

“863”通信高技术丛书

高速超长距离 光传输技术

龚倩 徐荣 叶小华 张民 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

“863”通信高技术丛书

高速超长距离光传输技术

龚 倩 徐 荣 叶小华 张 民 编著

人 民 邮 电 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

高速超长距离光传输技术 / 龚倩等编著. —北京: 人民邮电出版社, 2005.5
(“863” 通信高技术丛书)
ISBN 7-115-13372-7

I. 高... II. 龚... III. 高速度: 长距离—光通信 IV. TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 025796 号

内 容 提 要

近几年, 光传输系统在提高传输容量和延长传输距离这两个方向不断取得进步。每一次传输容量和传输距离的大幅度提升, 都是基于新技术的采用和关键问题的解决而实现的, 同时又伴随着新限制因素的出现。本书系统介绍了在增大传输容量和延长无电中继距离的研究道路上, 科研人员所开发出的多种关键新技术, 全书共 9 章。第 1 章介绍了光通信系统的高速超长距离传输发展趋势、高速超长距离传输系统面临的技术挑战、使用的关键技术和高速超长距离光传输系统的应用优势。第 2 章介绍了大容量传输的复用技术、高速超长距离光传输系统的技术规范及新型波分复用器技术。其余各章分别系统地论述了高速超长距离光传输系统的各种关键技术的基本原理和应用方法, 主要包括新型光纤技术、色散补偿技术、拉曼放大技术、前向纠错 (FEC) 技术、新型编码调制技术和高速光孤子传输技术等。最后一章以“济南—青岛—大连”跨海长距离传输系统和“西宁—格尔木—乌鲁木齐”陆地长距离传输系统的应用为例, 介绍了高速超长距离传输系统的技术优势、系统设计方法和应用模式。

本书可供从事光通信技术研究, 光传输系统开发、生产、工程维护和运营管理的人员参考, 也可作为工程管理人员的培训教材与高等院校光通信专业教师和学生的参考书。

“863” 通信高技术丛书
高速超长距离光传输技术

- ◆ 编 著 龚 倩 徐 荣 叶小华 张 民
责任编辑 陈万寿
- ◆ 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: 17.75
字数: 423 千字 2005 年 5 月第 1 版
印数: 1—3 000 册 2005 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-13372-7/TN · 2474

定价: 38.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

序

随着网络化时代的到来,人们对信息的需求与日俱增。光通信技术作为信息技术的重要支撑平台,在未来信息社会中将起到十分重要的作用。光传输系统从诞生初始,人们就期望着其向更高速、更长距方向发展,然而,光纤传输网络的许多不利因素影响了传输性能。

在国家“863”计划和其他计划及部门的大力支持下,经过我国科技人员长期不懈的艰苦努力,我国的光通信技术的研究近年来也已取得了很大的进展,实现了从无到有、从小到大、从弱到强的历史性跨越,综合实力显著增强。目前已陆续完成了 155Mbit/s、622Mbit/s、2.5Gbit/s、10Gbit/s SDH 系统,8×2.5Gbit/s、16×10Gbit/s、32×10Gbit/s、160×10Gbit/s WDM 系统,10Gbit/s、40Gbit/s OTDM 试验系统,宽带接入系统以及全光通信试验网、自动交换光网络试验平台等一系列项目,自行研制成功的 WDM 光传输系统已在许多省市投入运行和提供服务,各种光纤局域网、城域网、广域网已得到了广泛应用,我国已成为世界上为数不多的几个掌握了全套 SDH 和 WDM 光通信系统系列产品技术的国家之一,在世界光通信系统和光网络领域占据了一席之地。

高速长距离光传输是光通信的一项核心技术,意义重大。通过研究高速长距离光传输技术,可以解决未来互联网高速和宽带传输问题。从宏观来说,对光纤传输的要求当然是传输距离越远越好,所有研究光纤通信技术的机构,都在这方面下了很大工夫。特别是在光纤放大器出现以后,这方面的记录接连不断被刷新。不仅每个跨距的长度不断增加,例如由当初的 20km、40km,最多为 80km,增加到 120km、160km,而且总的无再生中继距离也在不断增加,如从 600km 左右增加到 3 000km、4 000km。从技术的角度看,拉曼光纤放大器的出现,为增大无再生中继距离创造了条件。同时,采用有利于长距离传送的线路编码(如 RZ 或 CS-RZ 码),采用 FEC、EFEC 或 SFEC 等技术提高接收灵敏度,用色散补偿和 PMD 补偿技术解决光通道代价和选用合适的光纤及光器件等措施,已经可以实现超过 STM-64 或基于 10Gbit/s 的 DWDM 系统,以及 4 000km 无电再生中继器的超长距离传输。

