

现代光通信技术丛书

智能光网络

——体系结构、协议和标准

[美] Greg Bernstein Bala Rajagopalan Debanjan Saha 著
黄蔚 郭丰 徐敏 译

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

现代光通信技术丛书

智能光网络—— 体系结构、协议和标准

[美]Greg Bernstein Bala Rajagopalan Debanjan Saha 著

黄蔚郭丰徐敏译

人民邮电出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

智能光网络——体系结构、协议和标准 / (美) G. Bernstein 等著. 黄蔚, 郭丰, 徐敏译.
—北京: 人民邮电出版社, 2007.1
(现代光通信技术丛书)

ISBN 978-7-115-15286-2

I. 智... II. ①G...②黄...③郭...④徐... III. 光纤通信—通信网 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 109709 号

内 容 提 要

本书是一本介绍光网络控制与管理内容的技术图书, 包括的主要内容有: 如何设计支持重要保护业务和低成本无保护业务的网络; WDM/DWDM 和 SONET/SDH 中的网络控制; Mesh 网和环形网的控制原理与特性; 光网络控制平面。本书的最大特点是将 IETF、ITU-T、OIF、ANSI 和 Bellcore 等发布的主要标准和光网络技术综合起来进行讨论。

本书可供从事光通信工作的各级技术人员和管理人员阅读参考, 也可作为通信院校高年级本科生和研究生光通信专业课程的参考读物。

现代光通信技术丛书

智能光网络——体系结构、协议和标准

◆ 著 [美] Greg Bernstein Bala Rajagopalan Debanjan Saha
译 黄 蔚 郭 丰 徐 敏
责任编辑 王 晓明

◆ 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>
北京鸿佳印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 19.75
字数: 471 千字 2007 年 1 月第 1 版
印数: 1—3 000 册 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

图字: 01-2006-5376

ISBN 978-7-115-15286-2/TN · 2857

定价: 42.00 元

读者服务热线: (010) 67129258 印装质量热线: (010) 67129223

前 言

光网络原本被用于传输大容量的语音业务，如今，它不仅被用于传送语音业务，还被用于传送数据业务，其中包括因特网业务。实际上，在过去的几年中，因特网是光网络空前扩张的驱动力。密集波分复用（DWDM）和智能光交换机等新技术则成为了推动光网络发展的动力。虽然光网络的迅速发展使得人们步入了一个可以进行高速通信的新时代，但是它同时也引入了新的问题：很难对大规模的动态光网络进行管理，并且目前的网络管理体系无法彻底解决该问题。

运营商通常使用设备制造商开发的网元管理系统（EMS）和自己开发的网络管理系统（NMS）来管理光网络。EMS 和 NMS 都使用专有技术且常常需要进行烦琐的手工配置。由于各厂家独自开发管理系统，导致很难迅速并有效地将新技术集成到现存的体系中。管理系统所固有的手工配置特性增加了创建新业务的开销和开通时间，同时也加重了误操作可能造成的风险。另外，光网络日益提高的复杂度使得这些问题变得更为严重。

网络是由处于网络体系中不同层的多个子网组成的，网元扮演着不同的角色，由不同的设备制造商生产，且通过设备制造商专有的 EMS、NMS 管理，这样便增加了网络的管理复杂度。当在处于不同地点的两个局点之间创建一条连接时，该创建过程包含了很多步骤，其中某些步骤需要进行手工操作。

首先，需要规划路径。这就需要获得不同地点的两个不同子网中的可用资源信息。目前，该过程基本是通过手工完成的。规划工作被分解为多个子任务并分配给多个规划团队。所以，该端到端路径是按照分段的方式进行规划的。

