

光纤通信中的 光波技术

李齐良 唐向宏 钱正洪 著



科学出版社

光纤通信中的光波技术

李齐良 唐向宏 钱正洪 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍光纤通信中光波技术和理论,主要介绍了光纤通信的发展历史,光纤通信的基本理论,从麦克斯韦电磁理论出发,得到各种条件下光脉冲传输的非线性薛定谔方程。研究了群速度色散、自相位调制、调制不稳定性、光孤子、色散管理、非线性光纤耦合器、四波混频等理论。

本书可作为光纤光栅、光纤通信等专业的高年级本科生、研究生的教学参考书,也可供科技工作者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信中的光波技术/李齐良,唐向宏,钱正洪著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-030290-8

I. 光… II. ①李…②唐…③钱… III. 光纤通信 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 022743 号

责任编辑:张艳芬 / 责任校对:邹慧卿
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年3月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011年3月第一次印刷 印张:18 1/2

印数:1—3 000 字数:363 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在近代科学尤其是物理学发展的基础上,1838年,莫尔斯发明了电报,使人类进入了电通信时代。1948年,香农发表了著名的《通信的数学理论》,奠定了现代信息理论的基础,拉开了信息时代的大幕。理论上,载波的频率越高,传输信息的带宽就越大,于是人们将目光集中在比无线电波频率更高的光波上,希望获得更大的信息传输容量。激光的发现和光纤的发明已成为现代光通信技术发展的关键。

1960年,红宝石激光器的问世为现代光纤通信提供了可靠的光源。1966年,高锟预言了制造玻璃光纤的可能性。1970年,美国的康宁公司拉制出世界上第一条损耗为20dB/km的低损耗石英光纤,使得光纤通信走出了实验室,人类进入了光纤通信时代。

光纤通信之所以受到人们的极大重视,这是因为和其他通信手段相比,光纤通信具有无与伦比的优越性:

① 传输频带宽、通信容量大。光纤通信使用的光波频率在 10^{14} Hz左右,大大高于微波频率 10^9 Hz和电缆通信频率 $10^5 \sim 10^6$ Hz。载波频率越高,所能承载的通信容量也越大。

② 损耗低,中继距离长。目前,实用石英光纤的损耗可低于0.2dB/km,接近理论极限值。

③ 抗电磁干扰。

④ 保密性好、无串音干扰。光波在光缆中传输,很难从光纤中泄漏出来。

⑤ 节约有色金属和原材料。光纤的材料主要是石英(二氧化硅),石英是地球上取之不尽的,并且只需很少的原材料就可以拉制出很长的光纤。

⑥ 线径细、重量轻。光纤的芯径很细,约为0.1mm,它只有单管同轴电缆的1%。光缆的直径也很小,8芯光缆的横截面直径约为10mm,而标准同轴电缆为47mm。

⑦ 成本低廉。

本书是作者多年来对光纤通信进行理论研究的成果总结。其内容主要包括:

第1章概述了光纤通信发展的历史。第2章介绍了光纤中的色散和非线性,以及对通信系统的影响。第3章介绍了光孤子概念、调制不稳定性,并介绍了相应的研究方法。第4章介绍了光纤中的偏振效应及其应用。第5章介绍了色散管理理论及研究方法。第6章对非线性光纤耦合器耦合模理论、影响非线性耦合器开关效应的因素的研究结果进行了介绍。第7章对准相位匹配光纤参量放大器增益

平坦相关的研究结果、方法进行了介绍。第 8 章介绍了光纤光栅、光纤光栅耦合器的相关理论与研究方法。

在搜集本书材料过程中,得到了杭州电子科技大学图书馆的大力支持,他们为本书的研究提供了大量的文献资料。在撰写过程中,得到了朱海东、李院民、孙丽丽、李庆山、谢玉永、朱殷芳、金晶等同学的大力协助,他们为本书的一些研究做了大量的工作,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