本书作者徐荣博士有在著名通信设备制造企业从事光传输产品研发的经历,有参与国家重大研究项目及参与运营商骨干传输网络建设可研评审、建设方案制定、设备测试的实际经验,同时作为国家“863”计划信息技术领域“高性能宽带信息网”重大专项光网络任务组专家、信息产业部通信科技委电信传输专家咨询组成员、光纤在线(www.c-fol.net)战略顾问,不但对高速超长距离光传输的理论与技术有全面深入的理解,而且还十分熟悉各主流设备制造商的设备及各运营商在实际组建传输网络时对高速超长距离传输系统的使用情况。各位作者理论功底深厚、工程设计与应用经验丰富,而且在国际国内科技期刊上发表数十篇论文,取得了一定的成绩。

本书作者曾编著了《高速宽带光互联网技术》、《光网络的组网与优化设计》、《城域光网络》、《光以太网》等多部书籍,因此更加深刻地理解高速超长距离传输系统对下一代光网络最基础的支撑作用。光网络是由光传输系统和光交换系统组成的,光传输系统为宽带网络提

供更高速率、更长距离、更高可靠性的链路传输，可以说没有高速超长距离传输系统这个“基石”，就无法建设下一代光网络这个“高楼大厦”。因此在编著本书时，作者注重选题和选材，内容系统详尽，在叙述时力求深入浅出、通俗易懂，理论分析和实际应用相结合，具有很高的学习参考价值。该书系统论述了高速、超长距离光传输系统各项关键技术的基本原理、应用特点、性能改善情况，系统总结了所在课题组先后承担并圆满完成的多项国家级科研项目成果。他将这本书献给奋战在光通信界的朋友们和愿意投身光通信事业的读者，目的是使更多的读者掌握光纤通信的最新技术，致力于发展我国的民族光通信产业，使我国的民族光通信产业在国际上占有一席之地。

作者既具有多年从事光通信研究的工作经历，又有参与多项国家重大高技术研究项目的实践经验，因而对该项技术把握得比较准确，论述得比较流畅。我认为本书的出版能起到及时雨的作用，不仅技术性很强，而且具有很高的易读性，能够很好地对目前如火如荼的大容量、超长距离光传输系统建设提供基础理论和应用实践方面的指导，是一本不可多得的好书。

中国科学院资深院士
北京邮电大学名誉校长，教授



2005年3月16日
于北京邮电大学

前 言

由于通信技术的发展和业务的不断涌现,特别是 IP 业务的迅猛崛起,导致全球信息量呈级数增长,通信业务由传统单一的电话业务转向高速 IP 数据和多媒体为代表的宽带业务,对通信网络的带宽和容量提出了越来越高的要求。

由于光纤传输技术的不断发展,在传输领域中光传输已占主导地位。光纤存在巨大的频带资源和优异的传输性能,是实现高速、大容量传输的最理想的传输媒质。从过去 20 多年的光通信发展史看,商用系统的速率已从 45Mbit/s 增加到 10Gbit/s, 40Gbit/s 系统不久也将实用化,进一步增加传输系统的容量、降低每比特传输成本的唯一出路,就是转向使用光的复用技术。

传统的光纤传输一般在一个波长信道上进行,如果忽略激光器的线宽和啁啾效应,则对应 1550nm 处的高斯脉冲,即使采用光时分复用(OTDM)技术使信号速率达 100Gbit/s,其所用带宽也仅为光纤带宽的一小部分。考虑到 EDFA 技术可以在 1550nm 的光纤低损耗窗口约 35nm 宽度的窗口提供增益,为了利用这些资源,可以在这个窗口采用多个波长通道进行的信号传输,从而使光纤的传输容量大幅度增加。为了区分以前在 1310nm 和 1550nm 所进行的波长复用传输,将这项技术称为密集波分复用(DWDM)技术。近来波分复用技术的大量应用,使光传输速率已在向太比特每秒的数量级进军。

1996 年美国的 Bell Labs 首先进行总容量 1Tbit/s 级的 DWDM 传输实验,这在当时是最新记录,然而此记录不到一年就被刷新。在 OFC '97 上 NEC 宣布了 2.6Tbit/s DWDM 传输实验,号称世界最新记录。但此记录仅保持了两年又被刷新,在 OFC '99 上 NTT 宣布了 3Tbit/s OTDM+DWDM 的传输实验, Siemens 公司也实现了 80×40Gbit/s 总容量为 3.2Tbit/s 的传输实验,打破了 NEC 的记录。同年 Nortel 在 Telecom'99 上宣布了两个世界记录,即单信道 80Gbit/s 和总容量 6.4Tbit/s 的最高记录。但这两个记录刚刚宣布不久,在 11 月份的新发明展示会上, Lucent 宣布实现了单信道 160Gbit/s 和 DWDM 16Tbit/s 的传输实验记录。近几年来波分复用技术发展十分迅猛,目前 1.6Tbit/s 的波分复用 WDM 系统已经开始大量商用,2001 年日本 NEC 和法国阿尔卡特公司分别在 100km 距离上实现了总容量为 10.9Tbit/s (273×40Gbit/s) 和总容量为 10.2Tbit/s (256×40Gbit/s) 的传输容量记录,这几年,光传输系统容量基本上在十几 Tbit/s 量级徘徊,新记录主要表现在采用各种不同传输新技术和获得更长无电中继距离方面。

