



现代光通信技术丛书

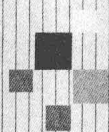
光网络 规划与优化



黄善国 张杰 韩大海 罗沛 张治国 郭秉礼 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



现代光通信技术丛书

光网络 规划与优化

■ 黄善国 张杰 韩大海 罗沛 张治国 郭秉礼 编著



人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

光网络规划与优化 / 黄善国等编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2012. 1
(现代光通信技术丛书)
ISBN 978-7-115-25797-0

I. ①光… II. ①黄… III. ①光纤网 IV.
①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第165345号

内 容 提 要

全书以最新的国际标准和研究资料为基础, 辅以作者多年来对光通信技术的研究成果以及参与国家相关重大项目的经验, 系统全面地介绍了光网络的规划与优化所涉及的各关键问题, 具体内容包括: 光网络的发展与规划、光网络规划与优化原理、光网络的资源优化技术、传输网络分析评估技术、多层联合网络规划与优化技术、城域分组传送网规划与优化、光接入网现状及发展趋势、网络模拟与网络仿真工具。

本书适合从事光网络规划与优化的工程技术人员及管理人员阅读参考。

现代光通信技术丛书

光网络规划与优化

◆ 编 著 黄善国 张 杰 韩大海 罗 沛 张治国
郭秉礼

责任编辑 杨 凌

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>

三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 24.5

字数: 594千字

2012年1月第1版

印数: 1—3000册

2012年1月河北第1次印刷

ISBN 978-7-115-25797-0

定价: 69.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前 言

近年来,我国加快了信息网络建设的步伐。据统计,2000年以来我国干线业务量和带宽的实际年增长率均超过了200%。来自中国电信、中国联通等公司的数据表明,“十一五”期间随着清晰度高、交互性强的视频通信,实时流畅的流媒体点播,高可靠性、安全性和实时性的远程服务,虚拟现实环境,网格计算等网络新业务的兴起,以话音、视频、数据和交互业务为主流的四重播放业务,已逐步在现网中大量应用。2010年,我国主要城市(如上海、广州)网络单节点的交换容量已达到数Tbit/s乃至几十Tbit/s以上。这将对信息网络的传送能力提出重大的挑战。在日益增长的业务流量中,不收费和低收费的IP业务越来越占据绝对的优势,P2P的广泛应用,进一步导致业务流量的剧增,使得网络的建设和扩容的成本与运营效益的矛盾日益突出。因此,研究新的业务模式和网络流量模式给网络资源利用带来的影响,探讨网络规划与资源优化的新方法,以较少的投资满足日益剧增的带宽需求,成为网络发展重要的研究课题,也吸引了国内外众多的关注。

当前网络建设取得了大量优秀成果,但也存在着一些问题:(1)在建设初期缺乏整体规划,通信建设主要为速度型、粗放型。往往重视通信能力的增强而缺乏对全网发展细致、周详的规划、协调,对通信发展需求分析深度不够,估计不足,不少工程的配套项目未能同步建设;(2)网络大、机型多,信号配合不畅,影响了全网电话接通率的提高;(3)管理意识、管理方式、管理手段和管理机制及支撑网建设仍跟不上电话业务高速发展的要求,网络运行维护技术和维护手段仍较落后。为了克服以上困难,更好地使用新兴技术,同时考虑业务分布模式、变化的经济条件,以及新的网络概念,有效的网络规划和设计是必要的。所谓规划与优化,是指为实现一个系统的总目标及其变动所需要使用的资源、能源、信息,以及全面指导获得使用和配置这些资源、能源、信息的政策所作出决策的全过程。其目标是减少投资和运营费用,同时改善业务质量和灵活性。为了传送有竞争力的业务,有效的方案必须能平衡各种优化标准,如费用经济性和网络可靠性等。在网络规划与资源优化的具体实现中,目前一般是离线进行的,把优化后的数据逐条下载到网管上实现对网络的优化管理。在引入自动交换光网络(ASON)后,自动交换功能改变了传统光网络的业务配置方式。通过控制平面的引入,由路由控制器(RC)和连接控制器(CC)分别完成路由的动态计算和配置,能够实现实时、在线的资源优化。

应该说,正是通信技术的复杂性以及更新快的特点,推动着传送网的发展。光网络规划与优化问题必须解决和克服以下几种新的特点。

1. 网络所承载的业务已从单一业务向多业务的方向发展,不仅要传送话音、数据业务,还要传送图像等多媒体业务,分组业务需求的日益显现,需要在SDH/WDM网的基础上研发分组传送网(PTN)技术,以满足各种业务所要求的不同的服务质量(QoS)。在此背景下,网络传送信息容量的消耗迅速增大,为满足在带宽上的要求,原有的以SDH为物理层的网络应该被光传送网(OTN)/波分复用(WDM)光网络所取代,并正向ASON以及波分交换网络(WSON)的方向演进。由于业务转型的基础在于网络转型,其特点是从目前传统网络结构

向弹性网络结构转变。传送网的转型以前主要关注速率、容量、距离,现在重点关注业务、智能、管理,主要是外在指标的转型,尤其需要考虑针对业务的动态、突发、分布式等特性的有效承载技术,因此,考虑如何满足多业务、高带宽的智能光组网的规划与优化是当前的主要内容。

