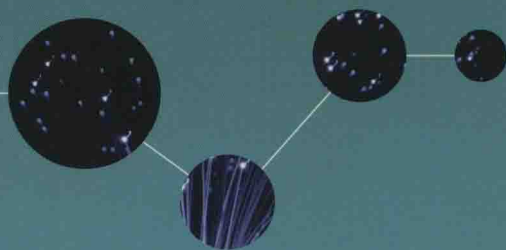


NONLINEAR TECHNOLOGY
AND APPLICATION IN
OPTICAL COMMUNICATION
SYSTEM

光通信系统中 非线性技术的应用

李齐良 钱正洪 唐向宏◆著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

光通信系统中非线性技术及应用

李齐良 钱正洪 唐向宏 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

光通信系统中非线性技术及应用 / 李齐良, 钱正洪, 唐向宏著. — 杭州: 浙江大学出版社, 2016. 5

ISBN 978-7-308-15658-5

I. ①光… II. ①李… ②钱… ③唐… III. ①光通信系统—非线性—通信技术—研究 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 047638 号

光通信系统中非线性技术及应用

李齐良 钱正洪 唐向宏 著

责任编辑 许佳颖 金佩雯

责任校对 陈慧慧 汪淑芳

封面设计 续设计

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州中大图文设计有限公司

印 刷 杭州日报报业集团盛元印务有限公司

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 19

字 数 341 千

版 印 次 2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-15658-5

定 价 57.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式: 0571-88925591; <http://zjdxcs.tmall.com>

前 言

光纤通信是以光波作为信息载体、以光导纤维作为传输介质的一种通信方式,因其巨大的传输容量和可靠性强等突出优点,不仅被认为是影响 21 世纪的关键技术,而且必然成为未来全球高速大容量宽带综合业务数字网(B-ISDN)的骨干。而波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)技术的实用化,使光纤的传输容量得到了极大的提高。这种技术可以充分利用光纤巨大的带宽资源,同时传输多种不同类型的信号,并可实现单根光纤双向传输,具有高度的组网灵活性、经济性和可靠性,为高速大容量的宽带综合业务网的传输提供了有效途径。特别是近几年来,密集波分复用(dense wavelength division multiplexing, DWDM)技术的发展为光纤带宽利用提供了有效途径,使点到点的光纤大容量传输技术取得了突出进展。然而现代光通信网络是在光纤链路上连接开关和路由等电子器件所构成的电光网络,这种网络的一个重要的“电子瓶颈”是信息传输经由网络节点时必须经过耗时的光—电转换、电信号处理、电—光转换过程,而且在光纤中传输的信息必须被处理成和电子线路相匹配的电子数据速率,这大大限制了网络的吞吐量。在最近十年间,处理器和相关的外围设备的速度已经提升了两个数量级,而像开关和路由等网络节点处的电子连接器件只提升了一个数量级,它们在网络节点处的信息处理速度大大限制了整个通信网络的信息容量。因此,全光网络(all-optical network, AON)应运而生,在这种网络中,信息的传输和交换全部使用光信号,不再需要中间的光—电和电—光转换,是下一代网络(next generation network, NGN)的理想选择。

本书以光通信中的非线性技术及其应用为研究对象,旨在探讨基于非线性现象的光子学器件实现的理论基础以及可行性与有效性,共分 7 章。第 1 章主要介绍光通信的发展历史和进展。第 2 章介绍了色散与非线性的概念,然后从数学的角度对色散进行详细定义,最后从通信容量和信号失真两方面介绍了色散和非线性对光纤通信系统的影响。第 3 章介绍了两种非对称定向耦合器,即传统非对称非线性定向耦合器(由两不对称的传统光纤波导组成)和非线性反向耦合器(由一正折射率材料波导和一负折射率材料波导组成);分别采用变分法和分步傅立叶变换数值模拟法对非对称非线性耦合器中的孤子开关特性和