光纤通信自从问世以来,一直向着两个目标不断发展。一是延长中继距离,二是提高传输速率(容量)。光纤的吸收和散射会导致光信号的衰减,光纤的色散将使光脉冲发生畸变,导致误码率增高,信号传输质量降低,限制了通信距离。为了满足长距离传输的需要,必须在光纤线路上加入中继器,以补偿光信号的衰减和对畸变信号进行整形。传统的中继器是采用光—电—光的工作方式,电信号的响应速度有限,中继站的电子设备便成了高速传输的“瓶颈”。过去 10 年中,掺铒光纤放大器(EDFA)的应用大大增加了无电中继的传输距离;密

集波分复用 (DWDM) 技术已成功地应用于光通信系统, 极大地增加了光纤中可传输信息的容量, 降低了系统的成本。光纤通信技术正向着超高速、大容量通信系统发展, 并且逐步向下一代光网络演进。但随着波分复用信道数的增加, 单通道速率的提高, 光纤的非线性效应成为限制系统性能的主要因素, 长距离传输必须克服色散和非线性效应的影响。因此如何提高光纤传输系统的容量, 增加无电再生中继的传输距离, 已经成为光纤通信领域研究的热点。

对光纤传输的要求肯定是传的距离越远越好, 所有研究光纤通信技术的机构, 都在这方面下了很大的工夫。特别是在光纤放大器出现以后, 这方面的记录接连不断。不仅每个跨距的长度不断增加, 例如, 由当初的 20km、40km, 最多为 80km, 增加到 120km、160km。而且总的无再生中继距离也在不断增加, 如从 600km 左右增加到 3 000km、4 000km。从需求的角度来看, 这主要是在传送网络发展到一定阶段, 为了通路组织更方便, 除了像“穿糖葫芦串”那样沿途分插业务的形式外, 对于特大枢纽节点之间往往需要大容量的直达通路。这样可以减少再生中继器的数量, 降低建设和运行维护成本, 提高可靠性。从技术角度看, 光纤放大器的出现, 尤其是拉曼光纤放大器的实用化, 为增大无再生中继距离创造了条件。同时, 采用有利于长距离传送的线路编码, 如 RZ 或 CS-RZ 码, 采用 FEC、EFEC 或 SFEC 等技术提高接收灵敏度, 用色散补偿和 PMD 补偿技术解决光通道代价和选用合适的光纤及光器件等措施, 已经可以使超过 STM-64 或基于 10Gbit/s 的 DWDM 系统, 实现 4 000km 无电再生中继器的超长距离传输。

人们将更高速率和更多信道的信息合波后送入一根光纤并不断试图将信号传输得更远, 以求增大单根光纤的传输容量和降低每比特的成本。但是, 更高的单信道速率、更小的信道间隔和更远的无电中继传输距离都意味着对光纤的色散、色散斜率、偏振模色散、非线性效应 (四波混频交叉相位调制等) 等性能提出了新的严格要求。可以说, 每一次传输容量和传输距离的大幅度提升, 都与市场需求和关键技术的突破这两方面紧密相关。回顾光传输系统的历史发展轨迹可以明显地看出, 无电中继传输距离的每一次较大规模提升, 总是基于新技术的采用和关键问题的解决而实现的, 同时又伴随着对传输距离的新限制因素的出现。这些物理限制因素包括放大大自发射辐射噪声积累、色度色散、非线性效应和偏振模色散等。在单信道 10Gbit/s 的长距离 DWDM 光传输中, 又以前三种物理效应最为明显, 而偏振模色散 (PMD) 效应主要在更高速率如 40Gbit/s 传输系统中才明显起作用。为了应对这些技术挑战, 增大传输容量和延长无电中继距离, 科研人员开发出了多种新技术, 包括新型光纤、分布式拉曼放大技术、前向纠错 (FEC) 技术、新型编码调制技术、光孤子传输技术、色散补偿和非线性控制技术。

本书系统介绍了在增大传输容量和延长无电中继距离的研究道路上, 科研人员所开发出的多种关键新技术及其应用方式。全书共 9 章。在第 1 章, 首先介绍了光通信系统的高速超长距离传输发展趋势, 随后简要叙述了高速超长距离传输系统面临的技术挑战, 之后顺理成章地引出了针对这些技术挑战, 研究人员通过积极探索所产生的关键技术, 最后分析了高速超长距离光传输系统的典型解决方案和应用优势。在第 2 章介绍了实现大容量传输的光复用技术原理、高速超长距离光传输系统的技术规范及新型波分复用器技术。在其余各章分别系统地论述了高速超长距离光传输系统的各种关键技术的基本原理和应用方法, 主要包括新型光纤技术、色散补偿技术、拉曼放大技术、前向纠错 (FEC) 技术、新型编码调制技术和高速光孤子传输技术等。在最后一章以“济南—青岛—大连”跨海长距离传输系统和“西宁—格

