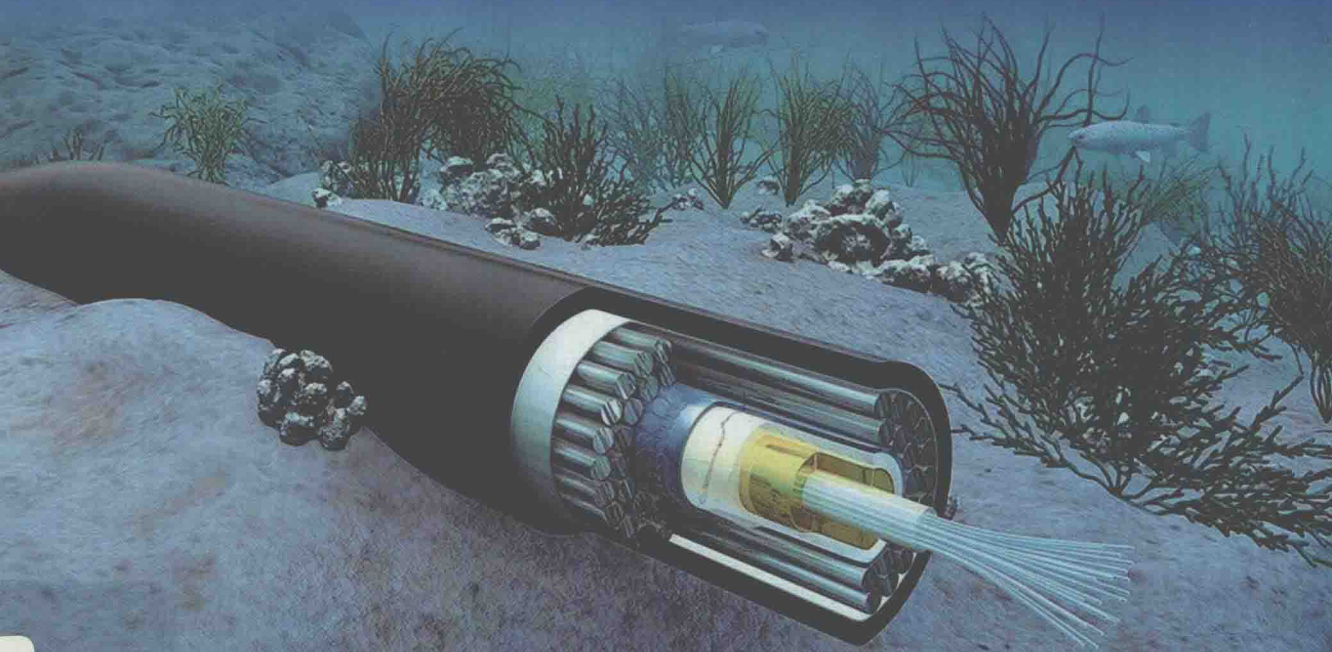


Undersea Fiber Communication
Key Technology, System Design and OA&M

海底光缆通信

——关键技术、系统设计及 OA&M

原 荣◎编著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

Undersea Fiber Communication
Key Technology, System Design and OA&M

海底光缆通信

——关键技术、系统设计及 OA&M

原 荣◎编著



人民邮电出版社
北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

海底光缆通信 : 关键技术、系统设计及OA&M / 原荣
编著. — 北京 : 人民邮电出版社, 2018. 7
ISBN 978-7-115-48472-7

I. ①海… II. ①原… III. ①海底电缆—光纤通信—
通信线路 IV. ①TN913.33

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第102117号

内 容 提 要

本书根据 ITU-T、OIF 和 GB/T 最新标准和国内外最新技术进展, 系统介绍了海底光缆通信系统的基本理论、最新进展、关键技术、传输终端和中继设备。本书共分 9 章, 内容包括海底光缆通信系统的关键技术, 光中继/无中继系统的最新技术和设备进展, 海底光缆通信系统的技术设计、工程设计、可靠性设计, 系统测试技术及仪器、系统运行管理和维护 (OA&M)。