孤子传输特性进行了分析。第4章研究了有源光纤光栅和光纤光栅耦合器的色散、滤波和时延可调特性。第5章阐述了受激布里渊散射过程中的两个主要特征对象,包括阈值和增益谱;通过 Kramers-Kronig 色散关系,分析了受激布里渊散射效应在增益谱附近对群折射率的影响;基于布里渊增益频谱的可重构特性,构造了一种将两个布里渊本征衰减谱叠加在本征增益谱两翼的频谱模型,通过这种基于重构的布里渊增益频谱,分析了信号脉冲的时延与展宽特性,包括布里渊增益、衰减频谱在相同和不同峰值功率两种情况。第6章分析了有源单环微谐振腔中耦合系数对单环微谐振腔输出特性曲线的影响、增益对单环微谐振腔输出信号的时延的影响,以及有源双环微谐振腔传输特性。第7章对基于四波混频的应用进行了研究,分析了四波混频原理以及单泵浦、双泵浦光参量放大器中高重复率脉冲的产生。

作者长期从事光纤通信技术与非线性光纤光学研究工作,本书是对近几年研究工作的一些总结,为推动国内非线性光子技术的研究和应用尽绵薄之力。今在浙江省重点学科建设经费和杭州电子科技大学资助下,终得以出版。研究生华晓锋、张爱辛、王紫阳、张勇、丰韵、王哲、袁洪良、朱梦云、张真等同学参与了本书的写作,在此一并表示感谢。

作 者

2016年5月

目 录

1 绪 论	1
1.1 光纤通信的历史	2
1.2 光纤通信的结构和特点	3
1.3 光通信技术的发展	4
1.4 光孤子	9
2 光纤中的色散和非线性特性	16
2.1 色散的基本理论	16
2.2 色散对光通信系统的影响	19
2.3 光纤中的非线性与薛定谔方程	20
3 对称和非对称耦合器开关和传输特性	26
3.1 耦合器研究进展与现状	26
3.2 非对称光纤波导定向耦合器简介	29
3.3 耦合模方程	30
3.4 耦合模方程的归一化过程	32
3.5 负折射率材料及含有负折射率材料波导的耦合器简介	33
3.6 负折射率材料波导非对称反向耦合器理论	35
3.7 反向耦合器中输入连续波情况	36
3.8 低能量连续光束输入情况	39
3.9 光纤非对称定向耦合器的孤子开关特性和传输特性	44
3.10 含负折射率材料波导的非对称非线性反向耦合器开关和传输特性 研究	61
3.11 本章小结	73
4 无源和有源光纤光栅及耦合器开关和传输特性	75
4.1 光纤光栅耦合器的基本理论	75

4.2	光栅耦合器的线性传输特性	86
4.3	掺杂光纤光栅中光信号传输及开关特性	97
4.4	光纤光栅耦合器的开关特性研究	107
4.5	有源光纤光栅的特性	123
4.6	有源光纤光栅耦合器的传输及开关特性	128
4.7	本章小结	145
5	基于受激布里渊效应的慢光效应	147
5.1	基于非光纤介质的慢光研究现状	147
5.2	光纤中受激布里渊散射慢光理论分析	153
5.3	光信号在受激布里渊散射过程中的传输特性	161
5.4	信号脉冲时延特性的研究	171
5.5	受激布里渊散射对脉冲展宽的影响	173
5.6	基于重构布里渊增益谱和衰减谱的慢光理论研究	178
6	单环和双环微谐振腔的传输特性分析	191
6.1	微环谐振腔的概述	191
6.2	微环谐振腔的工作原理	197
6.3	直通/下路型微环谐振腔	200
6.4	有源单环、双环微谐振腔的传输特性分析	203
6.5	直通/下路型微环谐振腔的传输特性及开关特性分析	217
7	光参量放大器及其应用	234
7.1	四波混频	234
7.2	基于单泵浦结构参量放大器的脉冲波长转换	241
7.3	基于双泵浦结构参量放大器的脉冲产生	258
7.4	泵浦波相位调制对产生脉冲的影响	270
	参考文献	278
	索引	296

