

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,而是调制到载波上之后再发射出去,载波频率可以从几兆赫兹(MHz)到几百太赫兹(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^[1-5]。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^[1]。

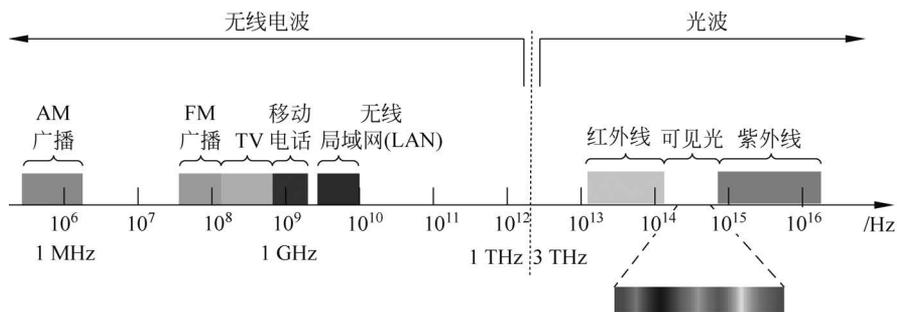


图 1.1 频谱资源示意图

传统的光通信系统一般采用强度调制/直接检测(IM/DD)技术^[1-8],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,但是由于只能采用幅移键控(ASK)调制格式,限制了系统传输速率^[3-4,9]。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^[10-93]。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来传输信息,在接收端利用零差或外差技术来检测传输信号^[18,31,38-39]。本书旨在向各位读者介绍数字相干光通信技术,希望各位读者可以通过本书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。本书共 17 章,第 1 章为导论,简要讲述光通信系统的概念、发展现状和发展趋势等。第 2~5 章主要介绍单载波调制及其在相干光通信系统中的具体实现技术,第 6 章则介绍多载波奈奎斯特(Nyquist)调制格式,第 7~9 章介绍光的正交频分

复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)调制格式及其相关技术,第 10 章介绍无载波幅相调制技术,第 11 章介绍脉冲幅度调制(pulse amplitude modulation, PAM)信号的调制和基于数字信号处理的探测技术,第 12~17 章介绍一些近年来较先进的光通信系统的方法和算法。

本书彩图请扫二维码观看。



1.1 光通信的发展与现状

光通信的发展历史可谓悠久。从广义上来说,凡是利用光作为信息传输媒介的通信方式,都可以称作光通信。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,人们已经知道利用烟火传输单个信息。随着社会文明的发展,之后还出现了信号灯、旗语等通信方式。在西方 1880 年,贝尔甚至发明了光电话。然而此时,广义上的光通信的发展也走到了尽头,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 1000 dB/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博士与何克汉(G. A. Hockham)共同提出光纤可以作为通信传输媒介,并通过移除玻璃纤维中的杂质,将光纤的损耗降至 20 dB/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,而高锟博士因这一成果而获得 2009 年的诺贝尔物理学奖^[1]。1970 年,美国康宁(Corning)公司宣布制造出了世界上第一根低损耗光纤,将光纤的损耗降至 17 dB/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 0.15 dB/km^[8]。

高锟博士与何克汉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,采用激光器或发光二极管(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 1 Gb/s,相较于 20 世纪 70 年代通信系统的最大通信容量 100 Mb/s,该光通信系统显示出了良好的扩容能力^[1-8]。