尔木—乌鲁木齐”陆地长距离传输系统的应用为例，介绍了高速超长距离传输系统的技术优势、系统设计方法和应用模式。

本书围绕高速超长距离传输系统，以最新的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，系统全面地介绍了高速超长距离传输系统的概念、系统结构、面临的挑战和各项关键技术的引入思路、实现原理、应用模式、系统性能改进情况分析等内容。

特别感谢全球光通信领域领先的中文网站、Lightreading 中国合作伙伴——光纤在线（www.c-fol.net）网站在各方面对作者的大力支持。网站上刊登的新闻、技术资料给作者编写这本书起到了巨大作用，在论坛上和业界同仁的交流也同样使作者受益匪浅。

在本书编写过程中，得到了科技部高新司、国家“863”计划信息技术领域通信技术主题、国家“863”计划信息技术领域“高性能宽带信息网”重大专项相关专家的悉心指导，特别感谢叶培大资深院士、邬贺铨院士、邬江兴院士和林金桐、纪越峰、李红滨、胡卫生、王志威、金耀辉等专家教授多年来给予的大力支持和着力栽培。

高速超长距离传输是一项正在发展中的技术，涉及光器件、光子处理、光系统等众多的研究方向。由于作者水平有限，书中难免有错误和不当之处，恳请同行和读者批评指正。

徐 蒙

2005 年 3 月 1 日

于北京

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 光通信系统向高速、超长距离演进	2
1.2 高速、超长距离光传输系统面临的挑战	5
1.2.1 光信噪比 (OSNR)	6
1.2.2 色散	8
1.2.3 非线性效应	10
1.3 高速、超长距离光传输系统的关键技术	13
1.4 高速、超长距离光传输系统的典型解决方案	19
1.5 高速、超长距离光传输系统的技术优势	21
1.5.1 为什么要选择高速、超长距离传输系统	21
1.5.2 高速、超长距离光传输系统的发展机遇	24
1.5.3 高速、超长距离光传输系统的应用特点	25
第 2 章 高速超长距离 WDM 系统规范和波分复用器新技术	27
2.1 实现高速大容量的复用技术	28
2.1.1 复用技术分类	28
2.1.2 波分复用	29
2.1.3 光时分复用	30
2.1.4 光码分复用	32
2.2 高速超长距离 WDM 系统波长频谱的划分	33
2.3 高速超长距离 WDM 系统接口分类	38
2.3.1 有线路光放大器系统的参考配置	38
2.3.2 系统分类和应用代码	39
2.4 高速超长距离 WDM 系统光接口参数的定义及要求	40
2.4.1 应用在 80/160 通路 WDM 系统中的 $S_1 \cdots S_n$ 和 $R_1 \cdots R_n$ 接口	41
2.4.2 80/160 通路 WDM 系统主光通道参数	42
2.5 高速超长距离传输的波分复用器新技术	44
2.5.1 波分复用器分类及特点	44
2.5.2 几种新型波分复用器	45
2.5.3 高速超长距离 WDM 系统对波分复用器件的新要求	48

第 3 章 新型光纤技术	51
3.1 光纤技术的发展历程	51
3.2 光纤新材料及其制造技术	53
3.2.1 光纤新材料	54
3.2.2 光纤预制棒的制备技术	55
3.3 光纤性能对 DWDM 系统的影响及其优化	58
3.3.1 色度色散	58
3.3.2 偏振模色散	60
3.3.3 色散斜率	61
3.3.4 有效面积	62
3.3.5 零色散波长	63
3.4 构筑超大容量传输系统的新型光纤技术	63
3.4.1 G.652 型光纤及其最新发展	63
3.4.2 G.653 和 G.654 型光纤	66
3.4.3 G.655 型光纤及其最新发展	67
3.4.4 大有效面积光纤	72
3.4.5 低色散斜率光纤	73
3.4.6 全波光纤	77
3.4.7 最新的 G.656 光纤	78
3.5 骨干传送网和城域传送网的光纤选择	80
3.5.1 不同应用领域对光纤特性的不同要求	80
3.5.2 骨干传送网光纤的选择	81
3.5.3 城域传送网光纤的选择	84
第 4 章 高速传输系统中的色散补偿技术	88
4.1 色散限制系统	88
4.2 线性色散补偿技术	90
4.2.1 色散补偿光纤	90
4.2.2 色散管理光纤	94
4.2.3 啁啾光纤光栅	97
4.2.4 啁啾的控制技术	98
4.2.5 线性预啁啾技术	99
4.2.6 色散支持传输 (DST) 法	99
4.3 非线性色散补偿技术	100
4.3.1 中间频谱反转技术	100
4.3.2 色散管理光孤子传输	101
4.3.3 非线性管理技术	101
4.4 偏振模色散及其补偿技术	102