作 者

2011 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 光纤通信发展的历史	1
1.1 高速大容量光纤通信系统的发展概况	2
1.2 波分复用技术	3
1.3 光时分复用通信	4
1.4 波分复用和光时分复用各自的优势	6
参考文献	8
第 2 章 光纤中色散和非线性对脉冲传输的影响	10
2.1 波动方程和亥姆霍兹方程	10
2.2 非线性薛定谔方程	11
2.3 非线性薛定谔耦合方程	14
2.4 色散的基本理论	15
2.4.1 色散的分类	16
2.4.2 色散对通信系统的影响	19
2.5 色散补偿技术	22
2.6 偏振模色散补偿技术	28
2.7 非线性折射效应	29
2.7.1 非线性折射率	30
2.7.2 不同传输区域的色散和非线性	32
2.7.3 自相位调制	33
参考文献	35
第 3 章 调制不稳定性与光孤子	38
3.1 调制不稳定性	38
3.2 光孤子在单模光纤中的传输	40
3.3 孤子的绝热特性	43
3.4 孤子的稳定性	44
3.5 孤子扰动	45
3.6 耦合方程的孤子解	46
3.6.1 归一化方程	46
3.6.2 方程的可积性	47

3.6.3 方程的解·····	48
3.7 两孤子解的波形演化·····	51
3.8 放大器链路中调制不稳定性·····	52
3.8.1 掺铒光纤中的非线性薛定谔方程·····	52
3.8.2 分布式放大器链路的调制不稳定性·····	55
3.8.3 集总式放大器链路的调制不稳定性·····	64
3.9 色散管理系统中调制不稳定性·····	74
参考文献·····	81
第4章 光纤中的偏振效应及其应用 ·····	85
4.1 具有偏振效应的耦合模方程·····	85
4.2 椭圆双折射光纤·····	86
4.3 利用保偏非线性双折射光纤对脉冲的整形·····	87
4.3.1 理论模型·····	88
4.3.2 变分方法·····	89
4.3.3 结果分析·····	90
参考文献·····	93
第5章 色散管理理论及其应用 ·····	96
5.1 色散管理孤子基本理论·····	96
5.1.1 色散管理孤子的概念·····	96
5.1.2 色散管理孤子的优势与特点·····	96
5.1.3 色散管理孤子的应用·····	98
5.2 色散管理基本原理·····	99
5.3 色散管理孤子系统定时抖动分析·····	102
5.3.1 色散管理孤子的数学模型·····	102
5.3.2 色散管理孤子参数的动力学方程推导·····	103
5.3.3 色散管理孤子系统定时抖动计算分析·····	104
5.3.4 色散管理孤子系统定时抖动数值模拟·····	105
5.3.5 色散管理孤子系统定时抖动的矩方法计算分析·····	108
5.4 色散管理系统中光脉冲的传输特性分析·····	109
5.4.1 光脉冲传输的理论模型·····	109
5.4.2 脉冲参数演化的动力学方程·····	110
5.4.3 色散管理系统中三阶色散的影响·····	113
5.4.4 色散管理系统中五次非线性的分析·····	115
5.5 相位共轭系统中色散补偿的研究及应用·····	117
5.5.1 相位共轭技术的色散补偿原理·····	117

5.5.2 时域相位共轭系统中高阶色散对信号传输的影响	120
5.5.3 频域相位共轭系统中拉曼效应对信号传输的影响	124
参考文献	129
第6章 光纤耦合器中孤子全光开关和传输特性	133
6.1 光纤耦合器开关的基本理论	135
6.1.1 光纤耦合器概述	135
6.1.2 光纤耦合器的分类	136
6.1.3 光纤耦合器的应用	136
6.2 耦合模理论	136
6.3 光纤耦合器的线性工作状态	139
6.3.1 低能量连续光束输入情况	139
6.3.2 低能量光脉冲输入情况	140
6.4 光纤耦合器的非线性工作状态	142
6.4.1 高能量连续光束输入情况	142
6.4.2 高能量准连续波输入情况	144
6.4.3 高能量超短光脉冲输入情况	145
6.5 高阶色散对孤子脉冲开关的影响	148
6.6 光纤耦合器中的孤子互作用	149
6.7 无源光纤耦合器中的孤子开关和传输	151
6.7.1 色散耦合系数	151
6.7.2 无源两芯光纤耦合器	153
6.7.3 无源三芯光纤耦合器	169
6.8 有源光纤耦合器中的孤子开关和传输	185
6.8.1 有源光纤耦合器的特性	185
6.8.2 有源两芯光纤耦合器	185
6.8.3 有源三芯平行线等距结构光纤耦合器	192
6.8.4 有源三芯等边三角形结构光纤耦合器	202
参考文献	205
第7章 参量过程与光纤参量放大器增益特性	210
7.1 二阶非线性光学效应	210
7.1.1 光学二次谐波产生	210
7.1.2 光学差频和光学参量放大	211
7.1.3 光学和频及频率上转换	212
7.2 三阶非线性光学效应	212
7.2.1 四波混频效应	212

