

基于数字信号处理的 相干光通信技术

余建军 迟楠 陈林 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

基于数字信号处理的 相干光通信技术

余建军 迟 楠 陈 林 编著



人民邮电出版社
北 京

图书在版编目(CIP)数据

基于数字信号处理的相干光通信技术 / 余建军, 迟楠, 陈林编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2013.10
ISBN 978-7-115-32839-7

I. ①基… II. ①余… ②迟… ③陈… III. ①相干光通信 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第182959号

内 容 提 要

本书将数字相干光通信作为一个导引, 按照通信从发射到接收的传输模型, 详细地介绍了数字相干光通信中的各种先进技术。全书共分为8章, 第1章简要地介绍数字相干光通信的发展历程及存在的技术难点; 第2章和第3章重点介绍了单载波多维多阶调制格式以及它们在接收端的数字相干算法; 第4章则讲述了奈奎斯特波分复用, 这是当今国际光纤通信的研究热点; 第5章至第7章介绍了正交频分复用技术的发射和检测, 分析了正交频分复用技术的发展因素和发展方向; 最后一章对多维复用光信号传输进行了全面的介绍, 并介绍了随着器件水平的不断提高、技术不断发展以及容量需求不断增大的不同时期下提高光纤传输容量的方法和途径。

本书涉及面广, 内容翔实, 对国内现今涉猎光纤通信的大学师生、科研机构的相关研究人员, 均具有很好的参考价值。

◆ 编 著 余建军 迟楠 陈林

责任编辑 李 静

责任印制 杨林杰

◆ 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 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京艺辉印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 15

2013年10月第1版

字数: 356千字

2013年10月北京第1次印刷

定价: 56.00元

读者服务热线: (010)67119329 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前 言

近几年来,信号对传输带宽的需求按照 40%~50%/年增长,计算和存储能力每年以 60%的速度增长,互联网带宽也以 60%的速率增长。按照摩尔定律,单信道 400Gbit/s 的需求将在 2015 年就会出现。尽管光纤放大器的发明促进了波分复用(Wave length Division Multiplexing WDM)技术在光传输系统中的使用,使得传输容量能够成百上千倍地增加,单通道传输速率也成倍提升,然而单通道传输速率迈过 10Gbit/s 之后,单纯的 NRZ 码型以及直接检测技术难以满足长距离传输的需求,因此在 100Gbit/s 及超 100Gbit/s 系统中,需要采用新的调制解调技术和探测技术。基于数字信号处理相干探测技术能够实现这一要求。相干光通信的理论和实验始于 20 世纪 80 年代。相干光通信系统被公认为具有灵敏度高的优势,能够延长光信号的传输距离,各国在相干光传输技术上做了大量研究工作。然而到 20 世纪 80 年代末,EDFA(Erbium-doped Optical Fiber Amplifier,掺铒光纤放大器)和 WDM 技术的发展,使得相干光通信技术的发展缓慢下来。在这段时期,灵敏度和每个通道的信息容量已经不再备受关注。然而,直接检测的 WDM 系统经过 20 年的发展和广泛应用后,其频谱效率已经不能满足人们的要求,能够实现更高频谱效率的相干光传输技术再次受到重视。相对于以前的相干探测,现在的相干探测技术是采用数字信号处理技术的探测系统。光信号经过平衡探测后用高速数模变换器进行模数变换。变换后的数字信号采用高速芯片进行数字信号处理,用来补偿光电器件中的各种线性和非线性效应以及激光器的频偏和相偏。

很明显,现代的相干光通信是基于数字信号处理技术实现的,与 30 年前的相干探测是两个不同的概念。30 年前的相干探测因为没有高速 ADC(Analog Digital Converter,模数变换器),不能进行模数变换,因而需要采用光学技术进行频率和相位跟踪与锁定。但是光的频率很高,要实现这种锁定技术相当困难。现在的相干光探测则是基于数字信号处理来实现的,经过先进的数字信号处理后可以实现大的色散补偿、大偏振模色散补偿以及频偏和相偏补偿等方面的跟踪和补偿。

光通信技术从直接探测转变到相干探测是一次革命性的变革。因此有必要出版一本全面介绍相干光通信方面的专业书籍来满足人们知识更新的需要。但是,目前市场上还没有这一类中文书籍出版。本书正是基于市场的需求而组织出版的。本书主要系统深入地介绍相干光探测的数字信号处理技术,包括先进的调制码技术,时分复用、波分复用、频分复用、正交频分复用多维复用方式以及单载波多阶调制格式、光正交频分复用调制方式和奈奎斯特滤波技术;详细介绍相干光的数字信号处理技术包括单载波相干接收机、光信号经过模数变换后的正交化与归一化、时钟恢复、色散补偿与静态均衡、偏振动态信道均衡算法、载波频差估计与相位恢复、16QAM 及以上更高的调制码信号载波相位恢复分割算法、Nyquist WDM 的载波频差相位估计算法等;正交频分复用相干接收技术和直接探测算法等。

作者余建军教授长期从事高速光纤通信国际前沿的研究和教学工作，是美国光学学会会士（OSA Fellow）和“长江特聘教授”以及“国家千人计划”入选者；已在光通信领域的国际期刊和国际学术会议上发表论文 300 多篇，第一作者身份 100 余篇；其中被 SCI 收录的论文共 150 余篇，SCI 他人引用数达 1000 余次；受国际学术会议邀请作特邀报告 20 余次；申请国际专利 40 余项（其中 18 项专利已被批准），申请国家发明专利 21 项（其中 5 项已经批准）。