2. 网络技术日趋复杂,支撑这样一个网络的技术也从单一技术向多种技术共存的方向发展,呈现出多层面的网络结构。当前已经形成了:接入网中的光进铜退无源光网络(PON)新技术,包括 EPON、GPON、10G PON 以及 WDM PON 等;城域中原来基于 SDH 的多业务传送平台(MSTP)与支持分组传送的分组传送网(PTN)(T-MPLS/PBT/MPLS-TP)混合组网;骨干网中 OTN 以及 WSON 组成的大容量光传送组网。因此,光缆网、SDH、PTN、WDM/OTN 和 ASON/WSON 等技术在同一个多层传输网中的综合,使得多层之间的资源协调问题日益明显;如何在新网络技术形势下,降低传送成本,提升网络管理和维护能力,又是一个亟待解决的问题。

3. 传送网/光网络规划通常包含着多学科的综合,并涉及大量各种类型的设计变量和约束。采用传统的整体优化方法求解这样一种大型规划问题,将是非常困难和耗时的。同时,规划问题的标准会因网络的技术体制、管理运维条件等不同而有所不同,这使得对传送网的统一的规划与优化工作更加复杂,在规划过程中往往陷入局部或部分的最优解,难以达到规划的最优结果。而如果简单地将问题划分为小的子问题来解决,当子问题较多时,很难控制规划问题的全局最优解,因为在这种情况下,优化不仅依赖于解决子问题算法的效率,而且依赖在全局优化过程中子问题的协调关系。

4. 在具体的规划与优化因素中,规划活动受网络层特征的影响很大,例如选定的体系、可用的功能和设备、技术限制、应用的选路、保护恢复方案及资源部署策略等。集中体现在两个重要的方面:路由及生存性。由于规划问题的复杂性,导致传送网选路和资源分配多采用启发式算法,而保护恢复的计算中,则多考虑单层中的可靠的保护恢复资源的利用。因此,存在多层网络的资源联合路由及生存性问题,使得网络资源能够更有效的利用,同时,应该降低启发式算法的复杂度,提高规划路由算法的准确性。要求规划具有前瞻性和超前建设性,这就需要根据网络的动态性对网络进行评价与评估,设定最新的、合适的评价标准,包括设置网络各元素的权重,以及经济性分析等,以便网络规划的执行结果能够更加准确和可靠。

综上所述,需要深入研究和探讨光网络的规划与优化技术,揭示其原理与规律,给出相应的方法和策略,以应对未来高速信息网络对于光网络的要求,指导传送网的演进与建设。

全书以最新国际标准和研究资料为基础,辅以作者多年对光通信技术的研究成果和参与国家相关重大项目的经验,系统全面地介绍了光网络的规划与优化所涉及的各关键问题。全书共分 8 章。第 1 章概述了光网络的发展历程和演进方向,介绍了光网络规划与优化技术;第 2 章深入阐述了光网络的规划与优化原理;第 3~5 章则从光网络规划与优化的具体实现技术及其应用角度,详细介绍了光网络的资源优化、网络评估与评价、多层联合规划与优化等内容;第 6 章则介绍了城域分组传送技术的主要内容及组网规划;第 7 章重点关注接入网的规划与优化;第 8 章介绍了光网络的规划与优化工具,对其主要形式及内容等进行了阐述。

作者所在课题组自 20 世纪 90 年代中期开始研究全光通信网,先后承担并圆满完成过多项国家关于光网络的科研项目和实验示范网的建设,在研究中积累了较丰富的经验。本书就是在承担国家“973”计划、国家“863”计划和国家自然科学基金等的研究过程中完成的。

在此，作者对国家“973”计划、“863”计划和国家自然科学基金委员会等多年的资助表示衷心的感谢。

本书还凝聚了作者所在单位，包括信息光子学与光通信国家重点实验室（筹）和所在课题组等近年来的研究成果，这里需要感谢研究室的各位博士和硕士们，特别是参与资料提供与整理的所有同事和同学包括赵永利、曹徐平、郑滢雷、尹珊、李新、吕琳、韩娟、刑迎新、黄浩天等。同时，还要感谢顾畹仪教授和陈雪教授的审阅和大力支持。

本书作者和北京大学、清华大学、上海交通大学、北京交通大学等多所高校，以及中国电信、中国移动、工业和信息化部传输标准所与规划所、华信设计院、交通部科学研究院、朗讯贝尔实验室、中兴、华为等单位的相关研究组一直保持良好的合作关系，并得到了他们的大力支持。在长期的合作过程中，他们为本书的完成提供了大量有益的建议和帮助，在此一并致以诚挚的谢意。