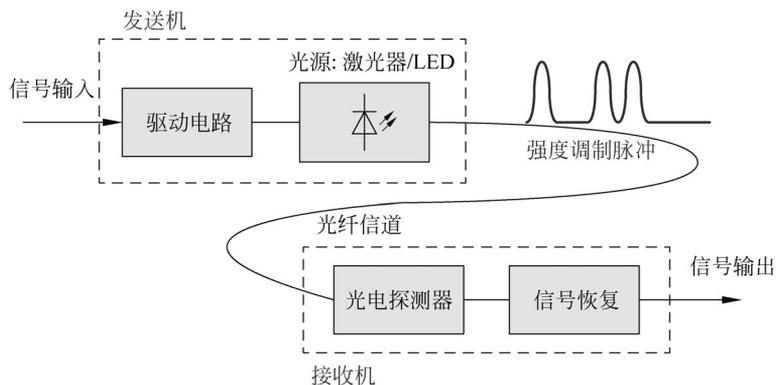


图 1.2 高锟与何克汉提出的光通信系统模型

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的研究,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 Tb/s 量级,并且在光网络中采用了光放大器进行光能量的放大,配置了上下行链路的可重构光分插复用器(reconfigurable optical add-drop multiplexer,ROADM)和光交叉连接器。

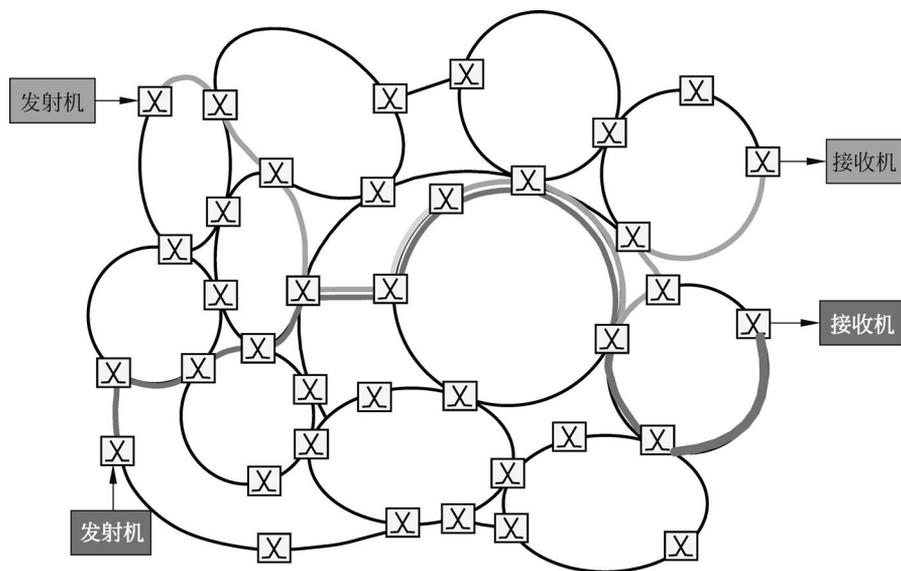


图 1.3 现代光纤通信系统

(请扫 2 页二维码看彩图)

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,经历了数次技术革新,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—2022 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^[4-5]。特别是在 2011 年引进空分复用(SDM)光纤技术后,实验室结果表明传输速率增加更快^[78-107]。

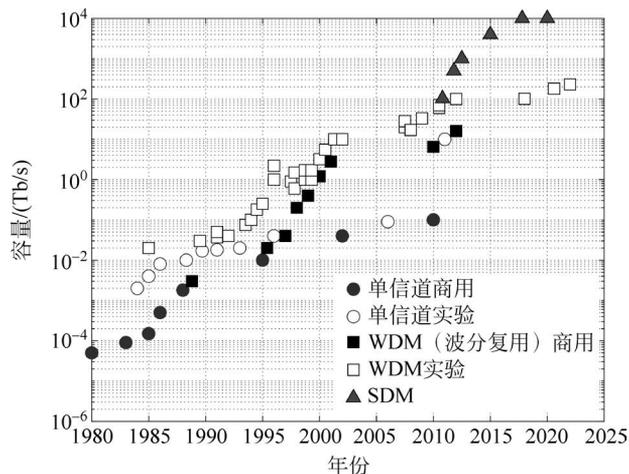


图 1.4 1980—2022 年光通信系统容量的变化

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 $20\sim 100\ \text{Mb/s}$ 。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 $1.7\ \text{Gb/s}$ 。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 $10\ \text{Gb/s}$ 以上。以上三代光通信系统都是采用强度调制/直接探测(intensity modulation with direct detection, 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(erbium-doped fiber amplifier, 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应用最广泛的放大器^[1-8];另一种思路是改变系统结构,探索新技术,波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)技术^[1-8]、相干光通信技术^[17,38-39]应运而生。第四代光通信系统就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,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 世纪之后又成为研究的热点,进一步提高了系统的传输速率。经过 10 余年的发展,商用相干产品最高速率已经达到了 $800\ \text{Gb/s}$ ^[69],超过 $1\ \text{Tb/s}$ 的商用产品很快就会推出。