接着，要在规划好的路径上创建连接。不同的创建团队负责网络中不同部分的业务创建。这就需要配置连接路径上的网元和相关网络管理系统。

下一阶段就是测试。这是测试团队的工作。为了能够开通业务并将其交付给用户，他们需要验证端到端业务是否可以正常工作，所有的数据库是否都已进行了相应的升级。

为了描述简便，前面所述的创建过程已被简化。然而，它却解释了为什么创建光网络业务一般需要几周到几个月的时间。同时，它也解释了为什么即使网络设备价格大幅度下跌后网络运营的支出仍然居高不下的原因。需要注意的是，业务创建仅仅是网络控制和管理的一个方面。网络管理中另外一些方面的工作仍然同样烦琐而且低效。实际上，网络运营支出的 80% 来自于管理支出。解决方案便是利用技术创新来寻求出路，例如引入 DWDM 和智能光交换机，同时也需要有更好的控制和管理网络的方法。确切地说，我们需要将陈旧的、半手工方式的网络管理体系逐渐改造成更加自动化的管理体系。

实际上，在当今的光网络中引入控制体系是有原因的。由于技术可靠性、市场响应时间以及静态语音传送不需要按需分配带宽业务等原因，以前的光网络设备一直保持着“沉默”状态。现在，在光网络中引入智能控制平面的需求和条件已经成熟，所以就有很多激进的设备供应商为他们的设备开发了光控制平面。标准开发组织，例如 IETF、OIF 和 ITU，也紧随

其后。由于以上原因，控制平面的体系、协议和标准正以一个前所未有的速度发展着。

现在，我们已经从技术方面说明了引入光控制平面的需求，但是它是否能够给运营商带来利润？在当今萧条的电信环境下，运营商是否愿意在动态控制平面上投资？由于没有人能够给该问题一个确定的答复，我们可以从“投资收益”方面来为光控制平面的价值列举一个强有力的佐证。目前，网络运营大部分的支出来自于运营开销（OpEx）。由于日益增长的网络规模和复杂度，该支出在绝对和相对数量上都在增长。实际上，很多专家预言，即使运营商冻结了基建费用（CapEx），伴随着不断下跌的收入，持续增长的运营开销会大大减少运营商的利润。在这样的环境中，运营商惟一的出路就是采用更好的自动化技术来降低运营开销，而这就是光控制平面所能发挥优势的地方。所以，运营商在这方面进行投资还是能够有所回报的。

尽管有这样和那样的争论，但很显然，光控制平面并不会马上得到广泛部署。和其他任何新技术一样，光控制平面的引入将是一个逐渐的、分阶段的过程。无论是从技术还是商业角度来看，这项革新过程都是一个很好的想法。控制平面仍然是一项相当新且在不断发展的技术，因此，采用逐步引入的方式可以降低采用一项新技术的风险。从商业的角度来看，为了“把钱花在刀刃上”，分阶段部署则是一项比较合适的策略。

目前，许多运营商已经开始部署智能光网络和相关的光控制平面。然而，大部分早期的应用都使用厂家专用的协议和软件。IETF 和 OIF 所开发的控制平面标准正在试验和初期应用阶段，因此，虽然这些专用技术发展缓慢，但是最终它们肯定会演变为标准。该标准化过程正在加速进行，因为运营商在升级他们的运营和管理体系来控制运营支出时，感到了更多的压力。

光控制平面很可能成为光网络的下一个发展方向。因此，对于运营商、设备提供商和致力于传送网络的商业组织来说，它都是一个耳熟能详的重要话题。从光控制平面的诞生开始，本书作者就作为此项技术的专家和它紧密地联系在了一起。在本书中，作者提供了在智能光控制平面领域、开发体系结构、协议、产品和标准的第一手经验。本书按照以下形式组织编写：在前几章，回顾现有的光网络技术、结构和标准，其中主要关注在业界属于主导技术的 SONET 和 SDH。然后，介绍目前的光控制平面并详细描述它的组成。接着，讲述光控制平面与现有网络管理系统之间的交互。最后，以控制平面互操作的讨论作为本书的结束，其中包括当前标准和应用的状况。

对于本书的任何翻译、技术问题，读者可以通过电子信箱（tsingmei@hotmail.com 或 forguo@hotmail.com）与译者进行联系，或通过译者与作者联系。谢谢！

作 者

作者简介

Greg Bernstein: Grotto Networking 公司的首席顾问。负责 CIENA 公司网络控制和管理体系结构开发的高级技术主管。在 Lightera Networks 公司，他领导开发了已经得到广泛应用的光交换机软件，并在其中使用了先进的信令和路由技术。他拥有多项光网络专利。