4.4.1	PMD 的基本概念	103
4.4.2	表征 PMD 的参数	103
4.4.3	PMD 对光传输系统的影响	105
4.4.4	偏振模色散的测量	107
4.4.5	偏振模色散的补偿技术	111
第 5 章	拉曼放大技术	117
5.1	光放大器的发展	117
5.2	拉曼放大器技术	120
5.2.1	拉曼放大器的工作原理	120
5.2.2	拉曼放大器的性能参数	122
5.2.3	拉曼放大器的分类	127
5.2.4	拉曼放大器的应用方式	129
5.2.5	拉曼放大器的特点	131
5.3	拉曼放大在高速传输系统中的应用	135
5.4	拉曼放大对高速传输系统性能的影响	142
5.4.1	光信噪比	142
5.4.2	噪声指数	144
5.4.3	性能质量 Q 因子	144
5.4.4	拉曼放大与光纤非线性损耗的关系	146
第 6 章	前向纠错与数字包封技术	148
6.1	纠错码的定义及工作原理	149
6.1.1	通信系统中的差错控制	149
6.1.2	差错控制的编码类别	149
6.1.3	常用的纠错编码	151
6.2	前向纠错技术	153
6.2.1	前向纠错码	154
6.2.2	编码增益和净编码增益 (NCG)	156
6.2.3	FEC 误码纠错能力	158
6.2.4	FEC 功能的验证方法	160
6.2.5	FEC 的技术优势	161
6.3	前向纠错应用方式	162
6.3.1	SDH 系统中的带内 FEC	162
6.3.2	光传送网 (OTN) 中的带外 FEC	165
6.4	应用 FEC 对通信系统性能改善的分析	170
6.4.1	带内 FEC	171
6.4.2	带外 FEC	172
6.4.3	带外 FEC 与带内 FEC 纠错性能比较	173

6.5	超强 FEC (Super-FEC) 技术	174
6.5.1	超强 FEC 的实现方案	175
6.5.2	超强 FEC 的纠错性能和技术特点	181
6.5.3	SFEC 的产品示例	182
6.6	TDM 数字包封的 FEC 应用	184
6.6.1	ONNI 节点接口	184
6.6.2	TDM 数字包封器的信息结构	184
6.6.3	ONNI 信息结构	185
6.6.4	光信道传送单元 (OTU)	186
6.6.5	OTU 子帧 FEC 编码	188
6.6.6	数字包封技术的硬件实现	189
第 7 章	超长距离传输系统中的编码调制技术	191
7.1	编码信号的调制技术	191
7.2	调制码型技术	194
7.2.1	非归零码 NRZ	194
7.2.2	归零码 RZ	196
7.2.3	啁啾归零码 CRZ	198
7.2.4	载波抑制归零码 CSRZ	200
7.3	高速通信系统中各码型的传输特性	203
7.4	各种传输参数对不同码型系统的影响	206
7.4.1	色散对不同码型系统的影响	206
7.4.2	非线性效应对不同码型系统的影响	209
7.4.3	偏振模色散对不同码型系统的影响	211
第 8 章	高速光孤子传输技术	215
8.1	光孤子及其传输原理	215
8.1.1	光孤子的基本概念	215
8.1.2	光孤子传输原理	216
8.2	光孤子传输系统	218
8.2.1	光孤子传输系统的组成	218
8.2.2	光孤子传输系统存在的问题	219
8.2.3	光孤子传输控制技术	220
8.3	光孤子通信的特点和色散控制方案	221
8.4	色散管理光孤子传输技术	222
8.4.1	色散管理光孤子的基本概念	222
8.4.2	色散管理光孤子理论	225
8.4.3	色散管理光孤子的传输性能	227
8.4.4	DSM 的相关实验研究与讨论	229

8.5 光光子通信的研究现状与展望.....	231
第 9 章 高速超长距离传输系统应用示例	233
9.1 超长距离传输应用优势分析.....	233
9.2 济南—青岛—大连的跨海传输系统.....	237
9.2.1 使用 ALCA TEL DWDM 传输设备的系统设计	237
9.2.2 ALCA TEL DWDM 高速超长距离传输系统采用的特殊技术	242
9.2.3 Alcatel 带外 FEC (OOB-FEC)	243
9.3 西宁—格尔木—乌鲁木齐的超长距离传输系统	247
9.3.1 使用华为公司 DWDM 传输设备的系统设计	248
9.3.2 华为 DWDM 高速超长距离传输系统采用的特殊技术	254
9.3.3 OptiX BWS 1600G 的组网方式	258
缩略语	260
参考文献	264