光网络的规划与优化涉及网络的各个方面，内容繁杂。由于作者水平有限，难以做到一书概全，疏漏与不足之处，恳请同行和读者批评指正。

作者

2011年10月于北京邮电大学

目 录

第 1 章 光网络的发展与规划	1
1.1 光网络基本概念与构成	1
1.1.1 光网络的基本概念	1
1.1.2 光网络的基本构成	2
1.2 未来传送网的发展需求	7
1.2.1 规模化需求	7
1.2.2 动态化需求	10
1.2.3 优质化需求	10
1.3 网络形式及关键技术	11
1.3.1 同步数字体系 (SDH)	12
1.3.2 光传送网 (OTN)	13
1.3.3 自动交换光网络 (ASON)	16
1.3.4 波长交换光网络 (WSON)	17
1.3.5 分组传送网 (PTN)	19
1.4 国内外最新研究现状	20
1.4.1 标准进展	20
1.4.2 研发进展	22
1.5 光网络的规划与优化问题	25
1.5.1 概述	25
1.5.2 智能光网络规划与优化	26
1.5.3 路由与资源分配问题	28
1.5.4 生存性问题	30
1.5.5 经济性规划方法	32
1.5.6 业务流量预测	36
1.5.7 网络评估技术	38
1.6 本章小结	39
参考文献	39
第 2 章 光网络规划与优化原理	40
2.1 网络规划与优化概述	40
2.1.1 基本概念	40
2.1.2 网络规划的目标	41
2.1.3 一般网络模型	42
2.2 网络规划的一般方法	43

2.2.1	规划时间：长期、中期、短期	43
2.2.2	单期/多期规划	47
2.2.3	绿地规划/非绿地规划	50
2.3	光网络规划与优化流程	51
2.3.1	规划流程	51
2.3.2	优化流程	64
2.4	业务需求预测	65
2.4.1	问题概述	65
2.4.2	体系及预测模型	66
2.4.3	业务等级	68
2.5	传送网的拓扑设计	69
2.5.1	传送网的物理拓扑设计	70
2.5.2	传送网的逻辑拓扑设计	70
2.5.3	虚拓扑重构问题	72
2.6	传送网分层网络设计	72
2.6.1	业务层的规划	74
2.6.2	ASON 层的规划	76
2.6.3	SDH 层的规划	82
2.6.4	WDM/OTN 层的规划	83
2.6.5	光缆层的规划	85
第 3 章	光网络的资源优化技术	86
3.1	网络优化的内容	86
3.1.1	传送网现状及存在的问题	86
3.1.2	网络优化的含义与目标	87
3.1.3	传输网优化策略的指导思想	88
3.1.4	网络优化内容	88
3.2	路由优化	91
3.2.1	光缆物理路由优化	92
3.2.2	静态路由算法	95
3.2.3	动态路由算法	98
3.2.4	动态算法性能比较	102
3.3	生存性优化	110
3.3.1	光网络的生存性	110
3.3.2	光网络的生存性技术	112
3.3.3	联合生存性策略	116
3.4	光网络组网的经济性优化分析	117
3.4.1	光网络经济性分析概述	117
3.4.2	光网络组网成本的主要构成	118

3.4.3	光网络经济性模型及组网方式分析	122
3.4.4	基于改进蚁群的 WDM 网络经济性规划方法	123
	参考文献	129
第 4 章	传输网络分析评估技术	130
4.1	网络评估介绍	130
4.1.1	网络评估的背景与必要性	130
4.1.2	网络评估优化流程	131
4.2	网络评估指标	132
4.2.1	评估指标分类	132
4.2.2	指标体系建立	132
4.3	网络评估分析方法	135
4.3.1	常用方法概述	135
4.3.2	组网评估	136
4.3.3	业务评估	138
4.3.4	生存性评估	145
4.3.5	网络综合层次评估	146
4.4	网络评估软件系统	162
4.5	本章小结	165
	参考文献	165
第 5 章	多层联合网络规划与优化技术	166
5.1	概述	166
5.1.1	网络结构的演进	166
5.1.2	网络扁平化的趋势	168
5.2	多层规划方法	168
5.2.1	整体优化法	168
5.2.2	顺序优化法	169
5.3	多层规划问题建模	170
5.3.1	问题的描述	171
5.3.2	约束因素和可能的策略	172
5.4	多层网络规划中涉及的问题	173
5.4.1	路由问题	173
5.4.2	生存性问题	175
5.5	IP over WDM 网络的规划问题	177
5.5.1	交互模型	177
5.5.2	联合路由	179
5.5.3	联合生存性	192
5.6	其他网络多层联合规划方法与策略	210
5.6.1	跨层、跨域的联合优化	210