7.2.2 参量增益和参量放大	214
7.3 相位匹配技术	216
7.4 级联高非线性光纤参量放大器增益特性	218
7.4.1 理论模型	219
7.4.2 小信号增益	219
7.4.3 参量放大器的增益分析	221
7.5 具有色散补偿的光纤参量放大器的增益特性	227
7.5.1 理论模型	227
7.5.2 光纤参量放大器的增益	229
7.5.3 光纤参量放大器增益平坦性分析	232
7.6 光纤参量放大器增益的频率相关性和偏振相关性	238
7.6.1 基本模型	238
7.6.2 信号增益的频率和偏振相关性	241
参考文献	243
第8章 光纤光栅	246
8.1 光敏光纤的制备	248
8.2 布拉格光栅的衍射原理	252
8.3 光纤光栅中的有关理论	252
8.3.1 耦合模理论	252
8.3.2 光子带隙	254
8.3.3 滤波特性	256
8.3.4 相移的二芯光纤光栅耦合器滤波和耦合特性	258
8.3.5 非线性色散曲线	269
8.3.6 光纤光栅中的调制不稳定性	270
8.3.7 光纤光栅耦合器中的调制不稳定性	272
8.4 三芯光纤光栅耦合器	277
8.4.1 两种排列结构的耦合方程	277
8.4.2 两种排列结构的禁带结构比较	278
8.4.3 等边三芯耦合器的耦合模方程数值模拟分析	281
参考文献	285

第 1 章 光纤通信发展的历史

电报电话发明后百余年的时间内,人类信息的传输主要依靠金属导线。人们开始采用对称线,而传输线的传输速率和容量极其有限,到了 20 世纪 40 年代,同轴电缆开始投入使用,它解决了对称线之间频率越高串音干扰越严重的问题,使通信容量得到了突破性的进展。但是同轴的损耗很大,每隔两公里就需要增加一个再生中继,继续增加传输带宽显然是很困难的。这时,人们将注意力集中在了金属波导传输的研究上,从理论上讲,圆波导有希望解决同轴电缆频率越高传输损耗越大的关键难题,但是人们在实践中很难做出数学上理想的圆波导,从而使得传输损耗增大,串音干扰更严重。

1966 年,美籍华人高锟博士和霍克哈姆(Hockham)在其发表的论文中,第一次预见了低损耗的光纤能够应用于通信,敲开了光纤通信的大门。自此,光纤在通信中的应用引起了人们的重视。1970 年 8 月,美国康宁公司首次研制成功损耗为 20dB/km 的光纤,光纤通信的时代由此开始了。与传统的电通信相比,光纤通信是以高频率(10^{14} Hz 数量级)的光波作为载波,以光纤作为传输介质的通信。由于光纤通信具有损耗低、传输频带宽、容量大、体积小、重量轻、抗电磁干扰、不易串音等优点,自其出现以来就备受业内人士的青睐,发展非常迅速。从 1980 年到 2000 年这 20 年间,光纤通信系统的传输容量增加了近 10000 倍,传输速度在过去的十几年中大约提高了 100 倍。目前,我国长途传输网的光纤化已超过 80%,预计到 2013 年,全国光缆建设长度将再增加约 250km,并且将有 11 个大城市铺设 10G 以上的大容量光纤通信网络。

由于光的载频比厘米波段的圆波导高出 4~5 个数量级,因此光纤通信的容量将比厘米波段的圆波导传输的通信容量高 4~5 个数量级,于是世界上研究波导的人力和物力基本都转向光纤通信方面。1976 年,美国贝尔实验室在亚特兰大和华盛顿之间建立了世界第一条实用化的速率为 45Mbit/s 的光纤通信线路,其采用的是多模光纤,光源用的是发光二极管(LED),波长是 $0.85\mu\text{m}$ 的红外光。同时,在 20 世纪 70 年代末,大容量的单模光纤和长寿命的半导体激光器研制成功。光纤通信系统开始显示出长距离、大容量的优越性。