第1章 概述

随着网络化时代的到来,人们对信息的需求与日俱增。全球范围内 IP 业务突飞猛进的发展,在给传统电信业务带来巨大冲击的同时,也为电信网的发展提供了新的机遇。信息时代有许多重要标志,最主要的和最基本的是人们相互之间的通信来往增多。以“信息高速公路”为目标的国家/全球信息基础结构(NII/GII)为人类社会架设了信息交流的桥梁。从发展历史来看,这样的信息基础结构有两大组成部分,即有线固定通信和无线移动通信。当然固定网和移动网、有线与无线必将互相依靠和紧密结合,在英文中常用 FMC/WWI(Fixed-Mobile Convergence/Wireline-Wireless Integration)表示。

由于新技术革命的推动,经济全球化和社会信息化趋势日益明显。在全球信息化浪潮的冲击下,人类对通信的容量、业务的种类和通信的质量的要求更是有增无减。随着通信业务量的快速增长,固定通信网必须相应地提供足够大的通信容量,以满足各种不同的通信业务需要,包括用户使用的计算机数据传输、多媒体以及传统的电话和娱乐电视。

有线通信网在过去的很长时期里主要是为电话通信服务,其线路是利用铜线,包括架空明线、对绞铜线电缆和同轴电缆。为了节约线缆资源和提高通信容量,从 20 世纪 50 年代起,在铜线线路上大量利用新的复用技术,称为载波电话;包括明线的 3 路、12 路,对绞铜线电缆的 60 路和小同轴电缆的 300 路及中同轴的 10800 路载波电话,当时都称“频分复用(FDM)”。用载波遏止、单边带传输方式,每路都是模拟电话,频带为 300~3400Hz,即各路载波频率间隔 4kHz,在频谱上依次排列。到了 20 世纪 70 年代,数字通信兴起,利用脉冲编码(PCM)技术,每路数字电话传输速率为 64kbit/s,质量满意,而且进一步使用“时分复用(TDM)”技术,30 路数字电话组成基群 2Mbit/s。正在那时,可用于通信的光纤开发成功,随即在有通信网的干线上用光纤代替铜线,传输数字电话信号质量很好。而且继续利用 TDM 技术,数字传输速率可从 2Mbit/s 升高到 8Mbit/s、34Mbit/s、140Mbit/s,相当于电话路数从 30 路增至 120 路、480 路、1920 路。一根光纤在一个方向可以同时传输如此多的电话路数,传输方法就是利用 TDM 技术复用多路电话组成的数字电话群直接向光载波调制,然后送入光纤进行传输。

光纤应用初期,由于光纤和光器件组成的系统在干线上处于试用阶段,传输由电的 TDM 技术组成的多路数字电话群,质量满意、成本合算,因此光纤通信系统很快在世界各地通信网上推广应用。由于光纤线路本身的可抗干扰、损耗低和容量大等特点比铜线电缆更适合于通信网发展的需要,且光纤系统本身的技术得到越来越显著的改进,因此长途和本地市内干线已不容置疑地使用光纤代替电缆,只有在一般用户末端,距离较短的用户线因光纤及光端机系统目前的成本较高,难以代替原来的对绞铜线。

光通信在过去为扩大网络传输容量起到了不可替代的顶梁柱作用。它的使用给我们的地球铺上了一层粗大的“信息管道”。展望未来,光通信仍将一如既往地向前发展,把我们的通信网从电到光推向更高的台阶。不仅在传输,而且在交换;不仅在网络核心,而且在网络边

缘，都将引入光通信，最终把光信号直接送到用户家中。光通信技术作为信息技术的重要支撑平台，在未来信息社会中将起到十分重要的作用。

1.1 光通信系统向高速、超长距离演进

随着人类社会信息化速率的加快，对通信的需求也呈高速增长的趋势；由于光纤传输技术的不断发展，在传输领域中光传输已占主导地位。光纤存在巨大的频带资源和优异的传输性能，是实现高速、大容量传输的最理想的传输媒质。光纤通信是传输技术的革命性进步，其诞生已有近 30 年的历史，直到今天还没看到任何一种新的技术能够取而代之。

光纤通信系统问世以来，一直向着两个目标不断发展。一是延长中继（再生）距离，二是提高系统容量，也就是所谓的向超高容量和超长距离两个方向发展，如图 1-1 所示。光纤的吸收和散射导致光信号的衰减，光纤的色散将使光脉冲发生畸变，导致误码率增高，信号传输质量降低，限制了通信距离。为了满足长距离传输的需要，必须在光纤线路上加入中继器，以补偿光信号的衰减和对畸变信号进行整形。传统的中继器是采用光—电—光的工作方式，电信号的响应速度有限，中继站的电子设备便成了高速传输的“瓶颈”。电再生设备使得整个系统结构复杂、成本昂贵。在超长距离传输系统中，再生中继是成本加大的主要因素。