Bala Rajagoplan: Tellium 公司的首席架构师。致力于以 IP 为中心的光网络控制和光网络体系结构的研究。他同时也为 AT&T Bell 实验室、Bellcore 和 NEC 公司进行 IP 和无线网络方面的研究工作。他为 IETF、ATM 论坛和 OIF 标准做出了巨大的贡献。

Debanjan Saha: IBM T.J. Watson 研究中心的高级研究员。他在 IBM 公司、Bell 实验室和 Tellium 公司设计并开发了用于光交换机、IP 路由器以及因特网服务器的协议。他同时也是 MPLS 的第一代开发人员之一。

三位作者都是 IETF GMPLS 标准的主要撰稿者。

目 录

第 1 章 光网络技术概述	1
1.1 引言	1
1.2 光传输系统	1
1.2.1 概述	1
1.2.2 衰减	2
1.2.3 色散	2
1.2.4 非线性效应	3
1.2.5 光纤	3
1.2.6 光发射模块和光接收模块	4
1.2.7 再生器、中继器和光放大器	5
1.2.8 光信号及其性能的度量	6
1.2.9 DWDM 系统	7
1.3 复用、调度和交换	9
1.3.1 数字交叉连接和分插复用器	9
1.3.2 全光交换矩阵	10
1.4 小结	14
第 2 章 SONET 和 SDH 基础	15
2.1 引言	15
2.2 时分复用	15
2.3 认识 SONET 和 SDH 信号	17
2.3.1 SONET 和 SDH 中的基本信号	17
2.3.2 净荷封装和虚容器	20
2.3.3 同步复用	24
2.4 SONET 和 SDH 分层模型	29
2.4.1 SONET 段层 (SDH 再生段层)	30
2.4.2 SONET 线路层 (SDH 复用段层)	31
2.4.3 串联连接层	32
2.4.4 SONET 通道层 (SDH 高阶虚容器层)	32
2.4.5 VT 通道层	32
2.4.6 透传	33
第 3 章 SONET 和 SDH 进阶	35
3.1 引言	35
3.2 级联	35

3.2.1	标准级联	35
3.2.2	任意级联	37
3.2.3	虚级联	37
3.3	LCAS	41
3.4	净荷映射	43
3.4.1	IP over ATM over SONET	43
3.4.2	Packet over SONET/SDH	44
3.4.3	GFP	44
3.4.4	Ethernet over SONET/SDH	47
3.5	SONET/SDH 透传	47
3.5.1	实现开销透传的方法	49
3.5.2	透传服务组件	50
3.6	故障综述	51
3.6.1	传输故障及其检测	51
3.6.2	故障定位与信号维护	53
3.6.3	质量检测	55
3.6.4	远端故障检测	58
3.6.5	性能度量参数	58
3.7	小结	60
第4章	光网络中的保护、恢复和分离路径	61
4.1	引言	61
4.1.1	概述	61
4.1.2	保护和恢复技术以及各自在实现时所做的取舍	61
4.2	线性保护	63
4.2.1	线性保护概述	63
4.2.2	线性保护的理论基础	67
4.2.3	SONET/SDH 线路保护	67
4.2.4	SDH/SONET 线性 1:N 保护	68
4.2.5	SONET/SDH K1/K2 线性 APS (LAPS) 协议	69
4.2.6	APS 命令	72
4.2.7	线性子网连接保护	72
4.3	环网保护	75
4.3.1	引言/背景	75
4.3.2	环网的理论背景	75
4.3.3	单向通道倒换环	76
4.3.4	双向线路倒换环 (MS 共享保护环)	77
4.3.5	软件定义的 BLSR	83
4.3.6	跨洋环	84
4.3.7	P 环	85