作者迟楠为复旦大学教授，是美国光学学会战略计划委员会委员和中国光学学会纤维与集成光学专委会委员，先后获得教育部新世纪优秀人才，上海市曙光学者，日本大川情报基金，上海市浦江人才，上海市十大 IT 新锐。他已发表论文 269 篇，其中 SCI 论文 81 篇，他人引用 314 次。近 5 年发表论文 164 篇，其中 SCI 检索 42 篇。

作者陈林为湖南大学教授，长期从事光纤通信技术方面的研究，主持或参加国家“863”计划和国家自然科学基金课题 7 项，在 IEEE Photonics Technology Letters, IEEE Journal of Lightwave Technology, Optics Express 等国内外著名刊物发表论文 40 余篇，其中被 SCI 和 EI 收录 20 余篇。

此书撰写得到了作者所指导的博士和硕士生的大力帮助，作者感谢李荣玲对本书第 1 章撰写的支持与帮助，感谢汤婵娟对本书第 2 章、第 4 章、第 5 章以及第 8 章撰写的支持与帮助，感谢王燕谨和张自然对本书第 3 章撰写的支持与帮助，感谢肖江南和唐进对本书第 6 章撰写的支持与帮助，感谢李凡和曹子峥对本书第 7 章撰写的支持与帮助。

余建军

2013 年 5 月 14 日

目 录

第1章 导 论	1
1.1 光通信的发展与现状	2
1.2 光通信系统中的信号劣化	6
1.3 光通信系统	10
1.3.1 直接检测光通信系统	10
1.3.2 相干光通信系统	11
1.3.3 直接检测与相干检测	12
1.4 光通信系统发展趋势	13
参考文献	14
第2章 单载波先进调制格式	19
2.1 调制格式概述	19
2.2 光调制器	22
2.2.1 相位调制器	22
2.2.2 马赫-曾德调制器 (MZM)	23
2.2.3 IQ 调制器	25
2.2.4 电吸收光调制器 (EAM)	25
2.3 单载波高阶调制	26
2.3.1 QPSK 实现方式	28
2.3.2 8PSK 实现方式	28
2.3.3 8QAM 实现方式	30
2.3.4 16QAM 实现方式	31
2.3.5 高阶 QAM 调制	32
2.3.6 多维多阶调制格式比较研究	35
2.4 软件定义光收发机	36
2.4.1 软件定义的多格式收发机 (SPOT)	36
2.4.2 软件定义的偏振转换收发机	37
2.4.3 自适应复用 PON 的软件定义收发器	39

2.5 小结	41
参考文献	41
第3章 单载波相干探测及其关键技术	43
3.1 相干光通信	43
3.1.1 单载波相干探测基本原理	44
3.1.2 使用相位和偏振分集接收的相干检测系统	46
3.2 正交化与归一化	50
3.2.1 正交不平衡效应的影响	51
3.2.2 Gram-Schmidt 正交化过程 (GSOP) [4]	52
3.2.3 Löwdin 正交化过程[5]	53
3.3 时钟恢复	54
3.3.1 数字滤波平方定时估计算法[7]	56
3.3.2 Gardner 算法[8]	57
3.3.3 Godard 算法[9]	58
3.3.4 Muller 算法[10]	59
3.3.5 反馈式全数字时钟同步方案[11]	60
3.4 色散补偿与静态均衡	64
3.5 偏振动态信道均衡算法	69
3.6 QPSK 频偏估计与载波相位恢复	76
3.7 16QAM 载波恢复算法	78
3.8 小结	83
参考文献	84
第4章 多载波 Nyquist 调制格式	86
4.1 Nyquist 信号的产生	87
4.1.1 光 Nyquist 信号产生方法	87
4.1.2 电 Nyquist 脉冲信号产生方法	88
4.2 Nyquist 信号的处理	91
4.2.1 基于 Duobinary 频谱压缩的 PM-QPSK 产生方案	91
4.2.2 基于 Viterbi 算法的 MLSD 方法	92
4.3 基于多模的 9-QAM 信号恢复算法	94
4.3.1 Nyquist 强滤波	94
4.3.2 多模 9-QAM 数据恢复原理与算法	95

4.4 小结	99
参考文献	100
第5章 光正交频分复用调制格式	101
5.1 OFDM 原理	101
5.2 相干光 OFDM	103
5.2.1 相干光 OFDM 系统设计要点	104
5.2.2 相干光 OFDM 的缺点和潜在改进	106
5.3 全光 OFDM	107
5.3.1 基于光相移器的全光 OFDM	107
5.3.2 全光正交多载波	109
5.4 小结	125
参考文献	126
第6章 直接探测 OFDM 中的 数字信号处理技术	128
6.1 直接探测光 OFDM	128
6.1.1 强度调制	128
6.1.2 上变频调制及解调	131
6.2 直接检测 OFDM 算法	132
6.2.1 同步算法	132
6.2.2 信道估计	136
6.3 降低 OFDM 的 PAPR	138
6.3.1 PAPR 的定义	139
6.3.2 降低 PAPR 的常用方法	139
6.3.3 降 PAPR 方法性能的改善	149
6.4 小中心载波和子载波干扰的原理和算法	150
6.4.1 SSMI 和 FF 产生的原理	150
6.4.2 抗 SSMI 和 FF 技术	155
6.5 直接检测光 OFDM 传输系统的研究进展	163
参考文献	165
第7章 OFDM 相干探测及其关键技术	169
7.1 正交频分复用基本原理	169
7.2 相干光正交频分复用原理及其关键技术	171
7.2.1 相干光正交频分复用的实现	171