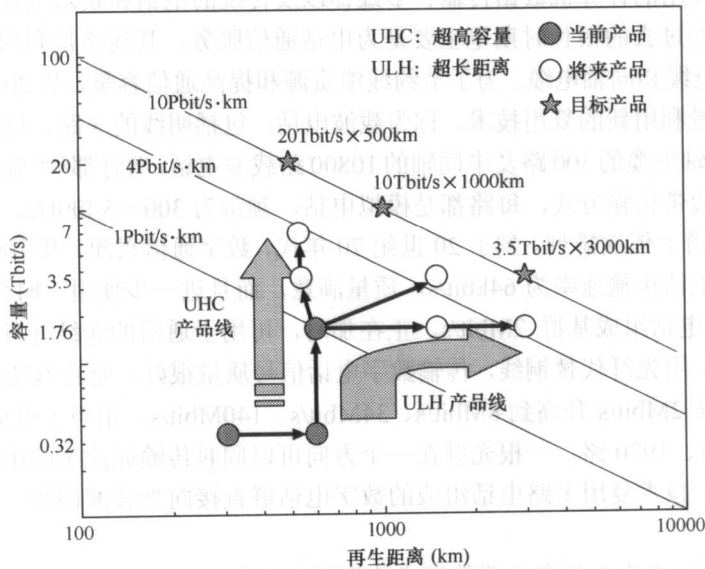


图 1-1 光纤通信系统的发展目标

提高光纤通信系统容量常采用的方法如图 1-2 所示。一是提高单信道速率，即使用时分复用（TDM）将传输速率由 2.5Gbit/s 升到 10Gbit/s 或再升至 40Gbit/s。二是使用密集波分复用（DWDM），一方面通过扩展光纤的可用光谱，例如使用 L 波带和 S 波带来增加 WDM 通路数量；另一方面通过将 WDM 系统的信道间隔减小，例如由 100GHz 缩小到 50GHz，甚至 25GHz 来增加 WDM 通路数量。

从 TDM 看，经历了 PDH 的四次群、五次群，以及 SDH 的 STM-1、STM-4、STM-16，直到今天的 STM-64。更高速率的 40Gbit/s 系统已有很多实验系统和现场系统测试的报道，

其实用化进程正在加速进行。然而，TDM 发展到 40Gbit/s 后已经很难再有突破，因为其传输速率会受限于集成电路硅材料和砷磷材料的电子和空穴的迁移率，还将受限于光纤的色度色散和偏振模色散，另外，经济成本也是不可忽视的重要因素。

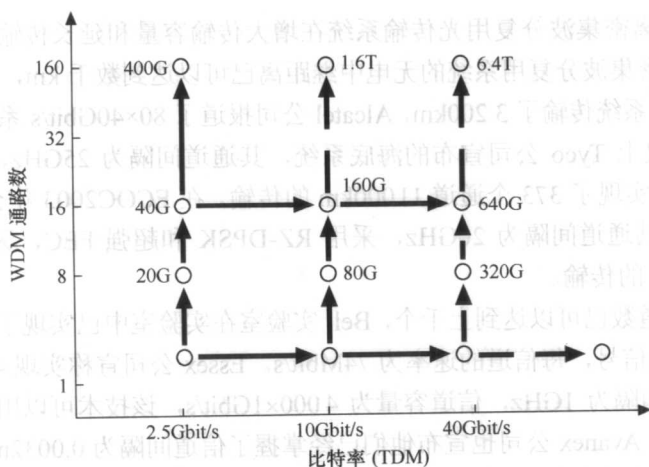


图 1-2 扩展光纤通信系统容量的途径

过去 10 年中，掺铒光纤放大器（EDFA）的应用大大增加了无电中继的传输距离，同时使密集波分复用（DWDM）技术变得经济可行。密集波分复用（DWDM）技术开辟了光纤通信系统容量高速增长的新篇章，一根光纤传输的波长数目已经从 8、16、32、40、80、160，提高到 256 甚至更多。在 1988 年至 2000 年的 12 年的时间内，光纤通信系统的容量提高了 1 000 倍！为了满足通信容量不断增长对带宽容量的需求，波分复用技术作为光传输系统的一种行之有效的升级扩容技术不断向着更高的单信道速率、更小的信道间隔（更多的波长）、更大的可用带宽的方向发展。如图 1-3 所示，一方面是减少波长之间的间隔，从一般的 100GHz 缩减到 50GHz、25GHz，另外一方面是扩展波长的谱宽，从传统的 C 波段扩展到 L 波段和 S 波段。此外还将信号的传输速率从 10Gbit/s 提高到 40Gbit/s。