5.6.2 业务分层规划	210
5.7 本章小结	212
参考文献	212
第6章 城域分组传送网规划与优化	215
6.1 分组传送网结构特征	218
6.1.1 分组传送网中的层次化架构	218
6.1.2 分组传送网中的 OAM (操作、维护与管理信息)	219
6.1.3 分组传送网接口	221
6.2 T-MPLS/MPLS-TP 数据面技术	222
6.2.1 T-MPLS 网络结构	224
6.2.2 节点功能结构	226
6.2.3 分组交换和转发单元	226
6.2.4 标签处理过程	227
6.2.5 T-MPLS 信号适配与传输接口	230
6.2.6 T-MPLS 保护与恢复自愈技术	232
6.2.7 T-MPLS 网络 OAM 技术	236
6.3 T-MPLS/MPLS-TP 管理面技术	240
6.3.1 T-MPLS 管理面需求	240
6.3.2 T-MPLS 设备管理功能	240
6.3.3 T-MPLS 故障管理功能	241
6.4 T-MPLS/MPLS-TP 控制面技术	242
6.4.1 T-MPLS 控制平面需求	242
6.4.2 T-MPLS 的控制平面进展	243
6.5 PTN 的分组同步技术要求	245
6.5.1 PTN 承载 CES 业务的同步要求	245
6.5.2 PTN 的频率同步要求	247
6.5.3 PTN 的时间同步要求	250
6.6 T-MPLS 到 MPLS-TP 的历程	254
6.6.1 T-MPLS 面临的问题和 MPLS-TP 的标准化	254
6.6.2 MPLS-TP 分组传送网的体系架构	255
6.6.3 MPLS-TP 技术介绍	258
6.7 基于以太网的分组传送技术	262
6.7.1 PBB 技术	263
6.7.2 PBT 技术分析	265
6.8 组网模型	269
6.8.1 分组传送平面和 MSTP 传送平面的联合组网	269
6.8.2 PTN 组网模型	271
6.9 本章小结	276

参考文献	277
标准与规范	277
第7章 光接入网规划与优化	279
7.1 光接入网现状及发展趋势	279
7.1.1 光接入网概述	279
7.1.2 有源光网络简介	281
7.1.3 无源光网络技术	282
7.1.4 下一代光接入技术	287
7.1.5 光与无线融合接入	294
7.2 光接入网规划与优化	298
7.2.1 概述	298
7.2.2 接入段光缆规划	299
7.2.3 拓扑结构分析	304
7.2.4 PON 规划与优化算法介绍	307
7.3 EPON 运行维护	317
7.3.1 运维的要求和指导原则	317
7.3.2 EPON 运维的监测/测试项	318
7.3.3 EPON 故障定位	320
7.4 本章小结	324
参考文献	324
第8章 网络模拟与网络仿真工具	326
8.1 概述	326
8.1.1 网络模拟与仿真技术概述	326
8.1.2 VPI 公司软件简介	327
8.1.3 OPNET 公司软件简介	329
8.1.4 UC Berkeley 公司软件介绍	330
8.1.5 小结	331
8.2 OPNET 网络仿真 (ASON)	332
8.2.1 ASON 仿真系统实现的功能	332
8.2.2 ASON 仿真系统的设计及实现	333
8.2.3 小结	342
8.3 WDM 超长距离仿真软件	342
8.3.1 OpticSimu 光传输仿真软件	342
8.3.2 仿真实例	344
8.4 传输网规划与优化软件	352
8.4.1 传输网规划与优化软件	352
8.4.2 传输网规划与优化软件功能概述	353
8.4.3 软件的总体架构和各功能模块	354
缩略语	364
参考文献	373

第 1 章 光网络的发展与规划

随着互联网与物联网技术的飞速发展，传送网的规模不断扩大，业务种类不断增多，组网模式日益复杂。为了适应这种变化，光网络也正朝着更加高速、智能、灵活、透明、优质和安全的方向加速演进。

本章首先介绍了光网络的基本概念和构成，给出了光网络近年来的特征和发展趋势，回顾了近年来光网络的发展历程，并对其涉及的关键技术进行了探讨，同时介绍了当今国内外对光网络的研发概况，最后着重对光网络的规划与优化问题进行了重点阐述。

1.1 光网络基本概念与构成

1.1.1 光网络的基本概念

21 世纪之初，网络泡沫的破灭使全球电信业陷入空前的困境，光纤通信首当其冲。幸运的是，电信的内在需求没有根本改变，人们没有少打电话，也没有少上网，移动短信业务如火如荼，网络电视（IPTV）业务蓄势待发，电信业务市场仍然继续成长，全球网络带宽需求的年增长率依然高达 50%~100%，我国在过去几年里的干线业务量和带宽需求的年增长率也超过了 200%。显然，当前的困境只是放慢了发展的速度，绝不会也不可能停止电信技术和业务的发展。电信业经过几年的调整后正开始步入正常的理性发展轨道。

从光纤通信技术本身的发展看，光网络是当前最活跃的领域。然而，“光网络”不是一个严格意义上的技术术语，而是一个通俗用语。光网络（Optical Network）是一个简单通俗的名称，包容十分广泛。仅从字面上理解，它兼具“光”和“网络”两层含义：前者代表由光纤提供的，大容量、长距离、高可靠的链路传输手段；后者则强调在上述媒质基础上，利用先进的电子或光子交换技术，引入控制和管理机制，实现多节点间的联网，以及针对资源与业务的灵活配置。从历史上看，光网络可以分为三代。第一代光网络中光仅仅是用来实现大容量传输，所有的交换、选路和其他智能化的操作都是在电层面上实现的，SDH 就是这种第一代光网络中的典型代表，而光传送网（OTN）和全光网络（AON）可以认为是第二代光网络。OTN 在功能上类似于 SDH，其出发点是在子网内实现透明的光传输，在子网边界处采用光/电/光（O/E/O）的 3R 再生技术，从而构成一个完整的光网络，而 AON 则不同，此时传送、复用、选路、监控和有些智能将在光层面上实现。从更广义的角度看，光网络还应该覆盖城域网和接入网领域，这两个领域的光网络则不仅具有更加丰富多彩的技术选择，而且技术特征上也有很大的不同。最近几年，OTN 和 AON 又由于器件和交换技术的不断完善，包括智能光网络的发展，而又成为研发的热点之一。第三代光网络则应该为以自动交换光网络（ASON）为代表的智能光网络。智能化的 ASON 在