本书内容全面新颖、符合最新国际国内标准、系统性强、概念清晰、由浅入深、图文并茂。

本书可作为从事海底光缆通信系统、光纤通信系统研究教学以及相关专用设备制造、规划设计、维护管理的有关人员的参考书。

◆ 编 著 原 荣

责任编辑 李 强

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

涿州市京南印刷厂印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 24

2018 年 7 月第 1 版

字数: 450 千字

2018 年 7 月河北第 1 次印刷

定价: 128.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

前言

30 多年来, 光波系统以不可思议的速度在陆上和海底铺设。当今信息时代, 海底光缆起着极其重要的作用, 因为世界上 97% 以上的国际通信业务通过海底光缆传输。

海底光缆通信技术得到了飞速发展, 海底光缆通信系统历经三代, 目前正在经历着基于波分复用、EDFA/Raman 光放大、偏振复用 / 相干检测技术、软件判决前向纠错技术 (SD-FEC)、数字信号处理 (DSP) 技术、先进光调制技术的第四代海底光缆通信系统。

每话路成本的降低, 给运营商和开发商带来额外的利润, 所以, 它们不断地推动开发新的技术, 追求增加每根光纤的传输容量和频谱效率。同时, 技术的进步也给用户带来了实惠。这是推动技术进步的主要因素。

与卫星通信系统相比, 在传输容量、可靠性和质量方面, 海底光缆通信系统已使全球通信网络发生了彻底的变革。

毋庸置疑, 海底光缆正以超强的力量影响着我们的社会! 全世界, 静静地躺在海底的光缆对我们的日常生活和数据安全是多么的重要! 可以设想, 当我们一觉醒来打开手机, 因海底光缆故障, 我们收不到大洋彼岸的任何信息时, 会是一种什么样的心情!

西方工业国家把海缆 (早期是电缆, 后来是光缆) 作为一种可靠的战略资源已有一个多世纪了。当前海底光缆通信领域由欧洲、美国、日本的企业主导, 这些企业承担了全球 80% 以上的海底光缆通信系统市场的建设。连接我国的主要海底光缆系统的设备、工程施工维护几乎被这些公司垄断。为了保证国家安全, 重要的海底光缆中国必须自己铺设, 所用设备原则上也必须自己制造。国内急需培养这方面的技术开发、关键器件设计生产 (包括 100G、400G 系统的收发模块、DSP 芯片、光电器件等)、设备制造人才。欣慰的是, 近年来国内已对此给予了重视, 华为技术有限公司在国内成

立了华为海洋网络有限公司,在海外成立了加拿大华为技术研究中心;中兴通讯科技有限公司也加大了对海底光缆通信系统技术的研究力度;烽火科技集团有限公司也成立了烽火海洋网络设备有限公司,致力于掌握海底光缆通信系统的关键技术和工程施工维护技术,开发生产海底光缆、岸上设备和海底设备。

本书根据国际电信联盟电信标准部 (ITU-T)、光互联网论坛 (OIF) 最新国际标准规范、GB/T 推荐性国家标准和国内外最新技术进展,系统、简明扼要地介绍了海底光缆通信系统的基本理论、最新进展、关键技术、终端设备和中继器的构成、功能和工作原理。本书共 9 章,各章主要内容如下。

第 1 章介绍了海底光缆通信系统在世界通信网络中的地位和作用、发展历程、最新进展和国内外有关标准。

第 2 章介绍了海底光缆通信系统的关键技术,如全光放大中继技术、先进光调制技术、前向纠错技术、光纤及其色散补偿和管理技术、偏振复用/相干检测技术、数字信号处理 (DSP) 技术、奈奎斯特脉冲整形技术、100G 和 400G 系统进展及关键技术等。

第 3 章介绍了光中继海底光缆通信系统及设备技术、监控故障定位技术、供电系统设备技术和增益均衡技术等。

第 4 章介绍了无中继海底光缆通信系统及设备技术、各种泵浦系统技术。

第 5 章介绍了海底光缆通信系统 Q 参数和 OSNR 理论及其计算、光功率预算、系统技术设计和升级考虑。

第 6 章概述了海底光缆通信系统工程设计的有关问题,如路由选择勘察、网络拓扑结构、海底光缆及所用光纤分类特性及应用、系统设备选购等。

第 7 章简述了海底光缆通信系统故障率分析、可靠性保证措施和预算,以及安全性考虑。

第 8 章介绍了海底光缆通信系统测试技术及仪器,包括相干光时域反射仪 (C-OTDR)、电脉冲回波仪 (电时域反射仪)、系统 Q 参数测量、拉曼开关增益和增益系数的测量技术原理和构成等。