7.2.2 符号同步	173
7.2.3 频偏估计	175
7.2.4 信道估计	177
7.2.5 相位估计	180
7.2.6 偏振复用的实现	183
7.3 基于偏振复用的相干光正交频分复用系统的实验实现	185
7.4 相干检测的光正交频分复用的研究现状和展望	187
7.4.1 超长距离的传输	187
7.4.2 超大容量的相干检测光正交频分复用传输	188
7.4.3 高性能相干检测的接入网	188
7.4.4 实时相干检测 OFDM 系统的推进	189
7.5 小结	189
参考文献	189
第 8 章 多维复用光信号传输	192
8.1 光时分复用多信道光传输	192
8.1.1 OTDM 原理和关键技术	192
8.1.2 高速 OTDM 传输	197
8.2 波分复用多信道光传输	197
8.2.1 WDM 系统结构	198
8.2.2 WDM 关键技术	198
8.2.3 WDM 工作特性	202
8.2.4 WDM 传输系统实验	204
8.3 空分复用多信道光传输	205
8.3.1 基于多模光纤的空分复用多信道光传输	206
8.3.2 基于多芯光纤的空分复用多信道光传输	215
8.4 光码分复用多信道光传输	222
8.4.1 OCDM 原理及系统构成	222
8.4.2 OCDM 关键技术	224
8.4.3 OCDM 应用	226
8.5 OAM 复用	226
8.6 小结	229
参考文献	229

第1章 导论

现代社会正处于信息时代，随时随地需要进行信息的传递，而我们正是利用通信系统来传递信息，将信息从此处传到彼处。在通信系统中，信息一般不会直接传递，而是调制到载波之后再发射出去，载波频率可以从几 MHz 到几百 THz，如图 1.1 所示。光通信系统是指利用电磁波频谱中的红外、可见光或者紫外区域的高频电磁波进行通信的系统。随着低损耗光纤的出现，光通信系统在 20 世纪 70 年代开始广泛应用，并迅速改变了全球的通信网络结构。

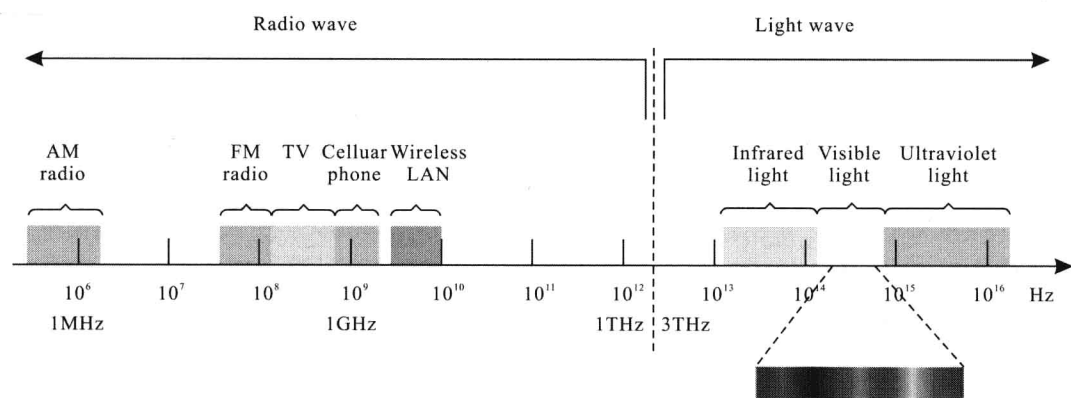


图 1.1 频谱资源示意图

传统的光通信系统一般采用强度调制/直接检测 (IM/DD) 技术，即在发射端利用传输信号对光载波幅度进行调制，在接收端进行包络检测以恢复出发送信号。尽管这种方式具有结构简单、成本低等优点，但是由于只能采用 ASK 调制格式，限制了系统传输速率，因此在对系统容量要求更高的今天，相干光通信系统又开始成为研究的热点。在相干光通信系统中，在发射端通过调制光载波的频率或相位传输信息，在接收端利用零差或外差技术检测传输信号。本书旨在向各位读者介绍数字相干光通信技术，希望各位读者通过本书可以对相干光通信系统的概念、实现技术以及技术难点有一个整体的了解与把握。本书一共分为 8 章，第 1 章为导论，简要讲述相干光通信系统的概念、发展现状、发展趋势等。第 2 章到第 8 章介绍相干光通信系统中采用的具体实现技术：第 2 章到第 7 章主要讲述在发射端的先进调制格式，如单载波多维多阶调制格式、光正交频分复用、奈奎斯特 WDM 技术等，以及接收端的直接探测和数字相干检测等技术；第 8 章从提高光纤传输容量出发，主要讲述了几种多维多阶复用光信道传输方法的原理和关键实现技术等。

1.1 光通信的发展与现状

光通信的发展可谓历史悠久。从广义上来说，凡是利用光作为信息传输的媒介的通信方式，都可以叫作光通信。如此说来，中国是世界上第一个进行光通信的国度，早在远古时代，中国人民已经知道利用烟火传输单个信息。随着社会文明发展，之后还出现了利用信号灯、旗语等方式进行通信。1880 年，贝尔甚至发明了光电话。然而此时，广义上的光通信发展也走到了尽头，模拟电通信技术已经成为通信领域的主流技术。