ITU-T 的文献中定义为：通过能提供自动发现和动态连接建立功能的分布式（或部分分布式）控制平面，在 OTN 或 SDH 网络之上，实现动态的、基于信令和策略驱动控制的一种网络。

1.1.2 光网络的基本构成

光网络由光传输系统和在光域内进行交换/选路的光节点构成，光传输系统的容量和光节点的处理能力非常大，电子处理通常在边缘网络进行，边缘网络中的节点或节点系统可采用光通道通过光网络进行直接连接，如图 1.1 所示。

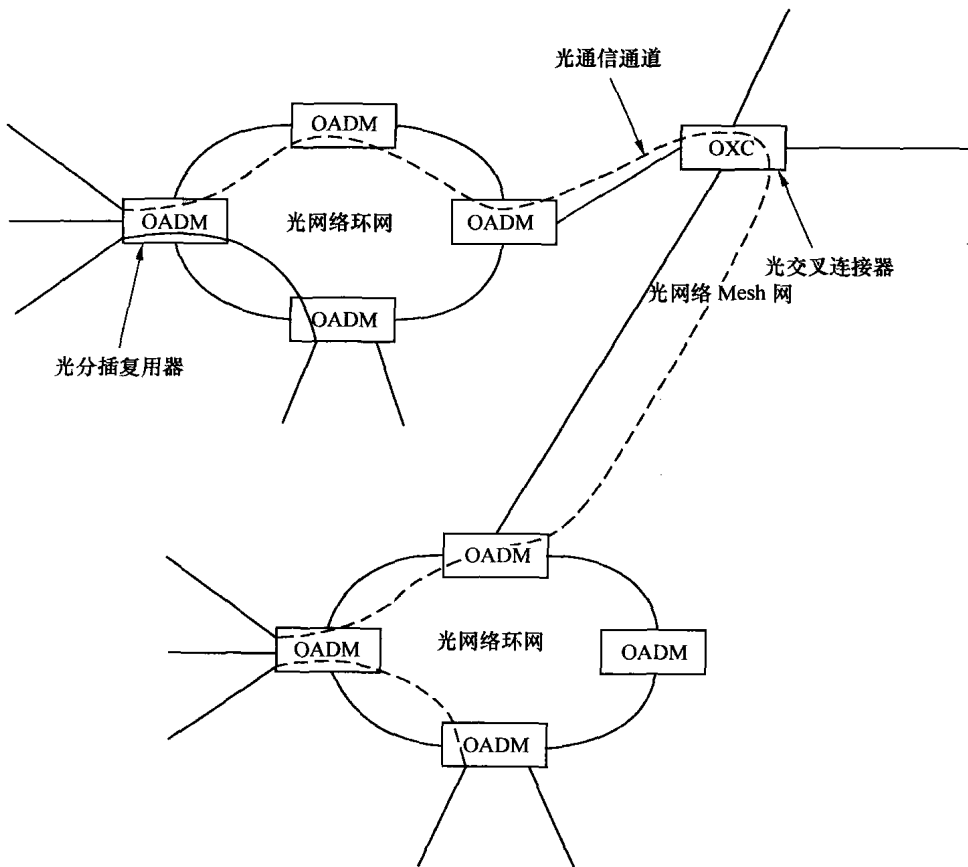


图 1.1 多波长光网络网络结构示意图

光网络节点（ONN, Optical Network Node）提供了交换和选路功能，它们控制、分配光信号的路径和创建希望的源和目的之间的连接。网络中的光电和光子器件主要集中在业务上路和下路节点上，主要有激光器、检测器、耦合器、光纤、光交换和放大器等。这些器件同光纤一起协同工作以产生某个连接所需要的光信号。这些潜在的光电和电子技术目前还没有很好地得到发展，因此还不很成熟，也没有像电器件那样的便宜。但是这些领域正在不断取得巨大的进步，随着相关光子技术的逐渐成熟，组建规模较大的光网络在经济上必将是可行的。