第 9 章介绍了海底光缆通信系统的运行管理和维护 (OA&M) 系统构成、功能及工程实例、故障检测定位技术和故障修复过程。

衷心感谢中国电子科技集团公司第三十四研究所的领导和有关部门给我提供创作的物质技术条件和机会,使我有幸能收集学习国内外有关文献资料,了解国内外光纤通信、海底光缆通信系统技术和设备的最新进展,编写了《海底光缆通信——关键技术、系统设计及 OA&M》一书。本书如能对我国海底光缆通信技术的进步和发展、产品开发和工程建设、运行管理和维护有益,作者将甚感欣慰。



为了本书的编写，罗青松、胡肖松提供了英文资料；吴锦虹提供了帮助；卢熙提供了北京资料调研协助；深圳大学杨淑雯教授提供了 OFC 会议文集，在此，作者表示诚恳的谢意！

本书在编写过程中，参考引用了 OFC 等国外的最新科技文献、英文著作、ITU-T、OIF 技术标准规范和 GB/T 推荐性最新国家标准——《海底光缆通信工程设计规范》和《海底光缆工程验收规范》，在此特向有关作者表示衷心的感谢！

衷心感谢人民邮电出版社李强编辑为本书出版所做出的贡献！

因作者水平所限，书中可能会有遗漏及错误之处，敬请读者指出。

原 荣

目 录

第 1 章 海底光缆通信系统概述	001
1.1 海底光缆通信系统在世界通信网络中的地位和作用	001
1.1.1 国内网络	002
1.1.2 地区网络	002
1.1.3 洲际网络	003
1.1.4 专用网	004
1.1.5 海底光缆通信系统组成和分类	004
1.2 海底光缆通信系统发展历程	006
1.2.1 海底光缆通信系统发展过程	006
1.2.2 第四代海底光缆通信系统技术介绍	009
1.2.3 连接中国的海底光缆通信系统发展简况	014
1.3 海底光缆通信系统标准简介	016
1.3.1 光纤通信系统技术标准化组织及其有关标准	016
1.3.2 ITU-T 规范的光传输网 (OTN)	017
1.3.3 ITU-T 海底光缆通信系统及其有关标准简介	020
1.3.4 中国海底光缆通信系统标准概况	024
第 2 章 海底光缆通信系统关键技术	027
2.1 全光放大中继技术	027
2.1.1 掺铒光纤放大器	027
2.1.2 L 波段 EDFA 及 C+L 波段应用	031

2.1.3	光纤拉曼放大技术	033
2.1.4	分布式拉曼放大器等效开关增益和有效噪声指数	038
2.1.5	混合使用拉曼放大和 C+L 波段 EDFA	041
2.2	光调制技术	042
2.2.1	光调制技术原理	042
2.2.2	光调制技术分类	044
2.2.3	光双二进制滤波调制	046
2.2.4	差分相移键控 (DPSK)	047
2.2.5	差分正交相移键控 (DQPSK)	049
2.2.6	数模转换 (DAC) 正交幅度调制 (QAM)	053
2.2.7	光数模转换 (ODAC) 正交幅度调制 (QAM)	055
2.2.8	多维调制及几种调制格式比较	059
2.2.9	高符号率系统使用的快速 DAC	060
2.3	前向纠错技术	062
2.3.1	前向纠错技术概述	062
2.3.2	ITU-T 前向纠错标准和实现方法	062
2.4	光纤技术	066
2.4.1	超低损耗光纤对海底光缆通信系统的重要性	066
2.4.2	超低损耗纯硅芯光纤设计制造性能	067
2.5	光纤色散补偿和管理技术	068
2.5.1	光纤色散补偿和管理技术原理	068
2.5.2	光纤色散补偿技术	069
2.5.3	光纤色散管理技术	071
2.6	波分复用技术	074
2.6.1	波分复用概念	074
2.6.2	AWG 复用 / 解复用器	075
2.6.3	光线路终端 (OLT)	076
2.7	偏振复用 / 相干接收技术	077
2.7.1	偏振复用 / 相干接收技术在 100 Gbit/s 海底光缆通信系统中的应用 ...	077
2.7.2	光偏振及其复用	078
2.7.3	相干检测接收	079
2.7.4	偏振复用 / 相干接收系统	081