4.4 Mesh 恢复	86
4.4.1 Mesh 恢复的带宽利用率	86
4.4.2 端到端源端发起的重路由 Mesh 恢复	88
4.5 小结	89
第 5 章 光网络控制平面	90
5.1 引言	90
5.2 控制平面结构和功能模型	91
5.2.1 网络模型和层	92
5.2.2 分割和控制接口	95
5.2.3 控制平面功能	98
5.2.4 数据通信网	98
5.3 IP 网络中的控制平面	99
5.3.1 选址	100
5.3.2 发现	101
5.3.3 路由	101
5.4 MPLS 网络的控制	102
5.4.1 MPLS 概述	102
5.4.2 标签分发	103
5.4.3 MPLS 流量工程	104
5.4.4 MPLS-TE 路由	105
5.4.5 MPLS 网络中的复原	105
5.5 扩展 MPLS	105
5.5.1 GMPLS 概述	105
5.5.2 GMPLS 链路管理	107
5.5.3 GMPLS 路由	107
5.5.4 GMPLS 信令	107
5.6 ATM 网络控制: P-NNI 协议	108
5.6.1 P-NNI 体系	108
5.6.2 选址和标识	110
5.7 小结	112
第 6 章 邻居发现	113
6.1 引言	113
6.2 邻接类型和发现过程	113
6.2.1 层邻接	113
6.2.2 物理媒质邻接	116
6.2.3 控制邻接	116
6.2.4 邻居发现过程	116
6.3 协议机制	120
6.3.1 用 J0 字节实现邻居发现	120

6.3.2	用 DCC 字节实现邻居发现	126
6.3.3	链路属性一致性校验	126
6.4	LMP	127
6.4.1	控制通道	127
6.4.2	带有 OEO 交叉连接 (OXC) 的 LMP 用法	128
6.4.3	带有光交叉连接 (PXC) 的 LMP 用法	132
6.5	小结	136
第 7 章	连接指配信令	137
7.1	引言	137
7.2	ITU-T G7713 模型	140
7.2.1	G7713 是什么	140
7.2.2	体系结构介绍	140
7.3	GMPLS 信令	143
7.3.1	基本信令模型	144
7.3.2	GMPLS 标签	145
7.3.3	SONET/SDH 连接参数的 GMPLS 编码	147
7.4	RSVP 和 RSVP-TE	149
7.4.1	RSVP	149
7.4.2	RSVP-TE	155
7.5	GMPLS 对 RSVP-TE 的扩展	163
7.5.1	GMPLS RSVP-TE 对象	163
7.5.2	通知消息	168
7.5.3	GMPLS RSVP-TE 中连接的建立	168
7.5.4	GMPLS RSVP-TE 中连接的删除	171
7.5.5	GMPLS RSVP-TE 重启过程	171
7.5.6	GMPLS RSVP-TE 中 UNI 和 NNI 信令	173
7.6	P-NNI 信令为光网络做的适配	173
7.6.1	P-NNI 信令通信	173
7.6.2	指定的传输列表	174
7.6.3	连接的建立和删除	176
7.6.4	P-NNI 为光网络做的适配	177
7.7	小结	178
第 8 章	保护和恢复的相关信令	179
8.1	引言	179
8.2	区段保护	180
8.2.1	功能描述	180
8.2.2	消息	182
8.2.3	预防错连	183
8.2.4	复原	183

8.2.5 信令机制.....	183
8.3 端到端专用 Mesh 保护	185
8.3.1 单向 1+1 保护.....	185
8.3.2 双向 1+1 保护.....	185
8.3.3 消息.....	185
8.3.4 信令过程.....	186
8.4 端到端共享 Mesh 保护	187
8.4.1 功能描述.....	187
8.4.2 消息.....	189
8.4.3 信令过程.....	190
8.5 相关讨论.....	191
8.5.1 性能和 MPLS 快速重路由	191
8.5.2 恢复.....	194
8.6 小结.....	195
第 9 章 路由概述	196
9.1 引言.....	196
9.2 路由的历史.....	196
9.2.1 电话网中的路由	196
9.2.2 Internet 中的路由	198
9.3 路由协议基础	199
9.3.1 路由和转发	199
9.3.2 路由协议设计原则	200
9.3.3 IP 路由协议的不同类型.....	201
9.4 Internet 路由协议	202
9.4.1 域内路由协议	202
9.4.2 域间路由协议	206
9.5 P-NNI.....	207
9.6 小结.....	208
第 10 章 光网络域内路由	209
10.1 引言.....	209
10.2 IP 路由和光网络路由的差别.....	209
10.3 带物理分离的路由	210
10.4 带约束的路由	211
10.4.1 链路特性	211
10.4.2 光网络路由约束.....	212
10.5 链路绑定.....	213
10.6 源节点路由	214
10.7 光网络域内路由	214
10.7.1 单域路由	215