随着波长/光分插复用器 WADM/OADM（Optical Add/Drop Multiplexer）和波长/光交

又连接器 WXC/OXC (Optical Cross-connector) 技术的成熟, 当与 WDM 技术相结合后, 不但能够从任意一条线路中任意上下一路或几路波长, 而且可以灵活地使一个节点与其他节点形成连接, 从而形成 WDM 光网络。另外, 动态、可重构型 OADM 和 OXC 能够使 WDM 光网络对不同输入链路间的波长在光域上实现交叉连接和分插复用的动态重构能力, 增加网络对波长通道的灵活配置能力, 提高网络通道的使用效率。总之, OADM 和 OXC 的使用使得光纤通信逐渐从点到点的单路传输系统向 WDM 联网的光网络方向发展。多波长光网络的基本思想是, 将点到点的波分复用系统用光交叉互连节点和光分插复用节点连接起来, 组成以端到端为基础的光传送网。波分复用技术完成 OTN 节点之间的多波长通道的光信号传输, OXC 节点和 OADM 节点则完成对光通道的交换配置功能。OXC 相当于一个模块, 它具有多个标准的光纤接口。图 1.2 所示为两种基于空间光开关矩阵和波分复用/解复用器对的 OXC 结构, 它们利用波分解复用器将链路中的 WDM 信号在空间上分开, 然后利用空间光开关矩阵在空间上实现波长交换, 完成空间变化后各波长信号直接经波分复用器复用到输出链路中, 结构 (a) 中无波长变换器, 因此它只能支持波长通道。结构 (b) 中每个波长的信号经过波长变换器实现波长交换后, 再复用到输出链路中, 因此它支持虚波长通道。OXC 可以把输入端的任一光纤信号 (或其各波长信号) 可控制地连接到输出端的任一光纤 (或其各波长) 中去, 并且这一过程是完全在光域中进行的。通过使用光交叉连接设备, 可以有效地解决现有数字交叉连接 (DXC) 设备中的电子“瓶颈”问题。

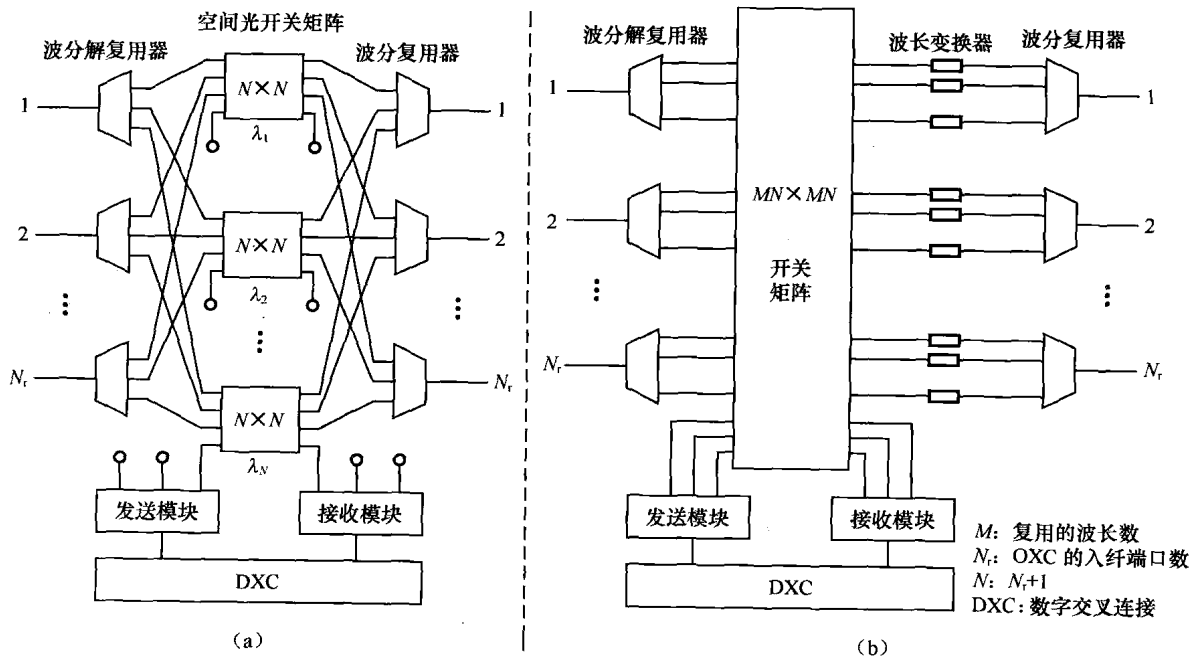


图 1.2 两种基本的 OXC 结构

OADM 是构成全光网的重要器件，使用 OADM 可以减少光通道上信息的处理和等待时间，减少节点设备的复杂性，还可以使光信号透明地传输和上下路，特别是应用在光环网上，还增加了生存性。OADM 的主要功能是从传输设备中有选择地下路（DROP）通往

本地的光信号，同时上路（ADD）本地用户发往另一节点用户的光信号，而不影响其他波长信道的传输。如图 1.3 所示，OADM 在节点上对上下路波长进行复用和解复用处理，通过节点的波长同样在光层进行一次复用和解复用过程。从功能上看，OADM 可以看作是 OXC 的特例。

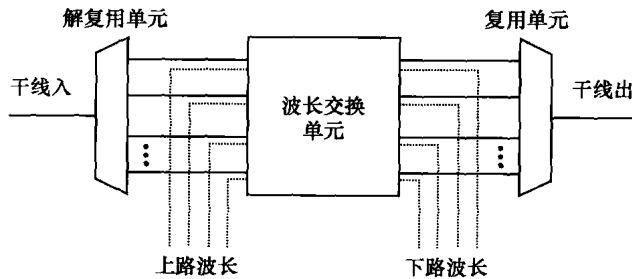


图 1.3 OADM 结构示意图

以上所述的光网络节点也称为固定光分插复用器（FOADM），它仅能实现固定波长上下，在上下波长改变时，需更换设备，升级困难，因此随着光器件的发展，近年来出现了灵活波长上下的可重构分插复用（ROADM）设备。它可灵活地进行波长调度，节点的集成度提高，ROADM 设备已经开始商用。