直到 20 世纪 50 年代，人们开始重新设想利用光作为载波来进行通信，但此时并没有合适的相干光源和传输介质。1960 年激光器的发明解决了光源问题。但是此时光纤的损耗问题仍然存在，最好的光纤损耗也达到了 1000dB/km ，根本不能使用。1966 年，标准电信实验室 (STC labs) 的英籍华裔科学家高锟与何克汉 (G. A. Hockham) 共同提出光纤可以作为通信传输媒介，通过移除玻璃纤维中的杂质，将光纤的损耗降低到了 20dB/km 。这一研究成果具有划时代的意义，带来了一场通信领域的革命。高锟博士也因这一成果而获得 2009 年的诺贝尔物理学奖。1970 年，美国康宁公司 (Corning) 宣布制造出了世界上第一根低损耗光纤，将光纤的损耗降低到了 17dB/km 。之后，通过众多研究者的努力，光纤的传输损耗一降再降，至今光纤的损耗已经达到理论极限，低至 0.15dB/km 。

高锟博士与何克汉 (G. A. Hockham) 最早提出了一个点到点的光通信系统模型，如图 1.2 所示。在发送端，采用激光器或 LED 作为光源，输入信号对激光器或 LED 的光进行强度调制，然后调制后的光信号经过几千米的光纤传输，在接收机端被光电探测器检测，转换为电信号，最后经过信号恢复，输出电信号。高锟博士预测该光通信系统的传输比特率可以达到 1Gbit/s ，相较于 20 世纪 70 年代通信系统的最大通信容量 100Mbit/s ，该光通信系统显示出了良好的扩容能力。

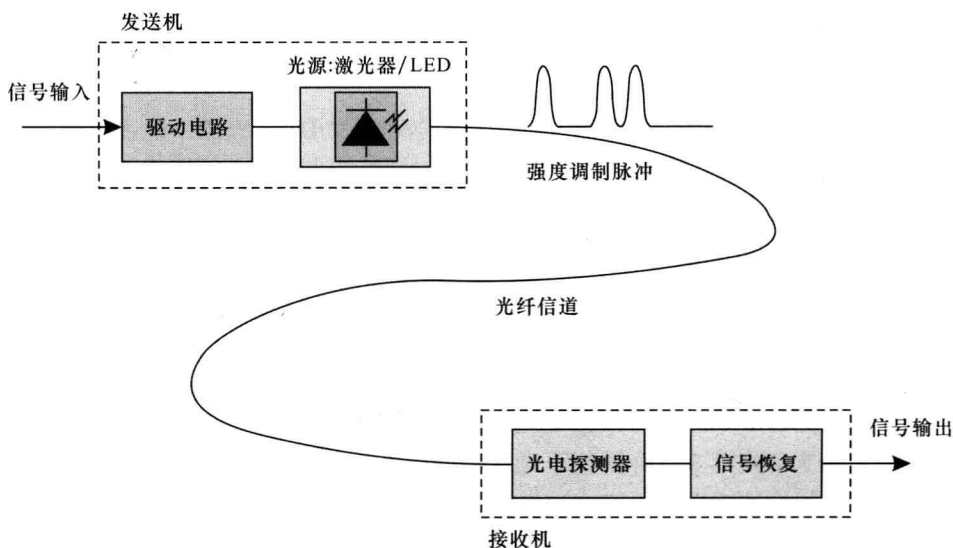


图 1.2 高锟与何克汉提出的光通信系统模型

研究者们看到了光通信系统可观的发展前景，纷纷致力于光通信技术研究，新技术、新器件接连出现，使得光通信系统的通信容量在不到半个世纪的时间里增加了好几个数量级，并且还在不断增加中。现今的光通信系统的结构已经非常复杂，图 1.3 给出了一个覆盖范围很广的光网络的示意图，覆盖范围达到 1000 多千米，传输容量的比特率达到 Tbit/s 级。并且在光网络中采用了光放大器进行光能量的放大、配置了可以上下话路的光分插复用器（ROADM）和光交叉连接器。