10.7.2 示例	216
10.7.3 全光网络中的路由	219
10.8 跨域路由	219
10.8.1 IP 网络中的数据包转发	219
10.8.2 提取资源信息	221
10.8.3 多域网络中的业务指配	222
10.8.4 多域网络中的共享 Mesh 保护	223
10.8.5 基于 OSPF 的多域流量工程	226
10.9 相关问题	227
10.10 小结	228
第 11 章 路由计算和路径选择	229
11.1 引言	229
11.2 最短路径计算	230
11.2.1 Bellman-Ford 算法	230
11.2.2 Dijkstra 算法	232
11.2.3 Bellman-Ford 算法与 Dijkstra 算法的比较	233
11.3 带有简单约束的路由计算	233
11.3.1 链路保护约束举例	233
11.3.2 带宽约束	234
11.4 用于分离的路径选择	235
11.4.1 链路分离路由算法	236
11.4.2 最短链路分离路径算法	237
11.5 网络优化	240
11.5.1 批处理	241
11.5.2 用数学公式描述的最短路径问题	241
11.5.3 用数学模型表示的多商品流问题	242
11.5.4 多商品最优化问题的建模和求解	242
11.6 小结	248
第 12 章 域间控制	249
12.1 引言	249
12.2 域间控制的要求	250
12.2.1 可扩展性	250
12.2.2 跨厂商互操作能力	250
12.2.3 划分管理区域	252
12.2.4 部署和运维方面的考虑	252
12.3 域的层次	253
12.3.1 与信令的关系	253
12.3.2 层次路由	254
12.3.3 层内组件的标识	255

12.3.4 分离路由和域的表达方法	258
12.4 域间路由	258
12.4.1 路由信息的分类	258
12.4.2 层次路由	260
12.5 发现步骤和层次	262
12.6 小结	263
第 13 章 光网络管理系统与控制平面	264
13.1 光网络管理系统概述	264
13.1.1 管理系统提供的功能	264
13.1.2 系统管理的层次划分	266
13.2 信息模型	267
13.2.1 被管对象	267
13.2.2 状态	271
13.2.3 事件和通知	271
13.3 系统管理所使用的协议	274
13.3.1 TLI 语言	275
13.3.2 简单网络管理协议	276
13.3.3 公共管理信息协议	276
13.3.4 基于 CORBA 的管理	277
13.4 管理平面和控制平面之间的关系	277
13.4.1 FCAPS 和控制平面	277
13.4.2 发现和管理	278
13.4.3 路由和管理	279
13.4.4 信令和管理	279
13.4.5 域间控制和管理	280
13.5 小结	281
第 14 章 光控制平面的对接	282
14.1 引言	282
14.2 商业驱动力与不利因素	282
14.3 不同的标准: 竞争还是互补	283
14.3.1 IETF	283
14.3.2 OIF	284
14.3.3 ITU-T	284
14.4 不同厂家设备间对接的进展	285
14.5 有关商用化的问题	286
附录 缩略语	288
参考文献	293

第 1 章 光网络技术概述

1.1 引言

现代光传输网络主要由光交换机以及连接这些光交换机的密集波分复用 (DWDM) 传输系统组成。在本章中, 将回顾光传输系统和光交换系统的基本概念。确切地说, 将介绍光信号的产生、接收以及它们如何在光纤中传输的工作原理。同时, 本章也会介绍实现光交换技术所需的基础技术, 这些技术是现代光传输网络的一个重要组成部分。本章重点介绍了光网络的物理特性, 其中一部分特性将在控制平面中作为约束条件给出。