1 绪 论

摘 要:本章介绍了光通信发展的历程、光纤通信的结构特点和基本技术,以及光子开关的相关概念和分类。

信息的传递自人类诞生之日起就已经产生,并如影随形地伴随着人类的每一步发展。从最初依靠声音和可见光传输到后来语言文字的发明,再到电话和电报的广泛应用,信息的传递发生了翻天覆地的变化。电话和电报的发明将人类带入了电子信息时代,它改变了以往信息传递时间长、信息量小的缺点,基本实现了信息的实时传递。

随后,互联网的诞生更进一步拉近了人们与世界的距离,真正做到了足不出户便尽知天下事,各种宽带业务也应运而生,如高清电视、数字电视、视频点播、电视电话会议等。随着人们对信息量的需求急剧增加,对信息传递速度的要求日益增高,传统的电信网络已经不能满足呈级数增长的信息的传递。信息容量的剧增促使人们寻找新的传输载体——光。

光纤通信的特点是传输容量大、可靠性高。但在发展初期,光纤通信系统以光电混合系统的方式存在,这种系统的传输介质为光纤,但在节点上仍然使用电子器件对信号进行中继和放大。这在初期很好地解决了传输速率的问题。但是随着对带宽需求的持续增加,光电混合网络已经不能满足人们的需求,因为中间的光/电/光转换限制了传输速率的继续增加。要解决这样的问题,只能将网络全光化,因此光器件的研究显得很有必要。

光纤的发明引起了通信技术革命,是构成 21 世纪即将到来的信息社会的一大要素。正是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(plesiochronous digital hierarchy, PDH)到新体制同步数字系列(synchronous digital hierarchy, 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、互联网技术迅速兴起,给人类的物质和精神生活带来

了日新月异的变化,通信成为人们生活中的重要内容。由于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而促进互联网的飞速发展,由数字移动通信业务导向个人通信而引发的通信技术的革命,以及多媒体通信技术的出现,等等,所有这些促进了所谓的“信息爆炸”。“信息爆炸”刺激了全球通信业务的疯狂增长,使数据通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。为了满足超大容量通信系统的需求,光传输系统向超高速($>40\text{Gb/s}$)、超大容量($>10\text{Tb/s}$)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已经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(dense wavelength division multiplexing, DWDM)、光时分复用(optical time division multiplexing, OTDM)以及二者之间的有机结合,这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(transform limit, 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及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 光纤通信的历史

人类从很久以前就已经开始使用光通信了,只是很长时间以来使用的都是可见光。比较典型的有烽火和旗语。烽火利用燃料燃烧产生的浓烟将敌人来犯的消息传递出去。旗语使用不同的旗子表达不同的意思,是古代一种重要的通信方式,现在世界各国海军仍在使用。此外,手语、灯塔和信号灯等都可以算作简单的光通信系统。这种可见光短视距的光通信的信息容量很低。

1880年,贝尔发明了“光电话”。这种电话使用薄膜镜面将声音调制到太阳光上。在接收端,使用光导电的硒电池对光波解调,将信息转化为电信号。该系统的信息容量虽然比前面提到的系统要大,但仍然很有限。“光电话”最终并没有被推广。

进行大容量的光传输,必须解决两个方面的问题——合适的光源和传输介质。光源要求要有足够的能量并且光谱狭窄,传输介质要求损耗低。1960年,梅曼发明了红宝石激光器,解决了光通信中光源的问题,是实现大容量光通信