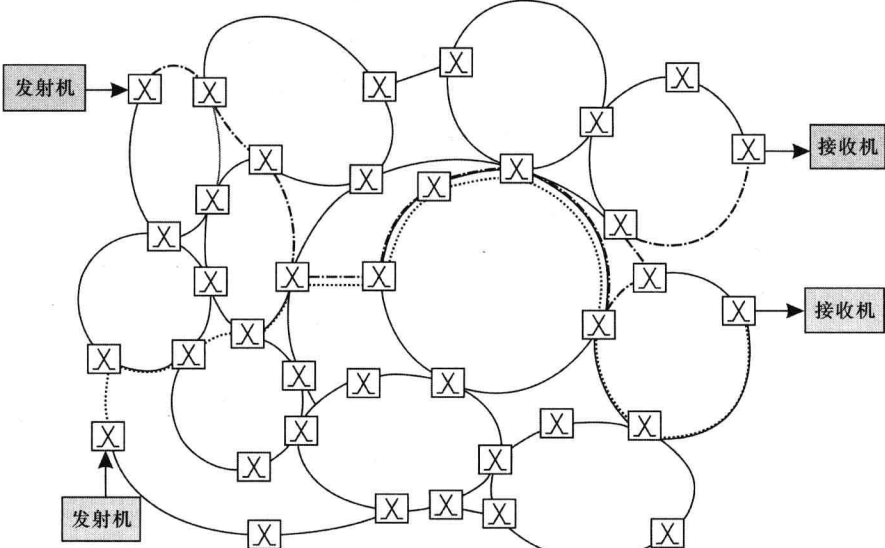


图 1.3 现代光纤通信系统

光通信系统从最初提出的模型发展到现在复杂的实用系统，经历了好几次技术革新。每一次技术革新都促使系统容量得到提高，图 1.4 给出了从 1980 年到 2010 年间，光通信实验与商用系统传输容量的变化，可以看出光通信系统在不到半个世纪的时间里传输容量的巨大增长。

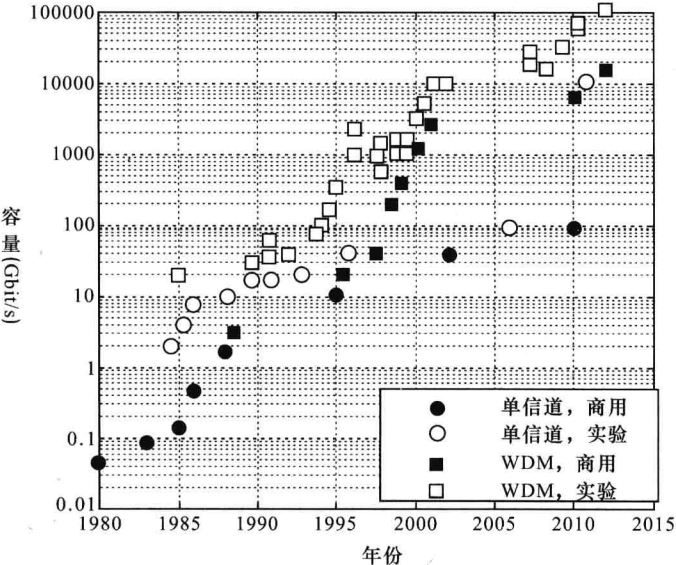


图 1.4 1980~2012 年光通信系统容量的变化

第一代实用的光通信系统于 1978 年投入商业应用。该系统工作于 $0.8\mu\text{m}$ ，采用多模光纤，比特率为 $20\sim 100\text{Mbit/s}$ 。随着单模光纤的出现，以及激光器和光电探测器的发展，第二代光通信系统于 1987 年开始商业运营。该系统工作于 $1.3\mu\text{m}$ ，采用单模光纤，比特率高达 1.7Gbit/s 。紧接而来的第三代光通信系统工作于 $1.55\mu\text{m}$ 。因为光纤的最低损耗在 $1.55\mu\text{m}$ 附近，该系统的比特率可以达到 10Gbit/s 以上。以上三代光通信系统都是采用强度调制/直接探测 (IM/DD)，其系统容量在 20 世纪 80 年代后期遇到了瓶颈，研究者们开始探索新方向以进一步提高系统性能，这一时期诞生了许多对光通信发展产生重大影响的研究成果。研究者的思路主要分为两种。一种是开发新器件以增加传输距离，光放大器就是在这一时期诞生的，尤其是掺铒光纤放大器 (EDFA) 是光通信史上最重要的发明之一，现在仍然是光通信系统中最广泛应用的放大器；另一种思路是改变系统结构，探索新技术，波分复用 (WDM) 技术、相干光通信技术应运而生。第四代光通信系统以采用光放大器和波分复用技术为特征，此时虽然相干光通信系统已经出现，但是由于其系统的复杂性以及器件水平等原因，直接探测光通信系统仍然是 20 世纪 90 年代的主流趋势。相干光通信技术经过一段时间的沉寂之后，由于器件水平的发展、系统扩容的需要等，进入 21 世纪之后又成为了研究的热点，进一步提高了系统的传输速率。

图 1.5 为 20 世纪 90 年代至今光通信系统的发展历程。20 世纪 80 年代后期，WDM 技术问世，但是 WDM 复用器的插入损耗问题，限制了波分复用系统的传输速率。90 年代初，EDFA 的迅速商用化，解决了插入损耗问题。EDFA 能提供很大的功率增益，并且其放大带宽高，可以同时放大多路信号，非常适用于波分复用系统。由此，WDM 技术的发展走上了快车道，光通信系统的速率也迅速成倍增长。