呈指数递增的带宽需求^[37]推动人们在光子领域探索一系列新的光纤和相关技术来替代标准单模光纤(single mode fiber, SMF)。单模光纤目前是大多数大容量商业光纤系统的基础。空分复用(space-division multiplexing, SDM)^[94-95]支持在光纤通道的多个空间路径上传输信号。采用这类系统的目的不仅是增加光纤的信息承载能力,而且是通过集成、共享器件和联合数字信号处理(digital signal processing, DSP)^[5-10]来降低能耗和提高效率。

虽然利用光纤的空间维度进行多路复用的想法可以追溯到更早^[96-97],但 SDM 研究在过去十年中才变得非常热门,这是因为使用具有相干检测的波分复用的单模光纤系统开始逼近其理论容量极限^[98]。光纤制造和加工技术的改进推动了 SDM 研究的快速发展,导致许多新光纤和耦合技术的出现。除了光纤和放大器之外,SDM 系统还需要空间多路复用器来引导光信号进出空间通道。具有超过 100 个空间通道的 SDM 系统,每个通道承载数百个波分复用通道,已在单根光纤中得到验证,得到的总速率已经超过 $10\ \text{Pb/s}$ ^[99-100]。这些系统集成数千个并行数据信号通道而共享一根光纤。除了一般光源、放大器、泵浦激光器或数字信号处理器等较低级别的组件集成外,期望 SDM 系统固有的硬件集成优势能够使其广泛用于将来的大容量光传输网络中。

图 1.5 总结了在各种短距离和高吞吐量 SDM 传输的实验结果。每个子图都包含相同的实验,针对空间信道数绘制不同的传输速率。我们标记两种类型光纤:标准单模光纤(包层直径为 $125\ \mu\text{m}$)和具有较大包层直径的光纤。图 1.5(a)展示了总数据传输速率,目前的最高传输速率超过了 $10\ \text{Pb/s}$ ^[100-102]。直到最近,所有数据速率超过 $1\ \text{Pb/s}$ 的传输演示都使用了具有更大包层直径的光纤;由于对光纤制造、布线和可靠性的担忧,近期光纤发展的趋势向更小包层直径前进^[103-105]。若与单模光纤阵列或带状光纤竞争,重要的是要证明 SDM 传输具有与单模光纤相似的单空间信道数据传输速率。当使用 C 和 L 波段时,据报道单模光纤的最大数据传输速率约为 $100\ \text{Tb/s}$,而最近添加的 S 波段其传输速率接近

200 Tb/s^[106]。图 1.5(b)显示,采用 SDM 技术单空间信道的数据传输速率约为 100 Tb/s,这表明数据传输速率随空间信道数的线性增加是可行的^[107]。并非所有 SDM 传输实验都使用相同的光带宽,很多时候人们更多的是关注高光谱效率而不是总数据传输速率。为了对这些研究进行比较,同时对光纤直径进行归一化,图 1.5(c)显示了系统空间频谱效率 (spatial-spectral efficiency, SSE)^[107]。图 1.5(c)表明,当光纤支持更多空间信道时, SSE 通常会增加。我们也可以看到,少模光纤 (few-mode fiber, FMF) 和少模多芯光纤 (few-mode multicore fiber, FM-MCF) 通常比弱耦合多芯光纤 (weakly coupled multicore fiber, WC-MCF) 具有更高的 SSE,后者需要小的芯间间隔以减少串扰。