的一大突破。

1986 年, Kao 和 Hockham 就介质纤维表面光频波导发表了文章, 认为玻璃纤维能够进行长距离传输, 并指出光纤损耗下降到 20dB/km 后光纤通信就可成功实现。1970 年, 康宁公司研制出损耗为 20dB/km 的光纤。1974 年, 贝尔实验室将光纤损耗降低到 1dB/km 。1979 年, 日本电报电话公司将损耗进一步降低为 0.2dB/km 。至此, 光通信中的光源和传输介质问题都得到了解决, 光通信获得了快速发展。

光纤通信的发展主要集中在损耗较低的区域, 也称为窗口。多模光纤一般使用波长为 $800\sim 900\text{nm}$ 的窗口, 也称为第一传输窗口, 此处的损耗比较大, 使得这个范围的波长只适合短距离传输。第二传输窗口以 1300nm 为中心, 第三传输窗口以 1550nm 为中心, 第四传输窗口以 1600nm 为中心。其中 1550nm 区域的色散和损耗都很低, 这个范围的波长最适用于长距离传输系统。

从光纤通信发展历程可以看到, 传输波的波长由短到长, 光纤模式由多模到单模, 传输容量由小到大。

1.2 光纤通信的结构和特点

基本的光纤通信系统主要由发射机、信道和接收机构成, 如图 1.1 所示。

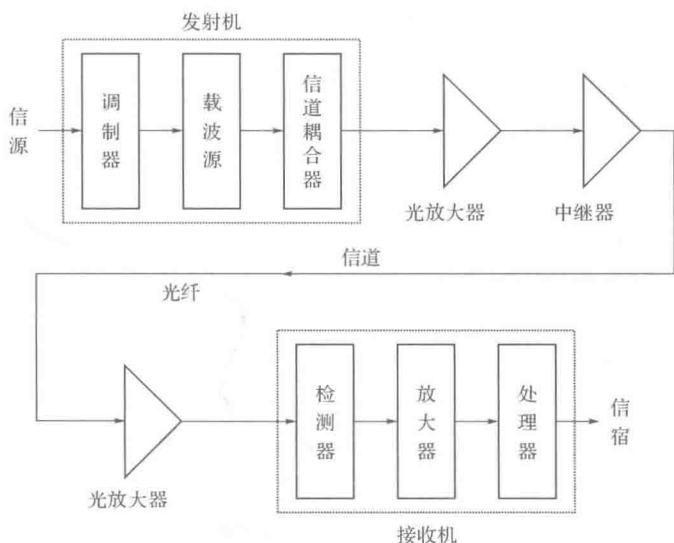


图 1.1 光纤通信系统原理

信源的作用主要是将非电信号转化为电信号。发射机一般包含调制器、载波源和信道耦合器。在光纤通信系统中载波源为半导体激光器和发光二极管。信道主要包含光放大器和中继器,其中中继器适用于数字信号,而放大器则对模拟信号和数字信号均适用。检测器也可称为解调器,它将光波转换成电流。

光纤按照折射率可以分为阶跃折射率光纤和渐变折射率光纤。按照模式可以分为多模光纤和单模光纤。本文讨论的光纤仅限于单模光纤。

自从1970年超低耗光纤问世到现在,光纤通信技术获得了异常迅猛的发展与极其广泛的应用。这是由于其与电通信相比有如下明显的优越性。

(a)通信容量大,传输距离长。光通信常用的低损窗口在1550nm附近,光载波频率约为 2×10^{14} Hz,带宽约为12THz。利用WDM技术,单根光纤的传输速率可以达到640Gb/s。普通光纤的损耗可以低于0.2dB/km,光纤中的信号在传输15km后才衰减为原来的一半。

(b)光纤质量轻,便于铺设和运输。光缆重量约为同长度电缆的1/200,甚至更低,便于运输和铺设。

(c)抗射频干扰和抗电磁干扰能力强,传输信息不易丢失和失真,保密性能好。光纤、玻璃和塑料都是绝缘体,不论是内部的信号还是外部的电磁辐射,都不会在光纤中形成电流。同时,光波被限制在纤芯内,不会发生泄漏,也不会对其他光纤中的信号形成干扰。