2.8 数字信号处理 (DSP) 技术	083
2.8.1 DSP 在高比特率光纤通信系统中的作用	083
2.8.2 数字信号处理 (DSP) 技术的实现	086
2.8.3 100G 系统数字信号处理器 (DSP)	088
2.8.4 400G 系统数字信号处理器 (DSP)	089
2.8.5 高速 DAC 适配数字预均衡	092
2.9 奈奎斯特脉冲整形及其系统	093
2.9.1 奈奎斯特脉冲整形概念	093
2.9.2 连续三个辛格形状奈奎斯特脉冲的时域图和频谱图	095
2.9.3 奈奎斯特发射机 / 接收机及其系统	095
2.10 100G 超长距离 DWDM 系统技术	097
2.10.1 100G 超长距离 DWDM 系统关键技术	097
2.10.2 100G 超长距离 DWDM 系统传输实验	099
2.10.3 100G 超长距离 DWDM 系统光收发模块	103
2.11 400G 光传输系统技术	105
2.11.1 400G 光传输系统技术概述	105
2.11.2 400G 光传输系统实验	107
2.11.3 单载波 400G 传输系统技术	113
2.11.4 双载波 400G 传输系统技术	117
2.11.5 4 载波 400G 传输系统技术	120
2.11.6 400G 系统传输技术比较	122
2.11.7 长 / 超长距离传输对 400G 系统的要求	126
第 3 章 光中继海底光缆通信系统	129
3.1 光中继海底光缆通信系统概述	129
3.1.1 光中继海底光缆通信系统构成	129
3.1.2 光中继海底光缆系统进展过程	132
3.1.3 高速光中继海底光缆通信系统进展	134
3.2 海底光中继器	136
3.2.1 双向传输光中继器	137
3.2.2 实用光中继器	139
3.2.3 光中继器 EDFA 驱动监控	142

3.3 线路监视和故障定位	143
3.3.1 单信道光中继传输系统在线监视	143
3.3.2 多信道光中继传输系统在线监视	145
3.3.3 相干光时域反射仪 (C-OTDR)	146
3.3.4 故障定位	149
3.4 供电设备	152
3.4.1 海底光缆系统供电方式	152
3.4.2 点一点远供电源系统设计	152
3.4.3 电压预算及接地考虑	156
3.4.4 干线一分支远供电源系统设计	157
3.4.5 终端传输设备恒流高压产生	159
3.4.6 供电设备组成	160
3.4.7 PFE 在发生光缆断裂时的反应	161
3.4.8 中继器取电设计	162
3.5 光分支单元	163
3.5.1 光分支单元概述	163
3.5.2 无源/有源分支单元	165
3.5.3 波长分插分支单元	166
3.6 增益均衡	166
3.6.1 增益均衡概述	166
3.6.2 无源均衡器	169
3.6.3 有源斜率均衡器	170
3.7 终端传输设备	171
3.7.1 终端传输设备概述	171
3.7.2 2.5 Gbit/s WDM 系统终端传输设备	172
3.7.3 5 Gbit/s WDM 系统终端传输设备	175
3.7.4 10 Gbit/s WDM 系统终端传输设备	178
3.8 SEA-ME-WE 海底光缆通信系统	187
3.8.1 SEA-ME-WE 概述	187
3.8.2 SEA-ME-WE 系统构成	188
3.8.3 SEA-ME-WE-3 系统升级及其性能	190