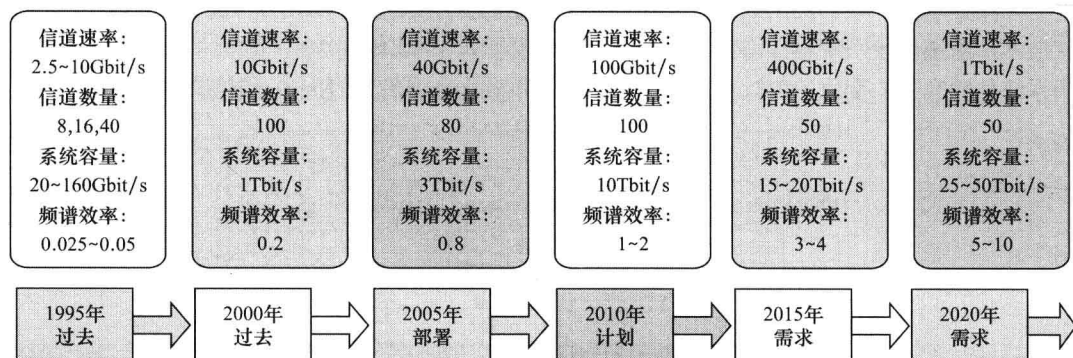


图 1.5 1995 年以来光通信系统发展趋势

90 年代，光通信系统单信道速率从 2.5Gbit/s 提高到 10Gbit/s ，主要是通过提高激光器输出波长的稳定性和光滤波技术（如平顶滤波器）实现的。这一时期还是直接探测光通信系统的天下，采用简单的 OOK 强度调制格式与直接探测技术，通过 WDM 技术，在一根光纤上传输多路数据，直接探测系统的通信总速率达到了 160Gbit/s 。2000 年，通过提高波分复用度，将单根光纤上的传输信道提高至 100 个，实现了 1Tbit/s 的通信总速率。之后，通过采用频谱效率更高的调制格式（如双二进制、DPSK、DQPSK、PDM-QPSK 等，可以直接检测或相干检测），单信道通信速率从 10Gbit/s 进一步提高到 40Gbit/s 。为

了再度提高系统容量，采用更高阶的调制格式（如 PM-QPSK、PM-8QAM、PM-32QAM 等），相干检测是大势所趋。目前，商用的 WDM 系统已经实现单信道 100Gbit/s 的传输速率，系统总速率达 10Tbit/s。

相干光通信技术是通过采用相位调制（PSK）、QAM、极化复用调制，正交频分复用（OFDM）等高阶调制格式，提高频谱效率，从而提高系统的单信道传输速率和通信容量。

通过采用新的技术，光通信系统的频谱效率不断上升，从 20 世纪 90 年代至今，几乎每 10 年频谱效率就增加至原来的 10 倍，近 20 年来的频谱效率如图 1.6 所示。按照这个趋势，2020 年的频谱效率将有可能达到 100bit/s/Hz，目前看来，如何达到如此之高的频谱效率还很难想象。

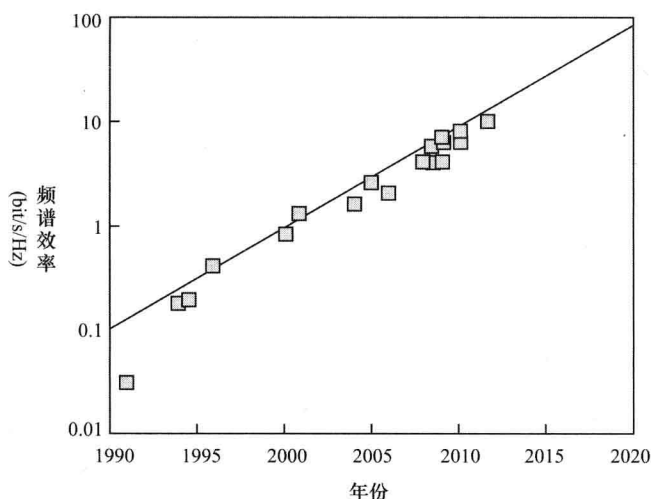


图 1.6 1990 年~2012 年频谱效率的变化

近年来，研究者们对高速相干光通信系统的研究如雨后春笋，涌现了一系列突破性的进展。2007 年 Coreoptics 公司最先实现了 100Gbit/s 极化复用的 QPSK 信号传输距离超过 1600km。2008 年，美国 NEC 实验室和 AT&T 实验室采用 PDM-RZ-8PSK 调制与相干检测相结合的方式，实现了经由 662km 超低损光纤的 161×114Gbit/s DWDM 的传输，创下了在 C 波段光带宽（4.025THz）中容量为 17Tbit/s 的纪录。2010 年，NTT 公司完成了 160Gbit/s PDM-16QAM 的信号在长为 3123.9km 的光纤上的单信道传输，是目前采用 16QAM 调制格式达到的最长传输距离。2012 年，日本 NTT 实验室采用 PDM-64QAM，实现了 102.3Tbit/s C+L band 光信号 240km 的传输，是迄今为止实现的最大传输容量。

目前，相干光通信技术的研究已经成为光通信领域的主流，几乎所有的关于的高速传输的实验中，都是采用相干检测的接收方式。随着手机、个人电脑的普及，各种多媒体业务的出现，通信系统的容量将会受到越来越大的挑战，现在的系统容量将不再满足人们的要求，需要进一步提高传输速率。或许在这一个 10 年之内（2010~2020），光通信系统的单信道传输速率就将会进一步提高到 400Gbit/s，甚至 1Tbit/s。可以预见，相干光通信技术具有美好的发展前景，未来的光通信领域将是相干光通信系统的天下。

1.2 光通信系统中的信号劣化

信号在光通信系统中传输的时候,光电器件中存在的噪声,以及光纤的损耗、色散、非线性等特性,会对信号造成损伤,因此信号不可避免地会发生劣化。对这些造成信号劣化的因素的补偿情况,在很大程度上决定了系统的通信容量。在这一节中,我们将对光通信系统中存在的信号劣化及其解决办法进行简要的讲述。