近 20 年，光通信技术之所以在飞速发展，DWDM 技术起到了至关重要的作用；从外部因素看，飞速发展的互联网对光纤通信系统容量的不断提高起到了极大的推动作用。

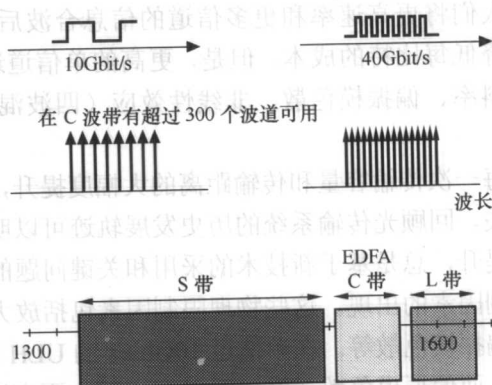


图 1-3 DWDM 系统的扩容方法

从宏观来说，对光纤传输的要求当然是传输距离越远越好，所有研究光纤通信技术的机构，都在这方面下了很大工夫。特别是在光纤放大器出现以后，这方面的记录接连不断。不仅每个跨距的长度不断增加，例如，由当初的 20km、40km，最多为 80km，增加到 120km、160km。而且总的无再生中继距离也在不断增加，如从 600km 左右增加到 3000km、4000km。从技术的角度看，拉曼光纤放大器的出现，为增大无再生中继距离创造了条件。同时，采用

有利于长距离传送的线路编码,如 RZ 或 CS-RZ 码,采用 FEC、EFEC 或 SFEC 等技术提高接收灵敏度,用色散补偿和 PMD 补偿技术解决光通道代价和选用合适的光纤及光器件等措施,已经可以使超过 STM-64 或基于 10Gbit/s 的 DWDM 系统,实现 4000km 无电再生中继器的超长距离传输。

目前,超长距离密集波分复用光传输系统在增大传输容量和延长传输距离这两个方面还在不断取得进步,密集波分复用系统的无电中继距离已可以达到数千 km,其中 Corvis 公司报道了 64×10Gbit/s 的系统传输了 3200km,Alcatel 公司报道了 80×40Gbit/s 系统传输了 7000km。在 OFC2003 年会议上 Tyco 公司宣布的海底系统,其通道间隔为 25GHz,采用 RZ-DPSK、EFEC 和 HRA 技术实现了 373 个通道 11000km 的传输。在 ECOC2003 年会议上 Alcatel 公司宣布的海底系统,其通道间隔为 20GHz,采用 RZ-DPSK 和超强 FEC,无 FRA 技术实现了 183 个通道 9120km 的传输。

单光纤中的信道数已可以达到上千个,Bell 实验室在实验室中已实现了在单光纤中同时传送 1022 个波长的光信号,每信道的速率为 74Mbit/s。Essex 公司宣称实现 4000 个波长密集波分复用系统,信道间隔为 1GHz,信道容量为 4000×1Gbit/s,该技术可以用于吉比特以太网和城域网的高速传输。Avanex 公司也宣布他们已经掌握了信道间隔为 0.0032nm 的技术,信道容量为 1000 个,并在实验室中进行了 16 个信道的实际传输试验。

单信道容量已开始从 10Gbit/s 向 40Gbit/s 发展,系统总传输容量大大增加。迄今为止,系统容量的最高纪录是 273×40Gbit/s (由 NEC 公司发布,系统共利用了 S、C、L 这 3 个波段),或 256×40Gbit/s (由阿尔卡特公司发布,系统采用了残留边带调制格式和偏振复用,频谱利用率达到 1.28bit/s/Hz)。在 2003 年的 OFC 会议上,OFS 公司公布了其最新的研究成果,即 6400km 的 40×40Gbit/s DWDM 系统,采用了 RZ-DPSK 码型;Alcatel 和 Fujitsu 则同时公布了采用常规不归零码(NRZ)在常规单模光纤上传输的 40×40Gbit/s 系统的长距离实验结果,其距离分别达到 2540km 和 1600km。

人们将更高速率和更多信道的信息合波后送入一根光纤,以求增大单根光纤的传输容量和降低每比特的成本。但是,更高的单信道速率和更小的信道间隔意味着对光纤的色散、色散斜率、偏振模色散、非线性效应(四波混频交叉相位调制等)等性能,提出新的严格要求。

每一次传输容量和传输距离的大幅度提升,都与市场需求和关键技术的突破这两方面紧密相关。回顾光传输系统的历史发展轨迹可以明显地看出,无电中继传输距离的每一次较大规模提升,总是基于新技术的采用和关键问题的解决而实现的,同时又伴随着对传输距离的新限制因素的出现。这些物理限制因素包括放大自发辐射噪声积累、色度色散、非线性效应和偏振模色散等。在单信道 10Gbit/s 的 ULH DWDM 光传输中,又以前三种物理效应最为明显,而偏振模色散(PMD)效应主要在更高速率如 40Gbit/s 的传输系统中才明显起作用。为了应对这些技术挑战,增大传输容量和延长无电中继距离,科研人员开发出了多种新技术,包括分布式拉曼放大技术、前向纠错(FEC)技术、新型编码调制技术、色散补偿和非线性技术等。

按照业界流行观点,长途传输系统可以分为以下三种:一是常规长距离传输(LH),指电中继段长度在 640km 以下的系统;二是亚超长距离传输(Extended LongHaul, ELH),指电中继段长度在 640km 至 2000km 以内;三是超长距离传输(ULH),指电中继段长度在 2000km