(d)光纤通信用材少,对环境污染小。光纤的主要材料是二氧化硅,这种资源含量丰富。相对制造电缆的铜来讲,光纤的价格低廉,且在制造的过程中对环境的污染小。

(e)光缆适应性强,寿命比较长。光纤通信系统的扩展性强,通过对节点器件的升级就能实现网络的扩容和升级。长的使用寿命可以降低系统的更新成本。

1.3 光通信技术的发展

通信网络经历了几十年的发展,已经由电通信网络演变为光电混合网络,以后将向全光网络迈进。光网络可以简单分为两类。

第一类是光电混合网络,其包含同步光网络(synchronous optical network, SONET)和同步数字体系(synchronous digital hierarchy, SDH)网络。此种网络在网络节点之间使用光纤传输,实现了节点之间的全光化。这种网络也称为“半透明”网络,是目前使用最广的通信网络。光电混合网络由于在信号节点内

进行再生中继等需要电域的操作,其传输速度受到“电子瓶颈”的制约。

第二类是全光网络,指信息在整个网络中都以光的形式传输,直接在光域中进行信号的传输、再生、交叉连接、分插复用和路由,中间不再进行光/电和电/光转换,因此其不受检测器、调制器等光电器件响应速度的限制,能极大地提高网络的传输容量和节点的吞吐量。同时,全光网络的兼容性很好,能对不同调制频率和制式的信号兼容。

通信网络的传输介质逐渐由光缆取代电缆,网络逐渐由光电混合网络向全光网络发展。

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。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。光波分复用技术可分为波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)、空分复用(space division multiplexing, SDM)和偏振复用;光信号复用可分为时分复用(time division multiplexing, TDM)和频分复用(frequency division multiplexing, 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相应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,所以至今仍局限于实验室里。真正商用的复用方式只有光波分复用和光时分复用。

1.3.1 波分复用(WDM)技术

光纤具有巨大的带宽,在 1550nm 波长附近 200nm 范围内,对应可用带宽约为 25THz;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,WDM 的信道在氪灯谱线(波长为 1552.52nm)附近处频率间隔为 100GHz 的整数倍,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的通信方式。

图 1.2 给出了波分复用通信的原理图。具有不同波长、各自载有信息信号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,再经过此条光纤长距离传输,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(erbium-doped fiber amplifier, EDFA)对信号进行放大。

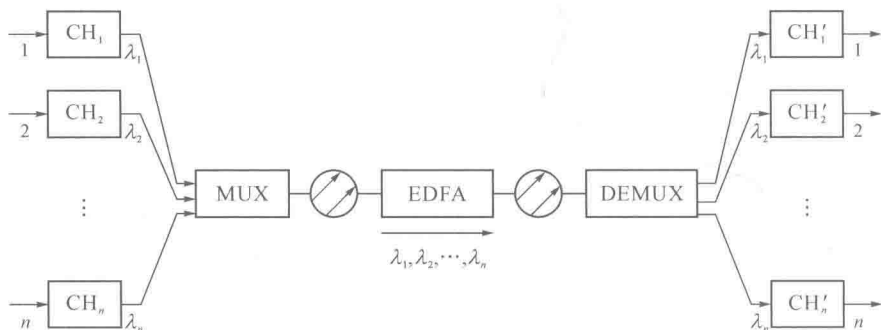


图 1.2 WDM 原理

为了进一步提高通信容量,可以从以下三个方面考虑。

(a)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 20 多年以来,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 倍甚至 100 倍的速度增长。目前单信道的最高速率为 120Gb/s,几乎达到了电子器件速率的极限。

(b)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 时,四波混频(four-wave mixing, 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。

(c)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广泛的关注,并取得了很大的进展。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并实现多窗口超宽带光纤通信奠定了基础。