1.2 光传输系统

1.2.1 概述

如果想在一定的距离上进行光传输, 首先要做的就是找到能否发出足够能量并且确保光谱狭窄的光源。发光二极管和激光二极管正好满足该条件。自 20 世纪 60 年代以来, 激光器已经经历了几代的发展。现在, 半导体激光器在光纤通信中的广泛使用, 标志着激光器的应用达到了一个颠峰。

实现光传输的第二步就是要克服信号强度在光纤中的损耗或者衰减问题。1970 年, Corning 公司制造出了世界上第一种电信级别的光纤。该光纤的损耗低于 20dB/km, 这使得光纤通信成为一项可行的技术。

光纤通信技术的主要客户是电话公司, 他们在选用新技术时都比较谨慎, 所以最初采用光纤通信技术的公司并不多。美国 AT&T 公司首先将 DS3 (45Mbit/s) 指定为多模光纤的标准传输速率。过了不久, 单模光纤的传输速率比老类型光纤的传输速率快了 10 倍, 并且还将最大传输距离提高到了 32km。到了 20 世纪 80 年代早期, MCI 和 Sprint 公司相继在其美国的长途电话网中使用了单模光纤。

后来, 光纤通信的发展主要集中在光谱中衰减较低的特定区域。这些区域称作窗口, 它们位于光谱的高吸收区域之间。最早被使用的是 850nm 窗口, 这也是硅光纤使用的第一个窗口。由于衰减比 850nm 窗口要低, 位于 1310nm 的第二个窗口 (S 波段) 很快被证实为更加优越。接着, 出现了位于 1550nm 的光损耗更低的第三个窗口 (C 波段)。目前, 位于 1625nm 处的第四个窗口 (L 波段) 正处在研发和初期应用阶段。

在使用光纤传输光信号时, 会遇到一些在光信号的传输过程中必须处理的问题, 这些问题主要分为以下 3 大类。

(1) 衰减。当信号在光纤中传输时，随着传输距离的增加，信号的光功率会相应地减小，这是由光纤的固有特性决定的。

(2) 色散。光信号中不同颜色的光以不同速率在光纤中传输的现象统称为色散。这种现象导致的最终结果是信号失真，如果色散较严重，多个信号之间就会出现重叠的情况，从而导致在接收机侧难以提取正常的信号。

(3) 非线性效应。光在经过传输媒质时会受到一些影响，这些影响累加起来就会导致波长发生改变以及光功率从一个波长转移到另一个波长上。

下面将详述这些内容。

1.2.2 衰减

光在传输时产生衰减的内在原因主要是光的散射和吸收，而外部原因则包括制造过程、环境等因素的影响。光纤有几种损耗机理，其中最重要的一种是瑞利散射 (Rayleigh Scattering)，它是由光纤中硅元素的波动引起的。这些波动比光纤中传播的波长要小，因此扮演了散射对象的角色。相对来说，波长短的光受到的散射影响要比波长长的光要大，因此散射限制了 800nm 以下的波长在光传输中的使用。

吸收引起的衰减是由很多因素造成的，包括材料本身的特性，光纤中的杂质，以及光纤中任何细微的瑕疵。这些杂质吸收了光的能量，导致光功率被削弱。瑞利散射对波长短的光影响较大，而光纤对波长长的光吸收比较多，且当波长大于 1700nm 时，影响会很明显。在传统单模光纤玻璃的制造工艺中，在 1400nm 波长区域会出现一个叫水峰 (Water Peak) 的光吸收峰，此吸收峰源于氢氧根离子的吸收。水峰增加了在此特定区域的衰减损耗 (衰减损耗可达 2dB/km 或更高)。然而，一些新型光纤 (零水峰光纤) 已经消除了水峰。它们在制造时无氢氧根离子，因而在 1400nm 区域获得更好的衰减控制。

光纤的长度和光的波长是影响衰减的主要因素。可以通过使用光放大器 (Optical Amplifier) 来补偿光纤中的衰减。

1.2.3 色散

色散是光信号所含不同颜色的光以不同速率在光纤中传输现象的统称。这种现象会导致信号失真，如果色散很大的话，多个信号之间就会出现重叠，从而导致在接收机侧难以提取正常的信号。有两种色散会影响 DWDM 系统：一种是色度色散 (CD, Chromatic Dispersion)，它是线性的；另一种是偏振模色散 (PMD, Polarization Mode Dispersion)，它是非线性的。

