

IT 先锋系列丛书

光网络与波分复用

OPTICAL NETWORKING & WDM

Walter Goralski 著
胡先志 罗杰 胡佳妮 等译

Mc
Graw
Hill Education

人民邮电出版社
POSTS & TELECOMMUNICATIONS PRESS

IT 先锋系列丛书

光网络与波分复用

Walter Goralski 著

胡先志 罗 杰 胡佳妮 等译

人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

光网络与波分复用 / 戈拉尔斯基 (Goralski, W.) 著. 胡先志等译. —北京:

人民邮电出版社. 2003.1

(IT 先锋系列丛书)

ISBN 7-115-10809-9

I. 光… II. ①戈… ②胡… III. ①光纤通信—通信网②光导纤维通信系统

IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 095115 号

IT 先锋系列丛书

光网络与波分复用

-
- ◆ 著 Walter Goralski
译 胡先志 罗杰 胡佳妮 等
责任编辑 梁凝
 - ◆ 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 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
读者热线 010-67129258
北京汉魂图文设计有限公司制作
北京顺义振华印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 800×1000 1/16
印张: 27
字数: 578 千字 2003 年 1 月第 1 版
印数: 1-4 000 册 2003 年 1 月北京第 1 次印刷
著作权合同登记 图字: 01-2002-2457 号

SBN 7-115-10809-9/TN • 1942

定价: 45.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

版 权 声 明

Walter Goralski

Optical Networking & WDM

ISBN: 0-07-213078-4

Copyright©2001 by the McGraw-Hill Companies, Inc

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education(Asia)Co. and Posts and Telecommunications Press.

本书中文简体字翻译版由人民邮电出版社和美国麦格劳-希尔教育（亚洲）出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司激光防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2002-2457 号

译者的话

光纤、光放大器、波分复用和光分/插复用等关键技术的相继问世，使通信领域中发生了一场又一场技术革命。光纤具有巨大的带宽资源，成为光纤通信的首选光传输媒质；光放大器替代了光—电—光中继器，实现点到点的全光通信；波分复用不仅使单根光纤的传输容量增加几倍、几十倍乃至几百倍，而且实现了多种不同类型的通信业务同时在一根光纤上传输；光分/插复用实现了信息在光域上的传送、路由的选择与交换，因此避免出现电子瓶颈的影响，完全满足了未来通信的高速率、大容量的要求。今天，业内人士深信，现在的通信网会逐渐升级到全光网。全光网是一个真正对所传输的 SDH、IP、ATM 等业务透明的网络。特别是波分复用全光网络采用灵活的波长选路由，具有动态资源配置能力，可以实现网络的动态重构，所以全光网是通信网络升级的最佳方案，而光纤到户这个愿望也即将成为现实。

为了满足光网络日新月异的发展需要，受人民邮电出版社的委托，我们集体翻译了这本《光网络与波分复用》专著，以使我国广大从事通信工作的读者能对构筑光网络的光通信基本概念、光纤结构、光器件工作原理、光网络结构原理和组网技术等有所了解。

本书的作者 Walter Goralski 是数据通信领域的专家。他长期从事数据通信研究工作，撰写了很多有关数据通信技术方面的书籍。由于作者具有很深的理论造诣和丰富的实践经验，同时，他具有很好的文学功底，我们在翻译本书的过程之中受益匪浅。

本书由浅入深，从原始光通信讲起，介绍了光纤通信原理及光纤、光器件、光传输设备，然后又阐述了采用光纤、光放大器、波分复用和光分/插复用器等关键技术组成的光网络，以及日渐成熟的 IP 光网络与吉比特光以太网，帮助读者迅速了解和掌握波分复用与光网络的最新技术。最后，为读者阅读时方便，在本书的附录中，作者给出了光缆基本结构、缩略语表等。

本书的翻译分工为：胡先志（第 1~4 章和参考文献），胡佳妮（第 5、6 章），彭浩（第 7 章），陆玉喜（第 8 章），罗杰（第 9、10 章），陈汉林（第 11、12 章），陈肖洁（第 13 章），文江川（第 14 章），范志强（第 15 章），刘琼（第 16 章），阎阔（第 17 章）。参加本书校对工作的有胡先志、罗杰、陆玉喜、魏小萌等。全书最后由胡先志统一修改定稿。