光通信系统中信号劣化的主要原因在于光电器件的噪声造成的干扰,以及光纤传输中造成的信号衰减与信号失真。光电器件的噪声主要来自于光放大器。信号衰减,也称为光纤损耗,是光纤的重要特性之一,它在很大程度上决定了在没有光放大器和光中继器的情况下,光通信系统可以传输的最大距离。由于在光纤中传输而造成的信号失真,可以分为线性失真和非线性失真。线性失真是指光纤色散造成的光脉冲展宽,非线性失真是指由于光纤的非线性效应造成的信号畸变。光纤的色散和非线性效应,当系统传输距离很长时,将对信号传输产生显著的影响,限制系统的传输容量。

自从高锟博士 1966 年制造出第一根可用于通信的光纤,其后十几年,通过众多科学家的共同努力,将多模光纤的损耗在 $1.3\mu\text{m}$ 附近降低到了 $0.6\sim 0.7\text{dB/km}$,将单模光纤的损耗在 $1.55\mu\text{m}$ 附近降低到了 0.2dB/km 。图 1.7 (a) 给出了 1972 年至 1982 年多模光纤的损耗谱变化,图 1.7 (b) 给出了 1982 年采用不同工艺(MCVD 改进的化学气象沉积法, OVD 棒外气象沉积法, VAD 轴向气象沉积法)制造的单模光纤的损耗谱。虽然当时光纤的损耗已经很低,但是对于长距离传输系统,光纤损耗仍然是限制系统容量增长的关键性因素。

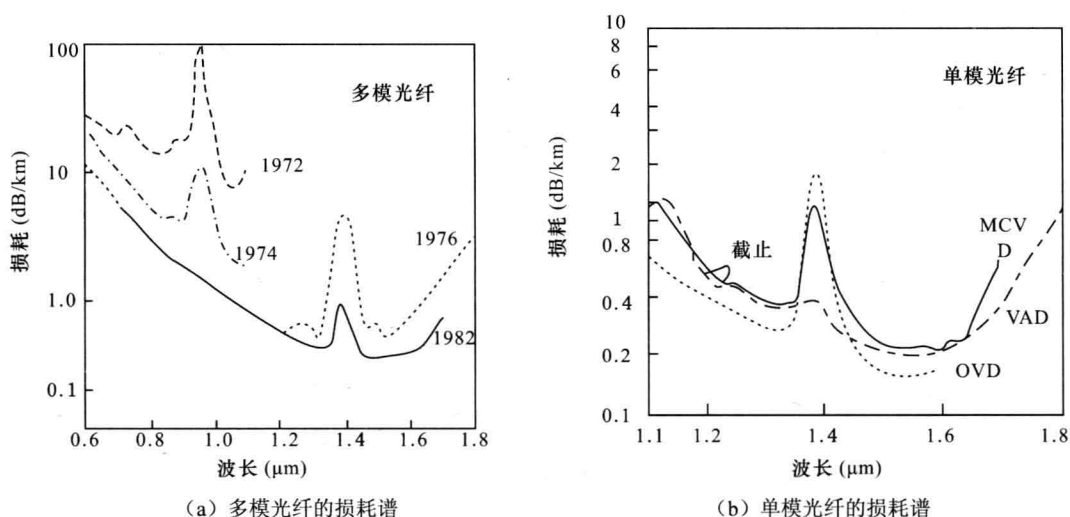


图 1.7 光纤损耗谱

20 世纪 90 年代, 随着光放大器的发明以及迅速商用化, 光纤损耗的问题得到了彻底的解决。通过利用光放大器对光纤损耗进行补偿, 可以实现长距离的传输。掺铒光纤放大器 (EDFA) 是光放大器中最重要的一种, 在光通信系统中已经有广泛的应用, 其结构如图 1.8 所示。EDFA 采用掺铒离子单模光纤作为增益介质, 在泵浦光激发下发生粒子数反转, 通过信号光诱导实现受激辐射放大。EDFA 具有高增益、高功率和宽带宽等优良特性, 非常适用于 WDM 系统, 推动了 WDM 技术的商用化, 给光通信领域带来了一场巨大的变革, 使得通信容量在 10 年间迅速成倍增长。值得一提的是, 当在 WDM 系统中使用光放大器 (EDFA) 时, 由于 WDM 链路在 EDFA 放大带宽内的非一致性增益, 会导致信道质量的差异, 在此情况之下, 均衡技术是很有必要的。

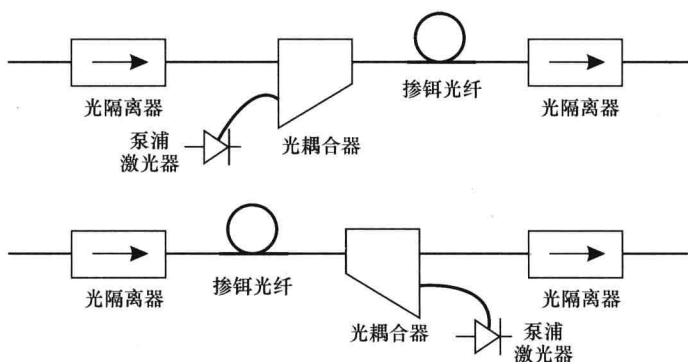


图 1.8 掺铒光纤放大器的基本结构

光放大器的发明解决了光纤损耗的问题, 但光纤的另一个重要参数——光纤色散, 仍然限制着通信容量与通信距离。光纤色散是使光纤中传输的光脉冲随着传输距离的增加而展宽。当传输的距离足够长时, 相邻的光脉冲就可能因展宽而发生重叠, 从而导致接收机的误判决, 因而光纤色散限制了光纤的信息承载容量。