从器件实现方式上来分，目前有波长阻断（WB）型、波长选择开关（WSS）型和集成平面光波电路（PLC）型 ROADM 3 类 ROADM 器件。其中，WB 是通过设置器件的不同波长的阻断/直通状态实现 ROADM 中波长上路/直通设置。WSS 是通过设置器件的不同波长上/下路的端口实现 ROADM 中波长上下路设置。PLC ROADM 与 ROADM 最初思路类似，用 DEMUX + 光开关 + MUX 实现，通过设置光开关的状态进行波长上路/直通设置。与以前不同的是，光开关是用 PLC 技术，将 DEMUX + 光开关 + OMU 全部集成在光波导上实现。下面简略介绍。

1. 波长阻断（WB，Wavelength Blocker）型 ROADM 器件

波长阻断型 ROADM 可将任意波长阻断，通过其他波长并使之功率均衡，如图 1.4 所示。目前 WB 实现技术主要为基于自由空间的体光栅和液晶技术。一般 WB 器件与耦合器、AWG 型的分波器（OMU）和合波器（ODU）配合实现 ROADM 功能。如图 1.5 所示。

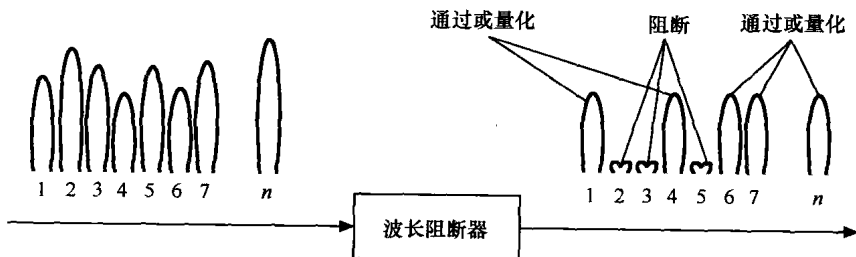


图 1.4 波长阻断型 ROADM 原理

2. 波长选择开关（WSS，Wavelength Selective Switch）型 ROADM 器件

WSS 型 ROADM 首先把波长分开，然后经过独立的衰减器和切换开关。通过独立的衰

减器可以对每一个波长进行功率调整。通过切换开关可以把任意一个波长指配到任意一个输出端口。由于图 1.6 所示的 9 个输出端口任一波长均可输出，一般称 WSS 的端口为 colorless。实现原理如图 1.7 所示。