本书介绍的是光网络和波分复用中的全新技术。鉴于译者业务水平有限，译文中难免有一些谬误和不足，敬请读者批评指正。

译者

2002 年 5 月 6 日于武汉

内 容 提 要

本书详细地介绍了目前光纤通信中的最新技术——光网络与波分复用。书中对光网络与波分复用所涉及到的光纤、光发射机和光接收机、光传输系统、SONET/SDH、WDM 和 DWDM、光网络节点、SONET/SDH 转移、光网络与 ATM、光网络与 IP、光纤 LAN 以及吉比特以太网等内容作了全面的论述。本书的特点是内容新颖、翔实，语言简炼，图表清晰、直观。

本书从原始光通信入手，在对光纤通信中的光纤、器件和光纤系统进行一一阐述后，进而转入了本书的重点——光网络与波分复用的讨论。因此，本书是一本十分难得的全面介绍光网络和波分复用技术的专著。

本书可供光纤通信领域中科研、生产、施工、维护等方面的技术人员参考使用，也可供大专院校通信专业的师生作为教学参考书。

前 言

通信技术将向何处发展呢？以太网作为遍布世界的 LAN 的主要技术，其速率已远远超过 10Mbit/s 甚至 100 Mbit/s。现在，吉比特以太网（GBE）的春风已吹入 1Gbit/s 速率的 MAN 和 WAN，而且它的速率不久将达到 10Gbit/s。Qwest 作为一个拥有相当数量光纤路由和一个从不自夸的公司，开始了其新的契机。Qwest 已与 US west 合并（或者说它并购了 US West，这取决于人们的敏感程度）。US west，过去曾是一度强大的 Bell 公司体系中一个引以为荣的部分。Enron 一改不久前只是一个电力公司的形象，现在它赢来了通信巨人的称号。新的 Yipes 载波通信公司计划提供给用户的 LAN 连通速率为 1~80 Mbit/s，而且，能以 1Mbit/s 为步长递增。Sun 微系统公司计划在通信中直接使用光纤链路，其理由是传统的 SONET 光纤链路价格昂贵，而且配置链路需要花费太长的时间。同时 Sun 的工作人员都非常熟悉那种典型的 LAN 的体系结构——把 IP 包封装到以太网帧中在光缆上传送。SONET 设备厂商 Lucent 和 Nortel 不会袖手旁观，它们已将 SONET 的速率（国际上等同于 SDH）提高到 40Gbit/s，即 OC-768。Lucent 已在市场销售 Warestar-Opticair 自由空间激光系统，该系统无需任何光纤，就可以以 10Gbit/s 速率使传输的距离大于 5km。

任何地方的学生们在学校只需要花几分钟的时间就可从因特网或 Web 上下载免费音乐。可是在不久之前，仅传输 1 兆比特信息就会占用整个网络 1 小时的时间。这只是最近网络和网络工作情况变化的一个缩影。

是什么促使了所有这些变化的发生呢？是光网络出现和密集波分复用（DWDM）的成功。采用光纤传输和链路处理的通信设备的发展，使得上述的所提到的情况都已成为可能。当看到这些亮点时，人们并不惊讶，至少从技术角度来看是如此。GBE 已经告诉我们，现代光纤系统不需要进行转换或与传统的“长途”载波和网络技术结合，就能承载 40km 甚至更远的 LAN 通信传输流量。Qwest 公司的成功业已证明，谁拥有了最大带宽（不要拘泥于话音网络规则的限制），谁就是赢家。Enron 公司则证明了，光纤系统所达到的水平是以往通信系统完全无法比拟的。Yipes 公司则说明了，浮现出来的光技术已使通信领域比以前更加开放。Sun 公司已证明，当新的光纤系统能直接方便地提供 IP 业务时，像 SONET 这样的话音载波系统就几乎不再有存在的必要了。Nortel 公司指出，SONET 恰好可以在新的光通信领域中找到其合适的位置。Lucent 公司证实，光网络无需受以往通信方式的制约。可以肯定地说，至少在可以预见的将来，任何地方的人（并不仅是学生）都将会享用到不断增加的带宽。