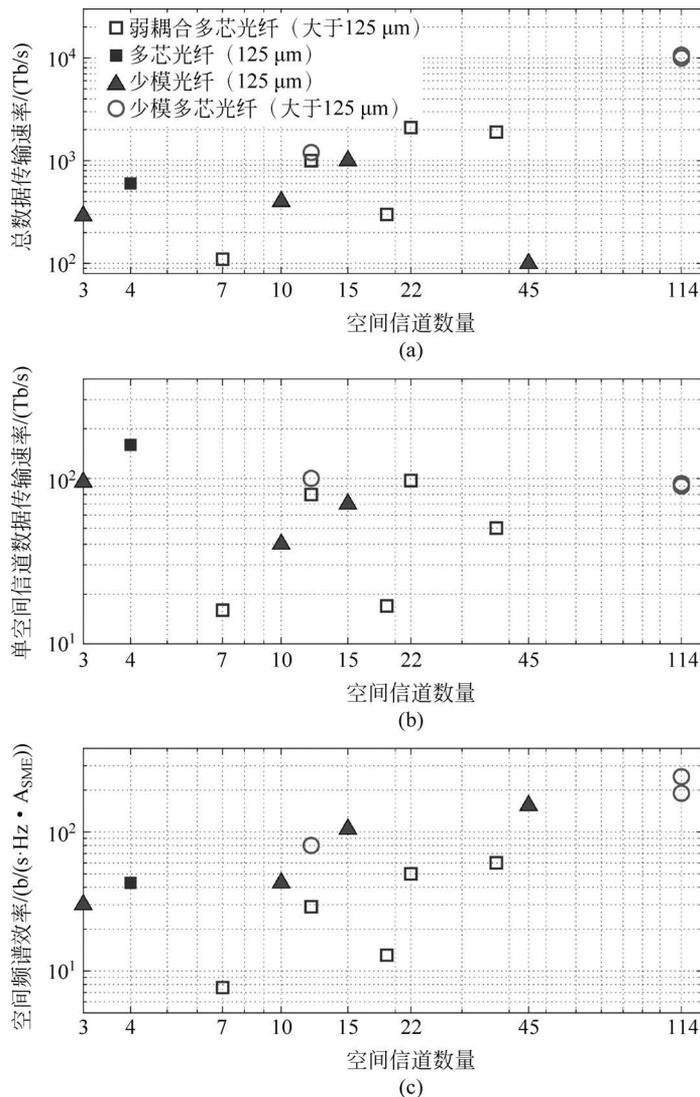


图 1.5 各种短距离和高吞吐量 SDM 传输的实验结果
(a) 总数据传输速率; (b) 单空间信道数据传输速率; (c) 系统空间频谱效率

图 1.6 示出 1995 年以来光通信系统的发展历程。20 世纪 80 年代后期,波分复用技术问世,但是由于波分复用器的插入损耗问题,限制了波分复用系统的传输速率。20 世纪 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,波分复用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^[4]。