第 4 章 无中继海底光缆通信系统	193
4.1 无中继海底光缆通信系统发展历程	193
4.1.1 无中继海底光缆通信系统概述	193
4.1.2 无中继海底光缆通信系统进展	195
4.2 单波长无中继海底光缆通信系统	199
4.2.1 无中继海底光缆通信系统构成	199
4.2.2 10 Gbit/s 无中继 601 km 单载波传输实验	200
4.3 无中继 WDM 海底光缆通信实验系统	202
4.3.1 100 × 10 Gbit/s 无中继 350 km 传输实验	203
4.3.2 4 × 43 Gbit/s 无中继 485 km 传输实验	204
4.3.3 64 × 43 Gbit/s PM-BPSK 相干检测无中继 440 km 传输实验	206
4.3.4 8 × 112 Gbit/s PM-QPSK 相干检测无中继 300 km 传输实验	208
4.3.5 16 × 400 Gbit/s WDM 偏振复用 16QAM 无中继传输系统	210
4.4 无中继海底光缆通信系统传输终端	211
4.4.1 光功率增强放大器	212
4.4.2 前置光放大器	213
4.4.3 远端泵浦技术	214
4.4.4 光发射机	219
4.4.5 光接收机	219
4.5 无中继系统维护	219
第 5 章 海底光缆通信系统技术设计	221
5.1 海底光缆通信系统设计总则	221
5.1.1 海底光缆通信系统设计概述	221
5.1.2 海底光缆通信系统设计事项	222
5.2 海底光缆通信系统 OSNR 和 Q 参数	226
5.2.1 Q 参数和 BER 相关	226
5.2.2 光信噪比 (OSNR)	228
5.2.3 OSNR 和理论线性 Q 参数相关	229
5.2.4 光中继系统 OSNR 计算	231
5.2.5 无中继系统 OSNR 计算	235

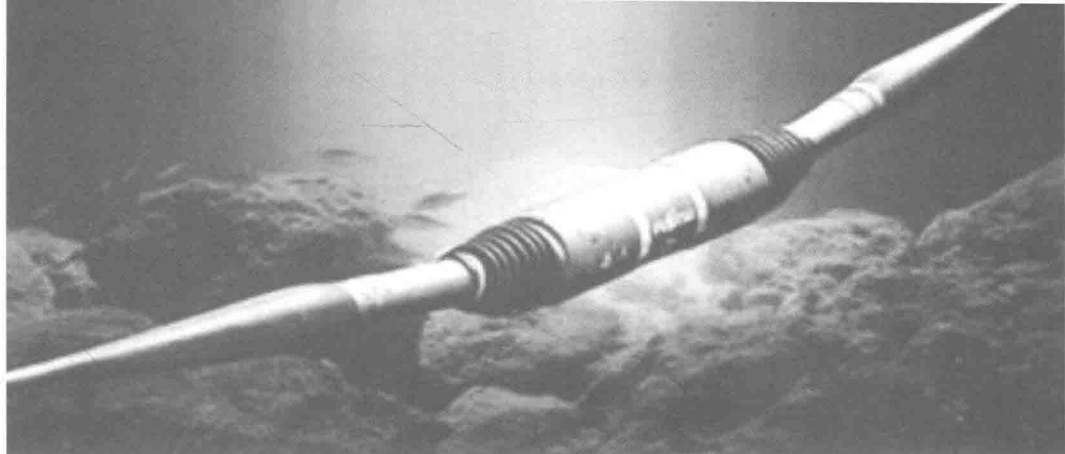
5.2.6 接收端混合使用 EDFA 和分布式拉曼放大 OSNR 计算	237
5.3 海底光缆通信系统光功率预算	240
5.3.1 WDM 海底光缆通信系统光功率预算	240
5.3.2 相干检测 WDM 海底光缆通信系统光功率预算	243
5.4 海底光缆通信系统技术设计实例	245
5.4.1 无中继放大系统功率预算	245
5.4.2 数字线路段 (DLS) Q 参数预算	246
5.4.3 光中继系统 OSNR 计算	247
5.5 海底光缆通信系统技术设计	249
5.5.1 光中继海底光缆通信系统技术设计考虑	249
5.5.2 光中继间距设计	251
5.5.3 无中继海底光缆通信系统技术设计考虑	253
5.6 海底光缆通信系统升级	254
5.6.1 在现有设备基础上升级	255
5.6.2 利用先进终端设备技术升级	255
第 6 章 海底光缆通信系统工程设计	257
6.1 海底光缆通信系统工程设计概述	257
6.1.1 海底光缆路由预选	257
6.1.2 海底光缆路由勘察	258
6.2 系统路由 / 登陆点选择原则	258
6.2.1 系统路由选择原则	258
6.2.2 系统登陆点选择原则	259
6.3 海底光缆系统拓扑结构	259
6.3.1 点对点系统	259
6.3.2 星形	260
6.3.3 分支星形	260
6.3.4 花边形	261
6.3.5 干线分支形	261
6.3.6 环形及其保护	263
6.3.7 分支环形	264
6.4 海底光缆选择	265