从本质上讲，本书所论述的都是带宽问题。不过是一种特殊形式的带宽，这些带宽是由 DWDM 技术来提供的，DWDM 是一种新的光网络技术，它将光波耦合复用到一根光纤中，

从而可更为有效地提供带宽。服务提供商看到了各地用户对增大带宽的迫切需求。在许多情况下，谁能以最低价格提供最大的带宽，他就会在竞争中处于领先地位。设备供应商面临着一个局面，即像许多观察家所预见的那样，当未来几年 SONET 和 SDH 设备的需求量的综合年增长率（CAGR）分别为 7% 和 14% 时，DWDM 设备的需求量有望达到 45% 的综合年增长率。这是竞争的预兆，要么迅速地增加带宽，要么被淘汰出局。

《光网络与波分复用》一书研究全新的光网络和 DWDM 的一切概念。本书是为那些至少具有一些计算机和通信技术基础知识的读者而写的，同时也可作为对计算机和通信技术有兴趣的一般读者和有关专家的参考书。进入光网络领域，读者需要学习一些新的东西。本书首先分析电和光传输之间的基本区别，接着探讨在早期的光网络中怎样使用光纤链路，包括后来在光纤链路的两端一直使用的全电网络设备。接下来，本书介绍了广域光网络，其中将特别强调用于 IP 包传输的最佳光纤系统。再接着拓展到对局域网的介绍，在局域网领域中，已开始取得一些激动人心的研究成果，本书还将讲述在家庭网络中光纤到户的应用。最后，本书密切注视未来的发展，特别重要的是无光纤的无线网络系统有望提供越来越大的带宽。

除此之外，本书将详细展现给读者的内容有：光在光纤中是怎样传输的，光缆是如何构成的，光发射机、光接收机和光放大器是怎样工作的，DWDM 是如何工作的，光交叉和光交换怎样工作以及其他大量内容。现在让我们清醒地看到，这就是网络的未来。

作者简介

Walter Goralski 在数据通信领域拥有 30 多年的从业经验，其中包括在 AT&T 工作了 14 年。他现在是“Juniper 网络”高级课程的开创者。同时，他也是畅销书《SONET》（第二版）、《ADSL》、《VoIP》、《ATM》和《帧中继》等书的作者。他还撰写了许多有关数据通信及其相关问题的文章。

致 谢

世界上没有任何人工作和生活在真空中。我要感谢对本书的出版给予帮助的人们和研究小组。

我十分感谢我以前工作过的 Hill Associates, Inc., 它为我提供了良好的工作环境。在该环境中, 个人的成长始终得到鼓励, 而且它还营造一种氛围, 在其中永远把写像这样一本书所需的知识放在首位。我应该特别感谢 Dave Hill, 他不仅聘用了我, 而且认可光网络, 并总是成功地带来令我关注的新的研究成果。

我也应感谢现在的老板 (Juniper Networks 公司), 他鼓励我继续我的写作工作。在 Juniper 的工作气氛总是最激动人心的, 并且对所有新技术保持着发现和探索的感觉。

我感谢许多在过去几年我所接触到的人, 他们花时间向我介绍了他们的工作, 并指出了我对许多问题的错误理解, 这些问题在当时超出我的理解能力。我还需要感谢的是富士通公司的 Dave Beebe 先生、阿尔卡特公司的 Dewayne Bridges 先生和 Randy Ellis 先生, 以及朗讯技术公司的 Eric Spurrier 先生。

在本书的出版时, 得到了 Stere Elliot 先生的鼓励。McGraw-Hill 公司, 以他们一贯的高效率在本书出版过程中给予了始终如一的支持。

客观上讲, 我的孩子 Chris、Alex 和 Ari 接受了我作为一个作者的角色。我的孩子们甚至向他人提起这个事实。实际上, 我的作者之梦已经成为现实。最后, 我更应尽自己所能来表达对 Camille 女士的谢意, 她长期不懈地向我展现生活真谛之所在。感谢你们大家。