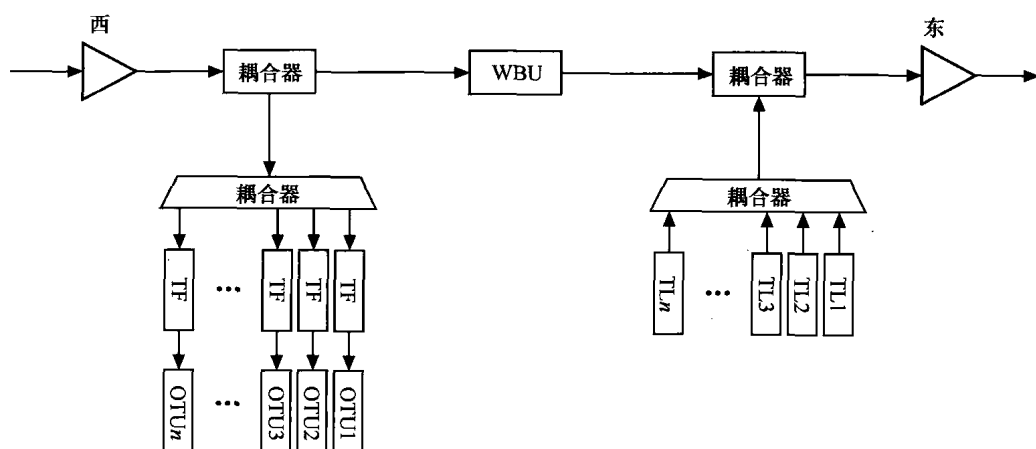


图 1.5 WB 型 ROADM 模块

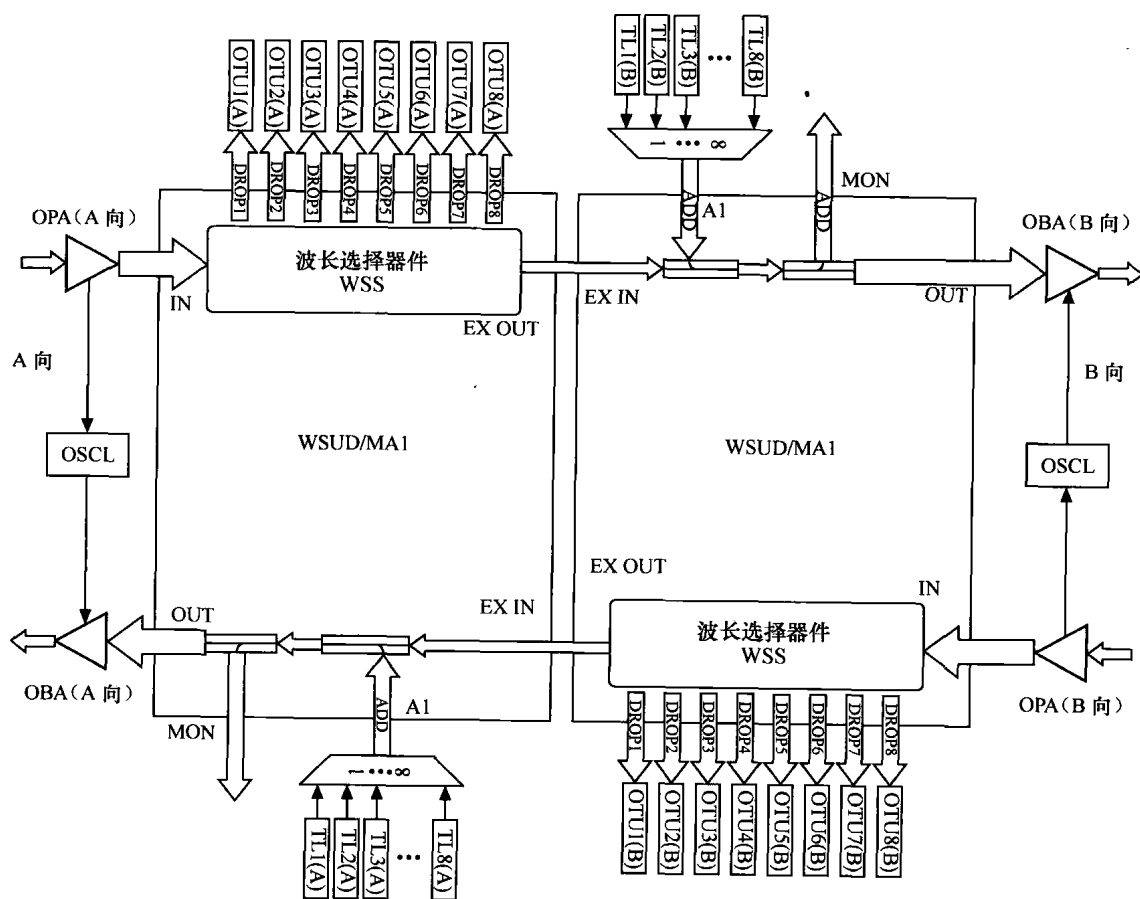
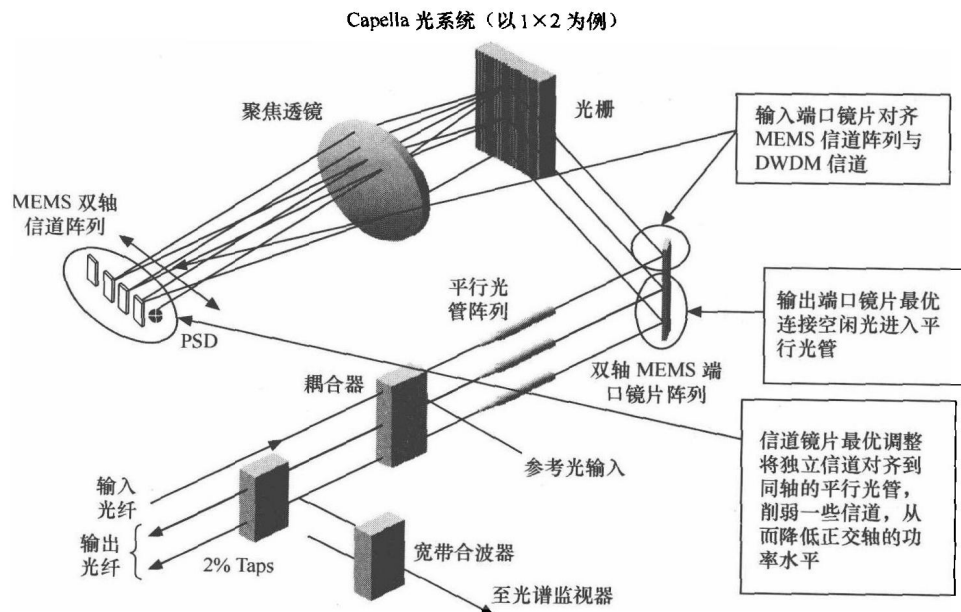


图 1.6 WSS 型 ROADM 模块



一般, WSS 与耦合器、耦合型 OMU 配合实现 ROADM 功能。

3. 集成平面光波电路 (PLC) 型 ROADM 器件

PLC 型 ROADM 将公共输入光从功率上分成下路光和直通光两部分, 如图 1.8 所示。直通输入光利用解复用器将各波长分开, 用光开关选择直通光或上路光通过, 经光开关选择后的各波长光再经复用器合波后输出到公共输出口。PLC 型 ROADM 采用平面波导技术实现, MUX 和 DEMUX 为 AWG。