色度色散会导致一个信道中，波长谱线各个部分的传输速率都不同。在单模光纤中，色度色散分为材料色散 (Material Dispersion) 和波导色散 (Waveguide Dispersion)。材料色散是指不同波长的光在光纤中以不同的速率传播。也就是，当用一个无论多细的光源发出某个波段内的光时，各个波长到达传输媒质另一端的时间都不相同。第二种色度色散，也就是波导色散，是由光纤的核心层和包层之间折射系数的不同所造成的 (见第 1.2.5 节)。当传输速率低于 2.5Gbit/s 时，色度色散所造成的影响不大，但当传输速率逐渐增加时，色度色散也会随之相应增加。

大多数的单模光纤支持两种正交偏振模式 (Perpendicular Polarization Mode)：垂直交偏

振和水平交偏振。若光纤横截面为理想圆对称,则在理想情况下,这两个模式是相互简并的;但在实际情况下,由于生产中造成的光纤的圆不对称、内应力,成缆过程中形成的边应力、光纤扭曲,以及使用过程中的压力、弯曲、环境温度变化等因素,造成单模光纤中这两个模式之间有轻微的传输群速度差,从而形成(线性)偏振模色散(PMD)。当传输速率低于 10Gbit/s 时, PMD 不会产生什么影响。

1.2.4 非线性效应

在光传输系统中,只要使用的光功率足够低,就可以认为这个系统是线性的。随着光功率的增大,非线性效应也越来越明显,这在大多数功率都很高的 DWDM 系统中尤为突出(见第 1.2.9 节)。衰减和色散这样的线性效应可以通过增加补偿来解决,但是非线性效应只会越来越严重。它们从根本上约束了光纤中的数据传输量。最重要的几种非线性效应是受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering)、受激喇曼散射(Stimulated Raman Scattering)、自相位调制(Self-Phase Modulation)和四波混频(Four-Wave Mixing)。在 DWDM 系统中,四波混频是这几类非线性效应中最重要的一种。由光纤折射率(Refractive Index,关于折射率,见第 1.2.5 节)的非线性特征引起的四波混频会在原有 DWDM 波长的基础上产生新波长。这个新波长会与原来的波长产生干涉,结果导致光功率在多个波长之间进行分配。这同样会导致由于光信噪比(OSNR)降低而引起的难以接收的问题。四波混频的问题会随着光纤长度的增加而变得严重,同样,它也限制了 DWDM 系统的信道容量。

1.2.5 光纤

光纤的主要用途就是以最小的衰减(信号的损耗)来传送光波。光纤由外包层里的纤芯和覆层(Cladding)组成。光在光纤中的传输速率大约是其在真空中的 2/3。简而言之,光在光纤中的传输使用的是光的全内反射(Total Internal Reflection)原理。按照该理论,到达光纤内表面的光会被 100%地反射回来。与之相比,镜面大约会反射 90%到达其表面的光。

根据入射角(入射光线与法线的夹角)的不同,光会发生反射(直接弹回)或者折射(当光穿过不同介质时,其传播角度会发生变化)。当满足以下条件时,就会发生全内反射。

(1) 光从光密介质进入光疏介质。真空中的光速与传输媒质中的光速之比值就是该传输媒质的折射率。

(2) 入射角要小于临界角。临界角是入射光线不会产生折射而全部反射回来的临界角度。

光纤包含了两种不同的高纯度硅材料——核心和覆层。它们都掺入了一些叫作掺杂剂(Dopant)的特定元素,用以调整它们的折射率。两种材料不同的折射率使得大部分传输的光在覆层界面被回弹,然后保留在核心当中。临界角可通过光入射到光纤时的角度进行控制如图 1-1 所示。覆层外的两层或更多的包层是用来保护光纤不被损坏的。