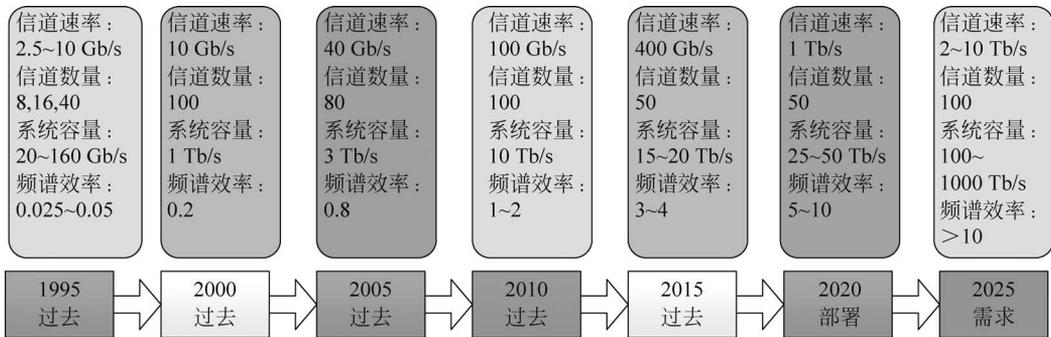


图 1.6 1995 年以来光通信系统的发展历程

20 世纪 90 年代,光通信系统单信道速率从 2.5 Gb/s 提高到 10 Gb/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,采用简单的通断键控(OOK)强度调制格式与直接探测技术,通过波分复用技术,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 160 Gb/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 1 Tb/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(差分相移键控)、DQPSK(差分正交相移键控)、PDM-QPSK(偏振模复用-正交相移键控)等,可以直接检测或相干检测),单信道通信速率从 10 Gb/s 进一步提高到 40 Gb/s。为了再度提高系统容量,采用更高阶的调制格式(如 PM-QPSK(偏振复用正交相移键控)、PM-8QAM、PM-32QAM 等),只能相干检测。目前,商用的波分复用系统已经实现单信道 800 Gb/s 的传输速率,系统总数据传输速率达 100 Tb/s^[2-10]。

相干光通信技术是通过采用相移键控(phase-shift keying, PSK)相位调制、正交调幅(QAM)、极化复用调制、正交频分复用等高阶调制格式,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^[108-111]。

通过采用新的技术,光通信系统的频谱效率得以不断上升,从 20 世纪 90 年代至今,几乎每十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 1.7 所示(单模单芯)。在 2018 年前后已经实现了 20 b/(s·Hz),调制 QAM 已经达到了 4096QAM^[77],但要进一步提升频谱效率,需要更高阶 QAM,这样对激光器要求更高,主要是线宽。由于激光器线宽的限制,最近几年频谱效率没有明显的提高。如果需要更高的频谱效率,可能最好的方法就是空分复用了。采用空分复用,人们已经实现了频谱效率 1099.9 b/(s·Hz)传输 11.3 km 的多维复用光纤^[102]。

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,Core Optics 公司最先实现了 100 Gb/s 极化复用的正交相移键控(QPSK)信号传输距离超过 1600 千米^[18]。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 662 km 超低损光纤的 161×114 Gb/s 密集波分复用(DWDM)的传输,创下了在 C 波段光带宽(4.025 THz)中容量为 17 Tb/s 的纪

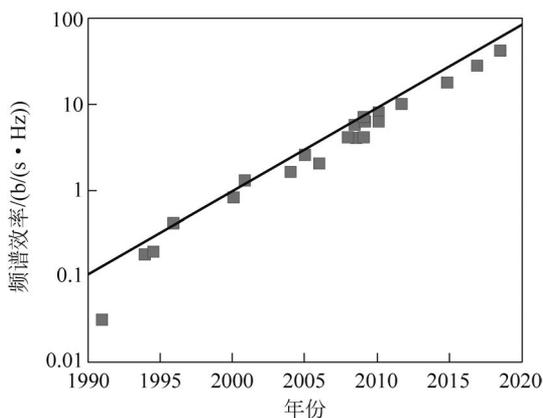


图 1.7 1990—2020 年频谱效率的变化

录^[10]。2009年,美国贝尔实验室首次实现了 112 Gb/s PDM-16QAM 的信号的相关探测^[19]。2012年,日本 NTT 实验室采用 PDM-64QAM,实现了 102.3 Tb/s 的 C+L 波段光信号 240 千米的传输^[24],直到 2021 年,经过采用更多的频谱带宽(S 波段),人们才实现了 200 Tb/s 的 S+C+L 波段传输^[106]。