书评作者简介

Gary Kessler 是佛蒙特 Burlington Champlain 学院计算机网络规划的助理教授和项目协调人。同时，作为一位网络顾问，他经常给网络杂志投稿。而且他还是畅销书《ISDN：概念、设备和服务》的作者。

目 录

第1篇 电 和 光

第1章 电传输系统	2
1.1 最初的光网络	2
1.2 电报传输	7
1.3 电话传输	12
1.4 载波系统	16
1.4.1 模拟载波系统	16
1.4.2 数字载波系统	19
1.5 局域网	22
第2章 光纤基础	27
2.1 光网络定义	27
2.2 导光	28
2.3 使光通过玻璃	32
2.3.1 光纤的优点	36
2.3.2 光纤的缺点	40
2.4 光纤连接器	41
2.5 光纤制造	44
2.5.1 外气相沉积法 (OVD)	46
2.5.2 气相轴向沉积法 (VAD)	47
2.5.3 改进的化学气相沉积法 (MCVD)	47
2.5.4 等离子激活化学气相沉积法 (PCVD)	48
2.6 光纤类型	48
2.6.1 多模阶跃折射率光纤	49
2.6.2 多模渐变折射率 (GRIN) 光纤	50
2.6.3 单模光纤	50
2.7 色度色散与波导色散	51
2.8 色散位移光纤	53

第3章 光发射机和光接收机	56
3.1 简单的光纤线路	56
3.2 再生中继器	58
3.3 波长	61
3.4 光纤与工作波长	63
3.5 激光器与LED	65
3.6 光接收机	69
3.6.1 PIN 二极管	70
3.6.2 雪崩光电二极管 (APD)	71
3.6.3 其他类型的接收机	73
第4章 光传输系统	75
4.1 LAN 中的光纤	75
4.1.1 FDDI	77
4.1.2 10Base-F 以太网和 100Base-FX 以太网	79
4.1.3 吉比特和 10 吉比特以太网	82
4.1.4 光纤通路	83
4.2 WAN 中的光纤	85
4.2.1 电话干线系统	85
4.2.2 接入网	87
4.2.3 有线电视系统	88
4.3 军事和工业用的光纤	91
4.4 MAN 和功率预算	91
4.5 计算光功率预算	93

第2篇 光纤和电节点

第5章 SONET/SDH	102
5.1 SONET/SDH 体系结构和协议	102
5.1.1 SONET/SDH 速率	103
5.1.2 STS-1 帧结构	105
5.1.3 SDH 帧结构	107
5.1.4 SONET 体系分层	108
5.1.5 SDH 分层	110

5.1.6	SONET 中的“超速率净荷”	111
5.1.7	STS-3c (OC-3c) SPE	112
5.1.8	低速率 SONET 净荷 (VT)	114
5.1.9	其他的 SONET/SDH 净荷	115
5.2	SONET/SDH 网元 (NE)	116
5.3	SONET/SDH 环	118
5.3.1	SONET/SDH 环基础	119
5.3.2	单向与双向	120
5.3.3	2 纤与 4 纤环	121
5.3.4	线路倒换与通道倒换	122
第 6 章	WDM 和 DWDM	125
6.1	单波长的限制	125
6.1.1	小串行比特间隔	125
6.1.2	特定速率中继器	127
6.1.3	昂贵的新光纤路由	127
6.2	WDM 和 DWDM 成为可能	128
6.2.1	光网络专用光纤	129
6.2.2	掺铒光纤放大器	132
6.2.3	在 1550nm 工作的可调激光二极管	135
6.2.4	光纤布拉格光栅	139
6.3	WDM	141
6.4	DWDM 介绍	142
6.4.1	DWDM 损伤	143
6.4.2	ITU DWDM 波长间隔	146
第 7 章	光网络节点	148
7.1	光分插复用器	148
7.2	光交叉连接	150
7.3	光转发器	153
7.4	构建整体光网络	154
7.5	光交换体系	156
7.5.1	MEMS (微电子机械系统)	157
7.5.2	热光波导	158
7.5.3	气泡交换	159

