极大的促进作用。光开关是光交换技术的核心器件, 其按功能分为关联器件和逻辑器件两大类, 关联器件在输入 / 输出端口间建立映射关系, 这种映射关系由外部电路控制。逻辑器件是通过控制信息来控制器件本身开关状态的数字器件, 逻辑器件主要针对光学逻辑应用和光学计算机, 以及构建电信中使用的光数字交换机。

到了 20 世纪 90 年代, 随着导波光开关 (主要是钛波导铌酸锂晶体)、光学机械开关、空间光调制器 (液晶) 和半导体光放大器等开关器件的成熟, 使光交换机不只是停留在概念上, 已经可以搭建较小规模的光交换机了。

互联网的巨大增长, 使波分复用 (WDM) 得到广泛的部署和应用。WDM 提供了一个解决传输瓶颈的方案, 但同时带来了挑战, 大量的光波长通道需要交换, 而在运营商网络中使用的交换机目前仍然是电交换机, 交换中心和交叉连接节点仍然需要进行光-电-光转换。多个波长的数据流必须在每个节点终结, 转换成电信号后进行交换, 再转换为光信号传送到下一个节点。这种做法, 显然缺乏灵活性和可扩展性, 而且价格昂贵, 并且成为整个网络的瓶颈, 因此, 光交换被认为是解决这些问题的关键。

随着大量的研究和开发力量的投入, 在材料科学和制造方法领域引入了很多新的光交换技术, 同时以前的技术也得到了改进。显然, 向光交换迁移会带来很大的优势, 将几乎无限的光传输系统带宽扩展到交换节点, 从而提升了信息网络的承载能力, 远远超出电交换的水平。目前, 光网络和光交换所代表的系统不一定具有“光”的性质, 例如, SDH / SONET 的系统被广泛认为是电信网络中的光传输网络, 但该网络除了单波长点对点的传输链路以外, 其他功能, 包括复用、交叉连接、分插和控制都是在电域完成, 一些设备厂商声称的光交叉连接设备或光交换系统只不过是基于电交换矩阵并具有光接口的交叉连接光-电-光 (OEO) 设备。相比之下, 基于光开关矩阵的光交换系统才可称为光到光 (OOO) 系统, 该系统通常称为透明系统或全光系统, 而 OEO 系统通常称为不透明系统。

透明网络能够传输由各种协议、数据传输速率、调制技术和编码格式组成的任何类型的信息, 并且兼容未来的协议和技术, 极大地降低了网络成本, 而基于电子设备的网络依赖于信号的类型和参数, 且并非透明, 与设备的信号处理能力有关。SDH / SONET 是典型的非透明设备, 该系统需要在所有的节点之间进行电信号再生。透明传输是光网络的固有属性, 数据只在光域进行传输和交换。但在今天的光网络中, 所谓的透明传输也并非全透明, 会受限于光纤、传输距离及其他因素。我们可以把光网络分为以下几种类型。

① SDH / SONET 网络：该网络只能进行单波长点对点的光传输，实际上是光电网络。

② 交换和控制完全在电域实现的波分复用（WDM）网络：该网络仍然是光电网络，与第一种网络相比采用了更多的光技术，可以称之为不透明的网络（OEO）。

③ 基于光交换的波分复用网络：交换控制和网络控制仍然在电域完成，根据网络的透明程度可分为不同的类型，如果没有使用光电转换设备，则网络是完全透明，在不透明和完全透明之间的设备称为部分透明设备。

④ 全光网络：所有操作和功能都在光域完成。

只有最后两个类型的网络与光交换有关。由于利用光来控制交换的网络还不现实，目前部分透明和全透明光网络采用波分复用光传输和交换，并结合电子控制，最大限度地利用了光和电各自的优点。

与电交换方法类似，光交换可以采用光电路交换（OCS）和光分组交换（OPS）两种形式。在光电路交换中，交换粒度是单个光通道的带宽，因此光电路交换往往指光波长交换。由于现有网络主要以数据流为主，电路交换技术在处理数据流时优势并不明显，人们的目光逐渐转向光分组交换技术。光分组交换以一个数据包为交换粒度，数据包以全光的方式进行处理，因此具有光电路交换的所有优点。该技术要求数据报文的帧头识别、处理和全部在光域进行，这对可扩展的光交换技术、光缓存技术、光分组定界和同步技术提出了新的挑战。

近年来，光突发交换（OBS）作为一种折中的技术被提出来，吸引了大批研究者参与研究和开发。OBS 比 OCS 具有更高的带宽使用率，同时降低了 OPS 对光器件的苛刻要求。在 OBS 网络中，数据包被组合成大的突发数据（DB），每个突发包包含一个突发包头（BHP），DB 和 BHP 在 OBS 边缘节点的入口处产生，每个 DB /BHP 对通过 OBS 核心节点交换到目的地（边缘节点出口）。DB 通过数据通道传送到下一个节点，而 BHP 通过一个专用的控制通道传送到相同的节点。根据采用的协议，BHP 可能先被传送到相应节点，然后 DB 才传送，因此他们之间需要一定延时，以便各节点有足够的时间来处理 BHP 信息，该延时称为偏置时间。DB 在各节点间传输时始终保持在全光域，而 BHP 包含了在各节点进行交换的信息，在各节点被转成电信号进行处理并重新生成后传向下一节点。DB 在 OBS 的目的节点处被重新组合，生成原始的分组后传送出 OBS 网络。