6.4.1 海底光缆分类及应用	265
6.4.2 海底光缆电气及机械性能	268
6.4.3 海底光缆用光纤	269
6.4.4 海底光缆选择注意事项	271
6.5 海底光缆通信系统的设备选购	273
6.5.1 无中继设备选购及兼容性考虑	273
6.5.2 光中继设备选购及兼容性考虑	274
第 7 章 海底光缆通信系统可靠性设计及安全性考虑	277
7.1 海底光缆通信系统可靠性设计	277
7.1.1 可靠性参数及可靠性要求	277
7.1.2 故障率分析	279
7.1.3 质量控制和可靠性保证措施	281
7.2 海底光缆通信系统可靠性预算	283
7.2.1 光中继器故障率 / 故障概率预算	283
7.2.2 插件板故障率 / MTBF 预算	285
7.2.3 系统 MTBF / 维修次数预算	286
7.3 海底光缆通信系统安全考虑	287
第 8 章 海底光缆通信系统测试技术及仪器	289
8.1 光纤通信测量仪器	289
8.1.1 光功率计	289
8.1.2 光纤熔接机	290
8.1.3 光时域反射仪 (OTDR)	291
8.1.4 相干光时域反射仪 (C-OTDR)	293
8.1.5 误码测试仪	295
8.1.6 光谱分析仪	296
8.1.7 多波长光源	297
8.1.8 光衰减器	297
8.1.9 综合测试仪	298
8.1.10 电脉冲反射测试仪 (电时域反射仪)	299
8.2 光纤传输特性测量	300

8.2.1	衰减测量	300
8.2.2	带宽测量	301
8.2.3	色散测量	302
8.2.4	偏振模色散测量	303
8.3	光器件参数测量	304
8.3.1	拉曼开关增益和增益系数测量	304
8.3.2	光源参数测量	309
8.3.3	无源光器件参数测量	309
8.4	光纤通信系统指标测试	311
8.4.1	系统 Q 参数测量	311
8.4.2	平均发射光功率和消光比测试	312
8.4.3	光纤通信系统误码性能测试	313
第 9 章 海底光缆通信系统运行管理和维护 (OA&M)		315
9.1	海底光缆通信系统运行和管理	315
9.1.1	对网络管理系统的要求	315
9.1.2	电信管理网 (TMN) 和网络管理系统 (NMS) 概述	316
9.1.3	海底光缆通信系统的监视系统	318
9.1.4	线路终端设备 (LTE) 和 OA&M 监控功能	319
9.1.5	海底光缆通信系统运行管理和维护 (OA&M) 功能	321
9.1.6	海底光缆通信网络管理系统 (NMS)	323
9.1.7	亚太 2 号海底光缆通信系统网络管理系统简介	326
9.1.8	通信系统网络管理接口技术	328
9.2	海底光缆通信系统线路维护	330
9.2.1	海底光缆保护组织及其作用	330
9.2.2	海底光缆通信系统线路维护	330
9.2.3	海底光缆线路施工维护措施	331
9.2.4	海底光缆线路故障种类	332
9.3	海底光缆线路故障监测定位	333
9.3.1	线路故障定位概述	333
9.3.2	海底光缆光纤故障定位	333
9.3.3	海底光缆绝缘体故障定位	334