经过十多年的努力,人们解决了光纤传输的损耗问题,到 20 世纪 80 年代中期光纤的传输损耗已从 20dB/km 降至 0.2dB/km,为光纤通信在世界范围内的迅速发展提供了坚实的技术基础,实际上这也标志着人类从电子通信走向了光子通信,是一次质的飞跃。从辩证唯物论的观点来看,任何质变都将带来巨大的发展,而实

际也证明了这一点。

光纤的发明,引发了通信技术的一场革命,是构成 21 世纪即将到来的信息社会的一大要素。正是由于光纤制造技术和光电器件制造技术的飞速发展,以及大规模、超大规模集成电路技术和微处理机技术的发展,带动了光纤通信系统从小容量到大容量、从短距离到长距离、从低水平到高水平、从旧体制准同步数字系列(PDH)到新体制同步数字系列(SDH)的迅猛发展。

自 20 世纪 90 年代初以来,人类社会进入了一个前所未有的信息交换量急剧增长的时代。计算机、互联网技术的迅速兴起,给人类的物质和精神生活带来了翻天覆地的变化,通信已成为人们生活中的重要内容。计算机网络和接入网技术的快速发展以及个人计算机的普及促进了国际互联网的飞速发展,由数字移动通信业务导向个人通信而引发的通信技术革命以及多媒体通信技术的出现,导致了所谓的信息爆炸。信息爆炸刺激了全球通信业务的疯狂增长,使数据电信业务呈爆炸性增长,同时对通信网传递信息的能力提出了更高的要求。据有关专家预测,到 2015 年,对通信系统的传输速率的需求将达到 $5\sim 150\text{Tbit/s}$ 。为了满足超大容量通信系统的需求,要求光传输系统向超高速($>40\text{Gbit/s}$)、超大容量($>10\text{Tbit/s}$)和超长距离($>20000\text{km}$)的全光通信网络发展。光纤通信技术以其巨大的宽带潜力和无与伦比的传输性能在通信领域,特别是在长距离大容量通信中占据了不可替代的重要位置。

目前,扩大光纤通信系统传输容量的有效途径是采用复用技术,特别是密集波分复用(DWDM)、光时分复用(OTDM)以及二者之间的有机结合,已逐渐成为现代通信干线网的主体。但这种光通信方式的一个关键技术就是要获得具有低时间抖动、高重复率、接近变换限(TL)的高质量超短脉冲源或孤子源。而锁模光纤激光器可以同时为多个波长信道提供所需光源,被认为是未来长距离大容量光纤通信系统的理想光源。而在未来的全光通信网和超高速大容量光纤通信系统所可能采用的光源中,锁模光纤激光器是极具开发潜力的超短光脉冲源。

1.1 高速大容量光纤通信系统的发展概况

近年来,为了提高通信系统的容量,人们一直致力于各种复用通信方式的研究。光纤通信复用方式通常可以分为光波分复用与光信号复用。光波分复用技术又分为波分复用(WDM)和空分复用(SDM)以及偏振复用;光信号复用又分为时分复用(TDM)和频分复用(FDM)。有人把频分复用归到波分复用里,也有人把空分复用理解为一种技术上最简单的扩容手段,即通过增加光缆的光纤芯数和增加传输设备来增加传输的总容量,但严格地说,空分复用是同一根光纤芯中的空间分割,现仅用于长距离通信。由于偏振复用技术要求复杂,特别是对传输介质有特

殊的要求,因此至今仍局限在实验室里。真正商用的复用方式只有光波分复用和光时分复用。

1.2 波分复用技术

光纤具有巨大的带宽,在 1550nm 波长附近 200nm 范围内,对应带宽约有 25THz 可以利用;在 1310nm 波长附近,也有约 25THz 可利用的带宽。这样,一根光纤可提供的理论传输带宽约为 50THz。波分复用技术作为一种非常有效的扩容手段,可以充分利用光纤的带宽,并随着技术的成熟越来越显示出强大的生命力。