OPS 技术面临的最具挑战性的难题是，在一个很小的分组内用光的方法来读 / 写报头，而在 OBS 在中，数据信号被封装到很大的突发包中，把数据信号和控制信号分开处理，避免了在光域来处理报头的难题。

光交换技术的核心器件是光开关，光开关的性能和尺寸决定了光交换矩阵的规模和实用性，下面我们先来了解一下光开关及其组成的矩阵的性能参数。

0.2 光开关的性能参数

光开关在光学性能方面的特性参量主要有插入损耗、隔离度、串扰、工作波长、消光比和开关时间等。下面依据图 0-1 所示的 1×2 光开关模型给出上述参量的定义。

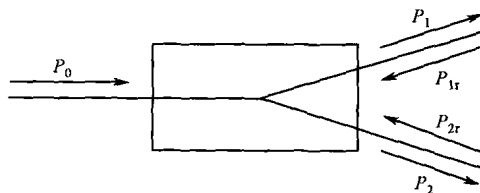


图 0-1 1×2 光开关模型

(1) 插入损耗 (Insertion Loss)

某一输出光功率与输入光功率的比值，用分贝表示。

$$IL = -10\lg(P_1 / P_0)$$

式中， P_0 为输入光功率， P_1 为输出光功率。

(2) 回波损耗 (Return Loss)

从输出端返回的光功率与输入功率的比值，以分贝表示。

$$RL = -10\lg(P_{1r} / P_0)$$

式中， P_{1r} 为在输出端口接收到的返回光的功率。

(3) 隔离度 (Isolation)

两个相互隔离输出端口光功率的比值，以分贝表示。

$$I_{1,2} = -10\lg(P_{i1} / P_{i2})$$

式中， P_{i1} 和 P_{i2} 为开关的两个相互隔离的输出端口的光功率，当光从 i 端输入时，1 端输出的光功率为 P_{i1} ，2 端输出的光功率为 P_{i2} 。

(4) 串扰 (Crosstalk)

串入相邻端口的输出光功率与光开关接通端口的输出光功率的比值，以分贝表示。

$$C_{1,2} = -10\lg(P_2 / P_1)$$

式中， P_1 是开关接通输出端口 1 输出的光功率， P_2 是串入端口 2 输出的光功率。

(5) 消光比 (Extinction Ratio)

输入和输出两个端口处于导通 (开启) 与非导通 (关闭) 状态的插入损耗之差。

$$ER_{n,m} = \text{IL}_{n,m} - \text{IL}_{n,m}^0$$

式中, $\text{IL}_{n,m}$ 和 $\text{IL}_{n,m}^0$ 分别为 n 和 m 两端口导通状态和不导通状态的插入损耗。

(6) 开关时间 (Switching Time)

开关端口从某一初始态转为开启或关闭所需的时间。开关的开启时间和关闭时间从在开关上施加或者撤去转换能量的时刻算起。

0.3 光开关矩阵的性能参数

光开关矩阵的主要性能参数有以下几点。

(1) 交换矩阵的大小

交换矩阵的大小反映了光开关矩阵的交换能力。光开关矩阵处于网络不同位置, 对其交换矩阵容量要求也不同。随着通信业务需求的急剧增长, 光开关矩阵的交换能力也需要大大提高, 如在骨干网上, 要有超过 $1\,000 \times 1\,000$ 的交换容量。对于大交换容量的光开关, 可以通过较多的小光开关叠加而成。

(2) 交换速度

交换速度是衡量光开关矩阵性能的重要指标。交换速度有两个重要的量级: 毫秒和纳秒。对因故障而重新选择路由的情况来说, 当交换时间达到几个 ms 时已经足够满足需要了, 如对 SDH/SONET 来说, 当因故障而重新选路时, 50 ms 的交换时间几乎可以使上层感觉不到; 而在光互联网的分组交换技术中, 则要求交换时间到达 ns 量级, 这对于实现灵活的光互联网是十分重要的。

(3) 损耗

当光信号通过光开关矩阵时, 将伴随着能量损耗。在依据功率预算设计网络时, 光开关矩阵及其级联对网络性能的影响很大, 损耗和干扰将影响到功率预算。光开关矩阵损耗产生的原因主要有两个: 光纤和光开关端口耦合时的损耗和光开关自身材料对光信号产生的损耗。一般来说, 自由空间交换的光开关的损耗低于波导交换的光开关。如液晶光开关和 MEMS 光开关的损耗较低, 大约 1~2 dB; 而 LiNbO_3 和固体光开关的损耗较高, 大约 4 dB 左右。损耗特性影响到了光开关的级联, 限制了光开关矩阵的扩容