7.5.4 液晶交换	159
7.5.5 非线性克尔效应光开关	160
7.6 光路由器	162
7.7 光环路	164
7.8 波长和 SONET/SDH	165

第3篇 广域光网络

第8章 SONET/SDH 的演进	168
8.1 使 DWDM 增值	168
8.2 SONET/SDH 开销	169
8.2.1 SONET 开销	169
8.2.2 SDH (和 OC-3c) 开销	175
8.2.3 SDH 和 SONET 开销比较	176
8.3 把握发展方向	177
8.3.1 G.975 和 FEC	177
8.3.2 数字包封与光网络	178
8.4 为什么要抛弃 SONET/SDH	180
8.4.1 部分光传输	180
8.4.2 动态带宽传输	181
8.4.3 突发性带宽	181
8.4.4 光虚拟专用网络	181
8.4.5 可变带宽用户连接	182
8.4.6 市场区别	182
8.5 传统话音的重要性	182
8.5.1 虚拟支路	183
8.5.2 VTG 内部	185
8.5.3 VT 的结构	186
8.5.4 VT1.5 超帧	188
8.5.5 其他 VT 类型的映射	189
8.6 SONET/SDH 向光网络演进	191
第9章 光网络和 ATM	193
9.1 ATM 的缺陷是什么	193
9.2 ATM 的基础	195

9.2.1 怎样用 ATM 建网	196
9.2.2 ATM 的复用	198
9.2.3 宽带 ISDN (B-ISDN) 和 ATM	200
9.3 ATM 虚通道和虚通路	202
9.4 ATM 信令协议	203
9.5 ATM 的危机: B-ISDN 的市场在哪里	203
9.6 ATM 局域网模拟 (LANE)	204
9.7 ATM 上的多协议 (MPOA)	206
9.8 ATM 何去何从	208
9.9 光网络中的 ATM	209
第 10 章 光网络和 IP	212
10.1 因特网协议簇	213
10.1.1 因特网和 TCP/IP	215
10.1.2 TCP/IP 的起源	215
10.1.3 TCP/IP 体系	217
10.1.4 IP 包头	221
10.2 路由器和交换机	223
10.3 MPLS: IP 中的交换	225
10.4 MPLS 光控通道	227
10.5 将 IP 包引入 DWDM	228
10.6 光路由器	230

第 4 篇 局 域 网

第 11 章 光纤局域网和光网络	234
11.1 光纤分布数据接口	234
11.2 光纤通道	241
11.3 SAN/LAN/MAN	245
11.4 用 DWDM 测试 FDDI 和 FC	246
11.4.1 误码率	247
11.4.2 损耗测试	247
11.4.3 光回波损耗和反射比	248
11.4.4 光信噪比 (OSNR)	248
11.4.5 放大器的增益	249

11.4.6 中心波长和漂移	249
11.4.7 串扰	250
11.4.8 非线性损伤	250
第 12 章 吉比特以太网和光网络	252
12.1 神奇的以太网	252
12.1.1 什么使以太网成为以太网	253
12.1.2 研究一个例子: 100VG-AnyLAN	253
12.2 光以太网——吉比特以太网	256
12.2.1 使用 GBE	257
12.2.2 GBE 帧	260
12.3 10 吉比特以太网	261
12.3.1 LAN 侵入 WAN	262
12.3.2 GBE、10GBE 和光网络	263
12.4 有了 GBE、10GBE, 还需要什么	269

第 5 篇 驻地光网

第 13 章 数字有线电视网络	272
13.1 有线电视的历史	272
13.2 过去有线电视就是指同轴电缆	276
13.3 混合光纤——同轴电缆 (HFC) 有线电视	277
13.4 电缆调制解调器	280
13.5 无源光网络 (PON)	284
13.6 数字电视 (DTV)	285
13.7 有线电视和光网络	287
第 14 章 电话与光纤到户	291
14.1 美国今天公共交换电话网	291
14.1.1 PSTN	292
14.1.2 运营商的情况	294
14.2 环路中的光纤	297
14.3 数字用户线 (DSL) 和数字环路载波 (DLC)	300
14.4 无源光网络 (PON) 和光纤到户 (FTTH)	305
14.5 电话网和光网络	306