目前常用的两种光纤是多模光纤和单模光纤。多模光纤是第一种得到商业化应用的光纤,它比单模光纤大的纤芯。它得名于众多模式或光线能同时由波导运载。第二种常用的光纤是单模光纤,其具有相对小得多的纤芯,且一次仅能够传送一种光的模式。因此,信号的质量能够在比较长的距离内被较好地保持,模式色散也大大地减少,这使得单模光纤拥有比多

模光纤更大的带宽容量。由于它的大信息传输容量和低内在损耗，单模光纤是长距离和宽带应用（包括 DWDM）的理想选择。

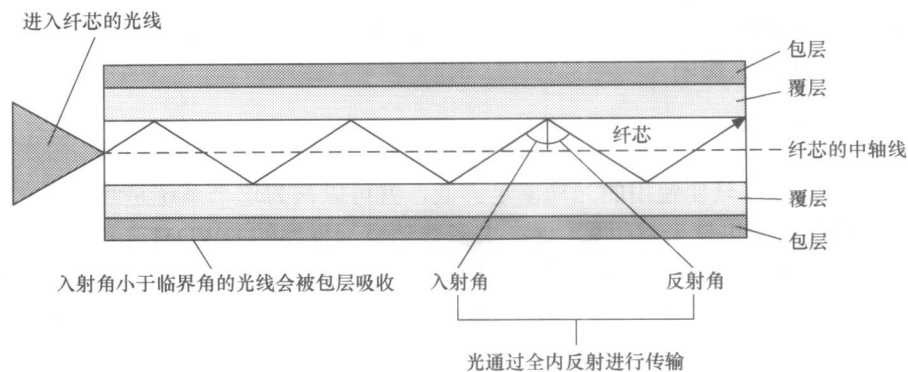


图 1-1 光在光纤中的传播

单模光纤已经发展了数十年。它的 3 种基本类型及其相应的 ITU-T 规格如下：

- (1) 非色散位移光纤（NDSF, Non-Dispersion-Shifted Fiber），G.652；
- (2) 色散位移光纤（DSF, Dispersion-Shifted Fiber），G.653；
- (3) 非零色散位移光纤，（NZ-DSF, Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber），G.655。

如前所述，红外光谱中主要有 4 个窗口可供光纤传输使用。其中，第一个窗口靠近 850nm，几乎专门用于短程和多模应用。非色散位移光纤，通常称作标准单模光纤，适用于在 1310nm 附近的第二窗口。为了优化光纤在这个窗口的性能，光纤的色度色散在 1310nm 附近被处理为接近于零。

第三窗口（C 波段）的衰减很小。但是它却有较大的色散。由于第三窗口的衰减比 1310nm 窗口低，制造商们推出了色散位移光纤。该光纤将零色散点移到 1550nm 区域。尽管这种方法目前能够在 1550nm 窗口同时达到最低衰减和零色散，但如果没有有效补偿，在接近零色散点的地方会出现破坏性的非线性效应。由于这个限制，这些光纤不适用于 DWDM。

非零色散位移光纤是专门为了满足 DWDM 应用的需要而设计的，该光纤降低了 1550nm 区域的色散，但不是降为零。非零色散位移光纤对色散进行了有效控制，抑制了会影响 DWDM 系统性能的非线性效应，例如，四波混频（Four-Wave Mixing）。

1.2.6 光发射模块和光接收模块

光发射模块和光接收模块是分别在光传输系统两端运行的设备。光发射模块是将电信号转换为光脉冲的发射端设备，它将输入信号调制成光信号后输出。光接收模块的功能和光发射模块相反，它是将光脉冲转换为电信号的接收端的光—电转换设备。

在设计系统时，光源是一个需要重点考虑的器件，它可能是系统中最贵的几种器件之一。光源的好坏往往是影响光传输系统最终性能的一个重要因素。光传输系统中使用的光发射设备必须具备体积小、单色、稳定且持久的特性。光传输系统中使用的两大类光发射设备是：发光二极管（LED, Light Emitting Diode）和激光二极管（Laser Diode）或者半导体激光器（Semiconductor Laser）。LED 是相对较慢的设备，适用于速率小于 1Gbit/s 的传输。这类廉价