光波分复用是指一条光纤中同时传输具有不同波长的几个光载波。国际电信联盟(ITU-T)建议光波分复用的信道在氪灯谱线(波长为 1552.52nm)附近处频率间隔为 100GHz 整数倍,即在此处波长间隔为 0.8nm 的整数倍,最近 ITU-T 等机构正在考虑将信道间隔减小到 50GHz,每个光载波又各自载荷不同的信息业务,而每一信道可以以不同的形式进行调制通信。

图 1.1 给出了波分复用通信的原理图。具有不同波长、各自载有信息的若干个载波经由通道 $CH_1, CH_2, \dots, CH_n$ 等进入合波器(MUX),被耦合到同一根光纤中,再经过此光纤长距离传输,到终端进入分波器(DEMUX),按波长将各载波分离,分别进入各自通道 $CH'_1, CH'_2, \dots, CH'_n$,并分别解调,从而使各自载荷的信息重现。在传输过程中,为了补偿各种损耗对信号造成的衰减,每隔一定距离要加入一个掺铒光纤放大器(EDFA)对信号进行放大。

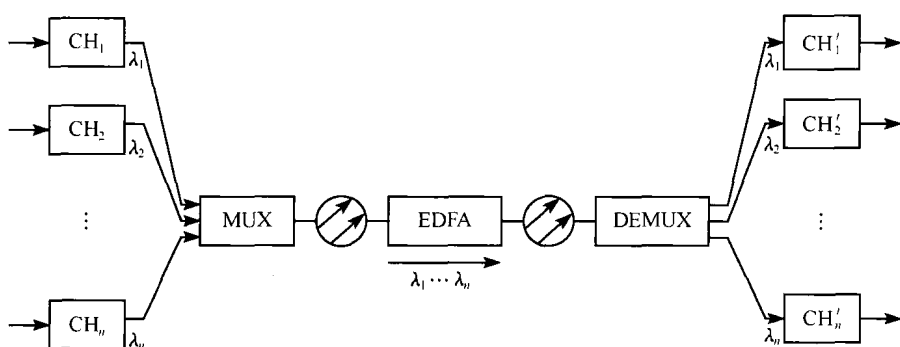


图 1.1 波分复用通信的原理图

为了进一步提高通信容量,可以从以下三个方面考虑:

① 采用电时分复用技术,提高每个通信信道的数据传输速率。在光纤通信发展的二十多年里,采用电时分复用技术的光纤通信系统的传输速率几乎以每年

10~100 倍的速度稳定增长。目前,单信道的最高速率为 40Gbit/s,几乎达到了电子器件速率的极限。

② 减小信道间隔,在有限的带宽范围内增加信道数目。光源稳频、阵列波导光栅滤波、波长交错器(interleaver)等技术使得系统中的信道间隔从 ITU-T 规定的 100GHz 变得更低。然而,信道间隔的减小将会伴随非线性效应的增强,信道间隔小于 50GHz,四波混频(FWM)效应的影响将会引起信号在信道间的串扰,必须采取相应的抑制措施;另外,小的信道间隔还要求系统元件具有严格的波长稳定性,所有这些要求导致了系统成本的上升。

③ 增加传输带宽。通过开发新型超宽带器件,充分利用光纤丰富的通信带宽资源,将是提高光通信容量最有效的方法。近年来,L-波段(1570~1620nm)和 S-波段(1480~1530nm)光通信系统的研发引起了人们的广泛关注,并已经取得了很大的进展。多波段光纤放大器共同使用的尝试,为以后充分利用光纤丰富的带宽资源,实现多窗口超宽带光纤通信奠定了基础。

波分复用通信的关键技术包括波长可调谐及多波长光源技术、掺饵光纤放大器技术、光纤传输技术等。

1.3 光时分复用通信

光时分复用是一种利用时隙传送信息的技术,其传输原理如图 1.2 所示。在发送端,超短脉冲光源(pulse source)每发送一个脉冲就对应产生一个时隙,每个时隙经过 N 个不同的路径,也就是经过距离不同的光纤延时线后依次输出,精确控制光纤延时线的长度便可得到 N 个相等的时隙组成的一帧,如此循环下去,就使得许多相同的帧传输下去,这一过程称为复用过程,事实上就是一个并行转换成串行的过程。在传输过程中各种损耗需要用掺饵光纤放大器来补充损失的功率。帧信息流到达接收端后,经过与复用过程相反的解复用过程,将不同的时隙分配给指定的用户,这又是一个将串行转换成并行的过程。整个传输过程中需要保持时钟同步使发送端和接收端的时隙准确一一对应。目前,电时分复用(ETDM)技术已经非常成熟,也为人们所熟知。光时分复用的结构与电时分复用类似,不同的是,电时分复用的复用和解复用是在电域内进行,而光时分复用的复用和解复用是在光域内完成,从而克服了电时分复用存在的电子瓶颈问题。与波分复用系统不同的是,在光时分复用中,采用单一光波长传输。