9.3.4 海底光缆电极法定位	335
9.3.5 海底光缆开路故障测试	336
9.3.6 中继器或分支单元故障定位	336
9.4 海底光缆线路故障修复	337
9.4.1 海底光缆线路故障修复程序	337
9.4.2 海底光缆线路故障修复过程	339
9.5 海底光缆通信系统设备管理和维护技术	341
9.5.1 海底光缆通信系统海底设备维护	341
9.5.2 海底光缆通信系统岸上设备维护	342
附录 名词术语索引	345
参考文献	357



第1章 海底光缆通信系统概述

1.1 海底光缆通信系统在世界通信网络中的地位和作用

海底光缆通信容量大、可靠性高、传输质量好,在当今信息时代,起着极其重要的作用,因为世界上绝大部分互联网越洋数据和长途通信业务是通过海底光缆传输的,有的国外学者甚至认为,可能占到 99%^[97]。中国海岸线长、岛屿多,为了满足人们对信息传输业务不断增长的需要,大力开发建设中国沿海地区海底光缆通信系统,改善中国通信设施,对于推动整个国民经济信息化进程、巩固国防具有重大的战略意义。

随着全球通信业务需求量的不断扩大,海底光缆通信发展应用前景将更加广阔。

一个全球海底光缆网络可看作由 4 层构成,前三层是国内网、地区网和洲际网,第 4 层是专用网。连接一个国家的陆地和附近的岛屿,以及连接岛屿与岛屿之间的海底光缆组成国内网。国内网是在一个国家范围内分配电信业务,并向其他国家发送电信业务。地区网是连接地理上同属一个区域的国家,在该地区分配由其他地区传送来的电信业务,以及汇集并发送本地区发往其他地区的业务。洲际网是连接世界上由海洋分割开的每一个地区,因此我们称这种网为全球网或跨洋网。第 4 层与前三层不同,它们是一些专用网,如连接陆地和岛屿之间的国防专用网、连接岸上和海洋石油钻井

平台间的专用网, 这些网由各国政府或工业界使用。

1.1.1 国内网络

一般来说, 国内网络由陆上光缆组成, 但是以下一些情况可在国内敷设海底光缆:

- (1) 沿海用户被多山地带所分割;
- (2) 在不安定地区缺乏必要的基础设施;
- (3) 两地相距太远, 用常规的陆上技术难以实现通信;
- (4) 海岸城市在市区采用现有技术已不可能埋设光缆, 比如现有光缆管道已满, 需埋设新管道, 但是费用太高; 或者安装管道可能严重破坏城市街道等。

短距离海底光缆尽量不用海底光放大器或海底光中继器, 因为建设和维护中继器的费用都非常高, 系统需要使用发射功率相当高的光发射机和远泵光放大器 (见第 4 章)。

敷设大容量海底光缆干线连接沿海城市, 对于通信业务迅速增长的发展中国家是一种有效途径。这些海底光缆与陆上光缆线路一起, 可构成备份环或格状网结构, 支持最复杂的服务和应用, 有利于电信业务的管理和畅通, 并提高网络的可靠性和抗毁能力。在这些应用中, 海底终端由中心局或远端站管理, 提供极大的传输容量, 满足日益增长的需要。因此, 海底光缆通信系统在国家通信网络中扮演着重要的角色。

1.1.2 地区网络

在地区网络中, 借助海底光缆分支技术, 海底干线光缆把几个国家连接在一起, 为几个国家提供服务, 每个国家独立地接入网络。假如一个国家的分支光缆断裂, 则只中断到该国的业务, 其他国家可以继续使用干线光缆进行通信。地区网络的这种结构, 可保证每个国家通信线路的独立性, 维护每个国家的主权, 防止国家机密的泄露。早期的分支单元由无源分路器和合路器组成; 而现在, 所有的地区网络都采用了 WDM 技术, 使用光分插复用器 (OADM) 作为分支单元, 在不同的位置分出或插入特定的波长信号。

这种地区网络具有很高的经济性, 因为单根光缆可以连接许多国家。从该地区发出的电信业务再与洲际网的连接点汇集。比如“非洲 1 号”环非洲海底光缆网络, 全长 32 000 km, 连接 40 个国家, 初期传输速率为 2.5 Gbit/s, 采用 SDH-16 设备和 16 个波长的密集波分复用技术, 每个信道工作在 2.5 Gbit/s, 信道间距为 100 GHz, 图 1-1