WDM 通信的关键技术包括波长可调谐及多波长光源技术、掺铒光纤放大器技术、光纤传输技术等。

1.3.2 光时分复用(OTDM)通信

光时分复用(optical time division multiplexing, OTDM)是一种利用时隙

传送信息的技术,其传输原理如图 1.3 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 条不同的路径,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。这一过程被称为复用过程,事实上就是一个并行转换成串行的过程。在传输过程中,由于各种损耗需要用掺铒光纤放大器(EDFA)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,电时分复用技术(electric time division multiplexing, ETDM)已经非常成熟了,也为人们所熟知。OTDM 的结构与 ETDM 类似,不同的是,ETDM 的复用和解复用是在电域内进行的,而 OTDM 的复用和解复用都是在光域内完成的,因此,OTDM 克服了 ETDM 存在的“电子瓶颈”问题。与 WDM 系统不同的是,在 OTDM 中,采用单一光波长传输。

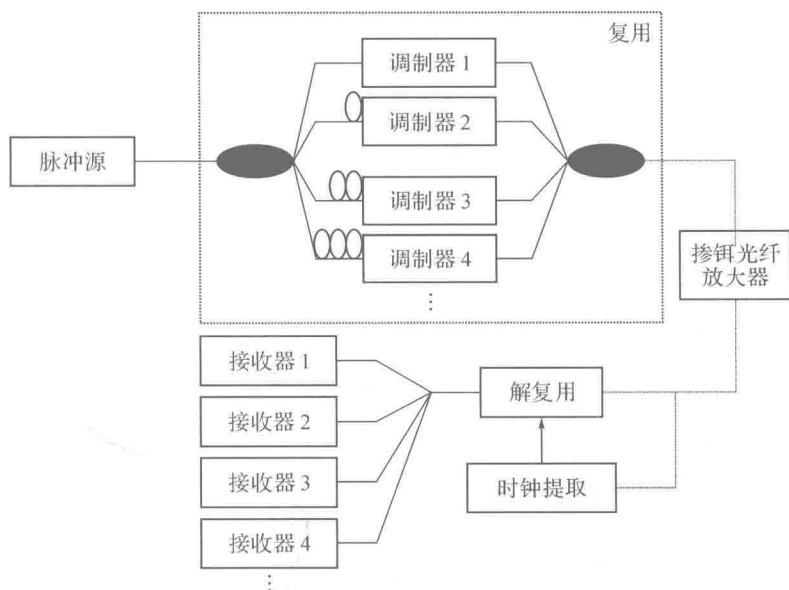


图 1.3 OTDM 原理

OTDM 技术并不仅仅用于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,这是全光网的另一个技术优势。

OTDM 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 100Gb/s 的网络传输速率,并且网络容量以至少每 10 年增长 10 倍的速度继续增长。因此 OTDM 全光网为带宽容量的进一步升级提供了又一种技术选择,可望在网络多媒体、虚拟现实技术以及超级计算机互联等领域获得广泛应用,具有巨大的应用前景。

从目前的研究情况看,OTDM 存在以下三个研究发展方向。

(a)研究更高速率的系统。日本电报电话公司(NTT)一直在做这方面的工作,其 OTDM 实验系统的最高速率从 100Gb/s、200Gb/s、400Gb/s 一直提升到 640Gb/s。

(b)OTDM 实用化技术和比特间插的 OTDM 网络技术。欧洲一直在从事 40Gb/s 的 OTDM 系统和网络方面的研究工作,其中一些关键器件已接近使用,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 40Gb/s 的 OTDM 信号的传输方面也进行了许多现场实验,取得了很大进展。

(c)OTDM 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、光时分解复用技术、全光中继再生技术等。