光时分复用技术并不是仅仅用来提高光纤的传输容量,它们更广泛的应用前景是作为网络技术来组建全光网。所谓全光网,即数据从源节点到目的节点的传输过程以及信号在网络中的处理(包括交换和路由选取)始终在光域内进行,这样就避免了在所经过的各个节点上的光/电和电/光转换时受到电子瓶颈的限制,极

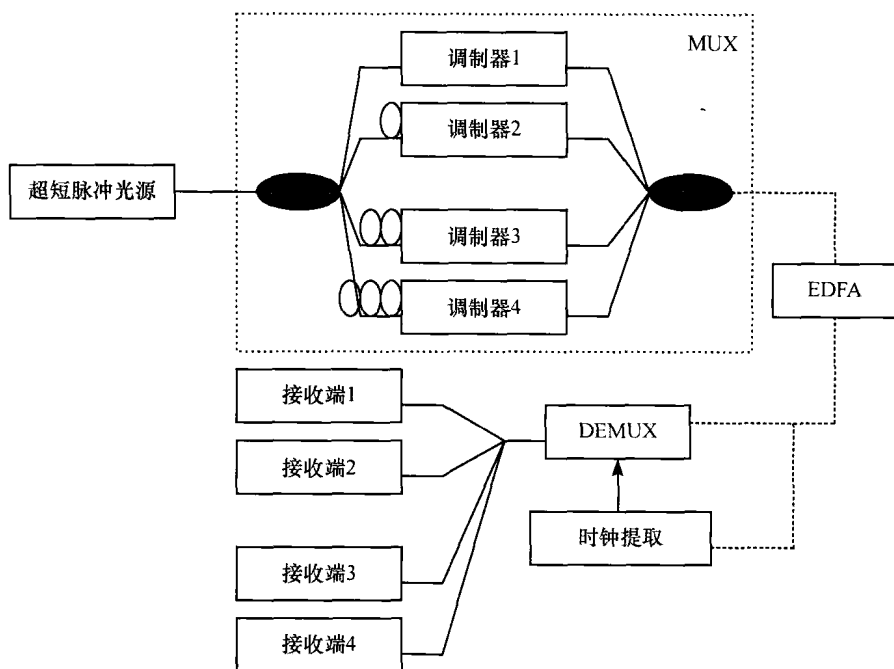


图 1.2 光时分复用原理图

大地提高了网络的容量和吞吐量。同时,由于信息在传送过程中始终保持光信号的形式,因此全光网具有极强的抗电磁干扰性能,在强电磁环境中的生存性得到了极大提高,这是全光网的另一个技术优势。

光时分复用全光网可提供比传统网络高得多的速率,一般可支持单信道大于100Gbit/s的网络传输速率,并且网络容量以每10年增长10倍的速度继续增长。因此,光时分复用全光网为带宽容量的进一步升级提供了又一种技术选择,有望在网络多媒体、虚拟现实技术、超级计算机互联等领域内获得广泛应用,具有巨大的应用前景。

从目前的研究情况来看,光时分复用有三个研究发展方向:第一个发展方向是研究更高速率的系统,日本电信电话株式会社一直在做这方面的工作,其光时分复用实验系统的最高速率已从100Gbit/s、200Gbit/s、400Gbit/s提高到640Gbit/s;第二个发展方向是光时分复用实用化技术和比特间插的光时分复用网络技术,欧洲一直在从事40Gbit/s的光时分复用系统和网络方面的研究工作,其中一些关键器件已接近实用,如锁模半导体激光器、光电型和全光型分插复用器等,而且在40Gbit/s的光时分复用信号的传输方面也进行了许多现场实验,取得了很大进展;第三个方向是光时分复用全光分组网络,同电的分组交换网络将代替电的电路交换网络一样,光的分组交换网络将是全光网络的一个发展方向,美国在这方面做