光纤色散主要有色度色散 (包括材料色散和波导色散)、模式色散和偏振色散。色度色散是指光源光谱中不同的频率 (波长) 成分在光纤中传播的群延时之差引起的光脉冲展宽。材料色散是由于材料的折射率随波长非线性变化造成的, 而波导色散则是由于导波模式的传播常数随波长的非线性变化特性。模式色散是指在同一波长下、不同模式的传播常数不同而引起的色散。在单模光纤中, 存在着简并的偏振方向正交的两个偏振模式, 当光纤存在双折射时, 两个简并模式的传播速度不相等, 由此而引起的色散称为偏振色散。严格说来, 偏振色散也属于模式色散的范畴。一般而言, 在多模光纤中, 存在模式色散和色度色散, 以模式色散为主; 在单模光纤中, 存在材料色散和波导色散, 一般以材料色散为主。

大部分的光纤通信系统都采用单模光纤作为传输媒介, 因此这里我们主要介绍单模光纤的色散补偿办法。系统的色散要求一直是促进单模光纤发展的主要推动力, 如图 1.9 所示。为了解决光纤的色散问题, 研究者们对光纤的结构与参数不断进行改进, 制造出了多种新型光纤。

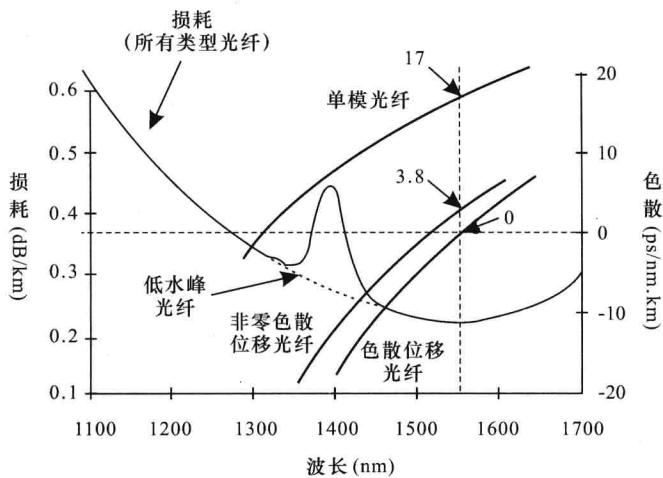


图 1.9 各种单模光纤的色散特性与衰减特性

我们知道，普通单模光纤的零色散点在 $1.3\mu\text{m}$ 附近，但是工作于 $1.3\mu\text{m}$ 的光通信系统受限于 $1.3\mu\text{m}$ 附近的光纤损耗（典型值为 0.5dB/km ）；单模光纤的最低损耗在 $1.55\mu\text{m}$ 附近，但是 $1.55\mu\text{m}$ 处的光纤色散很高（典型值为 $17\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ）。基于对色散形成机制的分析与计算，研究者们改进了普通单模光纤的结构和参数，将零色散波长右移到 $1.55\mu\text{m}$ 附近，实现了同时具有零色散和低衰减的色散位移光纤（DSF）。通过采用 DSF，可以同时增加光通信系统的通信距离与通信速率。

随着 WDM 技术的商用化，色散位移光纤遇到了严重的非线性问题。光纤的非线性效应按照其起因可以分为两类：第一类涵盖了非线性非弹性散射过程，即受激拉曼散射（SRS）与受激布里渊散射（SBS）；第二类起因于光纤中与光强相关的折射率变化，包括自相位调制（SPM）、交叉相位调制（XPM）和四波混频（FWM）。目前对光通信系统影响最大的非线性效应是四波混频，我们将会进行重点介绍。

WDM 系统同时要求高输入功率和低色散，导致了四波混频效应（FWM），产生了新的频谱。产生的新频率会对 WDM 系统的工作产生干扰，导致系统性能下降。四波混频是光纤中的三阶非线性效应，类似于电气系统中的互调失真，即在多信道系统中，三个光频率混合产生了第四个光频率 $f_g = f_i + f_j - f_k$ 。当色散越低时，四波混频效应产生的新频率能量越高，对通信干扰越大。当在 DSF 上应用 WDM 技术时，会产生严重的四波混频效应。对于 N 条信道的系统，四波混频产生的新频率数量为 $M = \frac{1}{2}(N^3 - N^2)$ ，

即对于 2 信道和 3 信道系统，将会分别产生 2 个和 9 个新频率，如图 1.10 所示。图 1.11 给出了每信道输入功率为 3mW 的三信道 WDM 系统，在经过 25km 的 DSF 传输之后，在输出端测得的光功率谱。

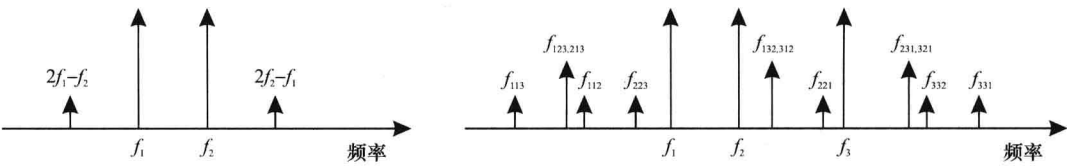


图 1.10 两信道和三信道 WDM 系统的四波混频效应示意图