1.3.3 WDM 和 OTDM 各自的优势

WDM 技术与 OTDM 技术相比,具有以下优点。

(a)由于 WDM 系统的单路信号传输速率较低,所以其色散受限距离比相同传输容量的 OTDM 系统长。

(b)WDM 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;用 OTDM 扩充系统传输容量,由于要在光域对信号进行处理、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,所以实现起来比较困难。

(c)用 WDM 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 OTDM 系统终端用大型设备交换数据具有更高的性价比。

OTDM 技术与 WDM 技术相比,也有一定的独特之处。

(a)WDM 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(FWM)、自相位调制(self-phase modulation, SPM)、交叉相位调制(cross-phase modulation, XPM)等非线性效应对系统的影响加大,限制了 WDM 的有效扩展,并成为设计系统时必须考虑的问题;而在运用 OTDM 技术时,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。

(b)WDM 系统需要特殊设计的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其他信号,即光放大器也必须是增益限制的;而在 OTDM 系统中,则不需要考虑多个波长对放大器的影响。

(c)WDM 系统所需设备较 OTDM 系统多,相对重复投资大。

综上所述,WDM 技术与 OTDM 技术各有优势,但 WDM 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。OTDM 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 WDM 为主,同时发展 OTDM。WDM 可以缓解 OTDM 未成熟时网络对大容量的需求,且反过来促进 OTDM 技术的发展;OTDM 技术成熟后使扩容更方便,而且为 WDM 提供了更高的基础。未来将两者结合应用于光纤通信系统,将更充分地发挥光纤通信系统的潜力及其优良的性能,从而实现超大容量、超长距离的信号传输。

1.4 光孤子

光孤子是一种特殊的 ps 数量级的超短光脉冲,具有高容量、长距离、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。到 1983 年,贝尔实验室的 Mollenauer 研究小组研制了第一支色心锁模孤子激光器 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速率为 5Gb/s、传输距离为 15000km 的单信道孤子通信系统和速率为 10Gb/s、传输距离为 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速率为 20Tb/s、传输距离为 1000km 的光孤子通信,日本电报电话公司推出了速率为 10Gb/s、传输距离为 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。

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,它可以和多种技术结合,比如 ATM(asynchronous transfer mode)、SDH(synchronous digital hierarchy)和以太网等,并分别产生 APON(ATM passive optical network)、GPON(gigabit passive optical network)和 EPON(Ethernet passive optical network)。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,由 IEEE 802.3 EFM(Ethernet for the first mile)提出。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 MAC(media access control)提供多种综合业务的宽带接入技术。EPON 继承了以太网的优势,成本相对较低,但对 TDM(time division multiplexing)类业务的支持难度相对较大。现今 95%左右的局域网都使用以太网,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,和光传输技术相结合后的 EPON 不再只限于局域网,还可以扩展到城域网,甚至广域网。光纤到户也采用 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,我国光纤通信产业形成了自己的发展模式和特点。随着行业规模和产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发展缓慢的影响,光纤通信行业的行业周期性低迷,而亚太地区(包括我国在内)由于市场需求稳定增长,光通信的发展并未停止不前。

从制式上讲,1995 年以前以 PDH 为主,目前 SDH 占绝对优势。从光波模式上讲,多模传送推出不久就被单模传送替代了。从通道上讲,从起初的单通道系统为主发展为现在的多通道即 DWDM 系统为主。从速率上讲,经历了从 34Mb/s、140Mb/s、565Mb/s 到 622Mb/s、2.5Gb/s 的升级过程,目前长途网逐步演变为以 10Gb/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,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”了,而是一张覆盖全国的比较完善的网状网了。此外,像同步网和管理网这类支撑网络也已经相对到位。

目前国内主流的传输技术是 WDM 系统,我国 WDM 网上单波主流速率为 10Gb/s,可以通过波分复用技术实现 $160 \times 10\text{Gb/s}$ 的传输能力;40Gb/s 系统已经在国外完全实现商用,成本低于 4 个 10Gb/s 波分系统。国内也实现这项技