了大量的研究,英国电信目前也在进行这方面的研究。

时分复用的关键技术包括高重复速率超短光脉冲源、超短光脉冲传输技术、时钟提取技术、光时分复用技术、全光中继再生技术等。

1.4 波分复用和光时分复用各自的优势

1. 波分复用与光时分复用技术的对比

波分复用技术与光时分复用技术相比,具有以下优点:

① 由于波分复用系统的单路信号传输速率较低,因此其色散受限距离比相同传输容量的光时分复用系统长。

② 波分复用系统传输容量的扩充可以通过增加设备模块,以增加波长数的方式完成,实现起来较为方便;利用光时分复用扩充系统传输容量,由于要在光域内对信号进行处理、恢复时钟、识别信头以及选出路序,需要有全光逻辑和存储器件,而这些器件尚不成熟,系统结构与匹配技术也比较复杂,因此实现起来比较困难。

③ 利用波分复用技术可以进行复杂的网络设计,组网比较方便,而且可以用光上/下载器件在网络节点交换数据,比在光时分复用系统终端用大型设备交换数据具有更高的性价比。

光时分复用技术与波分复用技术相比,也有一定的独特之处:

① 波分复用技术是多波长多通道的传输技术,随着波长数的增多,光纤中的有效传输功率增加,四波混频、自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)等非线性效应对系统的影响加剧,限制了波分复用的有效扩展,并成为设计系统时必须考虑的问题;而光时分复用技术是单路信号在一根光纤上传输,有效传输功率较低,上述的非线性效应不明显,对系统几乎没什么影响。

② 波分复用系统需要特殊设计增益平坦的光放大器,而且放大器的增益应与波长数无关,以防止某一路信号发生故障时影响到其他信号,即光放大器也必须是增益钳制的;而在光时分复用系统中则不需要考虑多个波长对放大器的影响。

③ 波分复用系统所需设备较光时分复用系统多,相对重复投资大。

综上所述,波分复用技术与光时分复用技术各有优势,但波分复用技术更为成熟,实现起来比较方便,可以迅速在现有通信系统的基础上实现扩容。光时分复用技术尚处于研发阶段,尽管国内外也进行了不少实验,建成了一些实验系统,但它还是属于未来的技术。在目前阶段,各国均以发展波分复用为主,同时发展光时分复用。波分复用可以缓解光时分复用未成熟时网络对大容量的需求,且反过来促进光时分复用技术的发展;光时分复用技术成熟后使扩容更方便,而且为波分复用提供了更高的基础,将来二者结合用于光纤通信系统中,将更充分发挥

光纤通信系统的最大潜力和最优良的性能,从而实现超大容量、超长距离的信号传输。

2. 光孤子的发展现状

光孤子是一种特殊的皮秒数量级上的超短光脉冲,具有容量高、距离长、误码率低、抗噪声能力强等优点。早在1973年,它的存在就由美国贝尔实验室的 Hasegawa 从理论上推断得出。1983年,贝尔实验室的 Mollenauer 首次研制成功了第一支铯芯锁模孤子激光器 CCL,并最终检测出脉冲为10ps的光孤子经过10km传输无明显变化,首次从实验上证实了光孤子传输的可能性。

在光孤子通信领域内,美国和日本处于世界领先水平。美国贝尔实验室已经成功实现了将激光脉冲信号传输5920km,还利用光纤环实现了5Gbit/s、传输15000km的单信道孤子通信系统和10Gbit/s、传输11000km的双信道波分复用孤子通信系统。日本利用普通光缆线路成功地进行了超高20Tbit/s、远距离1000km的孤立波通信,日本电报电话株式会社推出了速率为10Gbit/s、传输12000km的直通光孤子通信实验系统。时域上的亮孤子、正色散区的暗孤子、空域上展开的三维光孤子等由于完全由非线性效应决定,并且不需要任何静态介质波导,近年来备受国内外研究人员的重视。

3. 光纤接入网技术的发展

随着通信业务量的不断增加,业务种类也更加丰富。作为光纤接入中极有优势的无源光网络(passive optical network,PON)技术早就出现了,它可以和多种技术相结合,如ATM、SDH和以太网等,并分别产生APON、GPON和EPON。三者相比,EPON继承了以太网的优势,成本相对较低,但对时分复用类业务的支持难度相对较大。所谓EPON就是把全部数据装在以太网帧内来传送的网络技术。IEEE802.3 EFM(Ethernet for the first mile)指出,它是一种采用点到多点网络结构、无源光纤传输方式、基于高速以太网平台和TDM时分媒体访问控制方式(media access control,MAC)、提供多种综合业务的宽带接入技术。目前,95%左右的局域网使用以太网,所以选择以太网技术作为IP数据最佳的接入网是十分合乎逻辑的,并且原有的以太网只限于局域网,MAC技术是点对点的连接,与光传输技术结合后的EPON不再只限于局域网,还可以扩展到城域网、甚至广域网。而光纤到户接入技术也采用EPON技术。

我国光纤通信行业发展开始较早,行业水平与国际水平相比差距较小。经过几十年的发展,我国光纤通信产业已形成了自己的发展模式和特点。随着行业规模和产业性能的扩大以及产业链条的逐步完善,整个行业竞争能力也在进一步加强。由于受全球网络经济衰退带来的全球经济缓慢的影响,光纤通信行业进入行

业周期性的低迷中,而亚太地区,包括我国在内由于市场需求稳定增长,光纤通信的发展并未停止不前。

从制式上讲,从1995年以前的以PDH为主发展到目前SDH占绝对优势。从光波模式上讲,多模传送推出没多久就被单模传送替代了。从通道上讲,从起初的以单通道系统为主发展为现在的以多通道即DWDM系统为主。从速率上讲,经历了从34Mbit/s、140Mbit/s、565Mbit/s到622Mbit/s、2.5Gbit/s的升级过程,目前长途网逐步演变为以10Gbit/s为基础的DWDM系统占主导地位。从网络结构上讲,从简单的点到点链形系统发展为环形结构,再进一步演变为格形网,现在我国的主干光缆网络已经不再是简单的“八纵八横”,而是一张覆盖全国包括青藏高原在内的、比较完善的网状网。此外,像同步网和管理网这类支撑网络也已经相对到位。我国在“十五”期间通过重点科技攻关,已经掌握了40Gbit/s SDH光通信设备和系统的基本技术,在G.652和G.655光纤上的无再生传送距离均达到560km,更为我国网络的升级打下了技术基础。

目前,国内主流的传输技术是波分复用系统,我国波分复用网上单波主流速率为10Gbit/s,可以通过波分复用技术实现 160×10 Gbit/s的传输能力;在国外40G系统已经完全实现商用,成本低于4个10G波分系统,而且国内也实现了这项技术的突破,由我国自主研发的 80×40 Gbit/s波分复用系统已经在网络建设中应用。与之对应,40G路由器接口已经出现,表明为IP业务而建设的光传输网络从技术上可以达到Tbit/s的水平,完全可以满足现阶段运营商对超高容量传输网络的需求,但目前Tbit/s的传输网络应用不多,随着软交换技术的发展,Tbit/s传输网络将会取得巨大的发展。

在我国,光孤子通信技术的研究也有一定的成果,国家“863”计划项目成功地进行了光时分复用光孤子通信关键技术的研究,实现了20Gbit/s、105km的传输。

参 考 文 献

- 蔡君,刘伟平,康莹. 2005. FTTH实现技术综述[J]. 光纤与光缆及其应用技术,4:37~40
- 岑贤道,安常青. 1998. 网络管理协议及应用[M]. 北京:清华大学出版社
- 邓忠礼. 2003. 光同步传送网和波分复用系统[M]. 北京:清华大学出版社
- 高斌,张劲松,陈涛,等. 2003. 光纤参量放大器技术及其最新进展[J]. 光通信研究,2:49~52
- 胡保民,刘德明,黄德修. 2002. EPON:下一代宽带接入网[J]. 光通信研究,5:24~28
- 王加莹. 2003. 长途超大容量DWDM光通信技术及展望[J]. 光通信技术,2:4~8
- Kapron E P, Keck D B, Maurer R D. 1970. Radiation losses in glass optical waveguides[J]. Applied Physics Letter,17(3):423~425
- McKinstrie C J, Radic S, Xie C. 2003. Phase conjugation driven by orthogonal pump waves in birefringent fibers[J]. Journal of the Optical Society of America B,20(7):1437~1446