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、个人计算机的普及,各种多媒体业务的出现,通信系统的容量将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(2021—2030 年),光通信系统的单信道传输速率就将进一步提高到 1 Tb/s,甚至 10 Tb/s^[33,111]。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,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劣化^[8,112-115]。对这些造成信号劣化因素的补偿情况,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所造成的干扰,以及光纤传输所造成的信号衰减与信号失真^[112]。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,光通信系统中信号可以传输的最大距离。由光纤传输而造成的信号失真,可以分为线性失真和非线性失真。线性失真是指由光纤色散造成的光脉冲展宽,非线性失真是指由光纤的非线性效应造成的信号畸变。当系统传输距离很长时,光纤的色散和非线性效应将对信号传输产生显著的影响,限制系统的传输容量。

高锟博士 1966 年制造出第一根可用于通信的光纤^[1],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 μm 附近降至 0.6~0.7 dB/km,将单模光纤的损耗在

1.55 μm 附近降至 0.2 dB/km^[8]。图 1.8(a)给出了 1972—1982 年多模光纤的损耗谱变化,图 1.8(b)给出了 1982 年采用不同工艺[改进的化学气相沉积法(MCVD),棒外气相沉积法(OVD),轴向气相沉积法(VAD)]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。

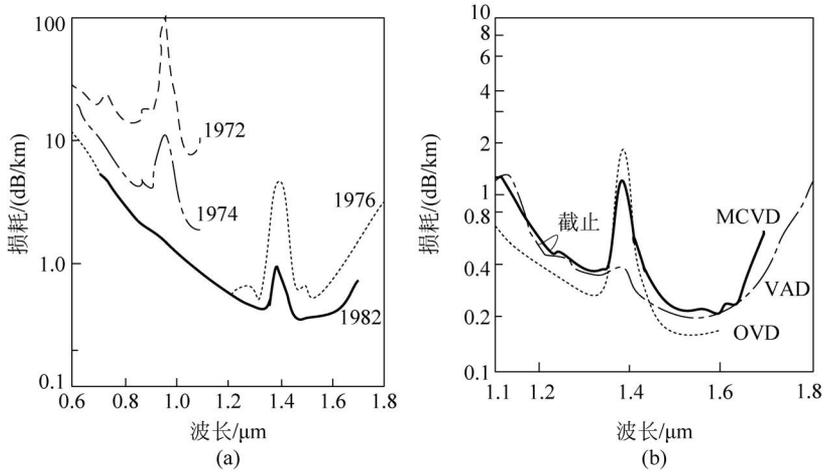


图 1.8 (a)多模光纤和(b)单模光纤的损耗谱

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。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 1.9 所示^[2-8]。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,通过信号光诱导而实现受激辐射放大。EDFA 具有高增益、高功率和宽带宽等优良特性,非常适用于波分复用系统,推动了波分复用技术的商用化,给光通信领域带来了一场巨大的变革,使得通信容量在十年间迅速成倍增长。值得一提的是,当在波分复用系统中使用光放大器(例如 EDFA)时,波分复用链路在 EDFA 放大带宽内的非一致性增益,会导致信道质量的差异,在此种情况之下,均衡技术是很有必要的。

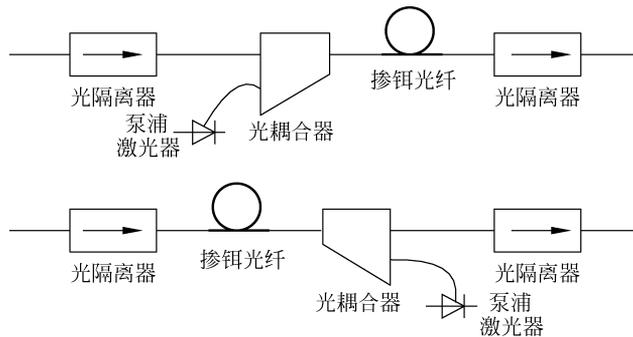


图 1.9 EDFA 的基本结构

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。光纤色散是指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所引起的光脉冲展宽,其中材料色散是由材料的折射率随波长非线性变化造成的,而波导色散则是由导波模式的传播常数随波长的非线性变化特性造成的。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,由此引起的色散称为偏振色散。严格来说,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^[112]。

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。对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 1.10 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。

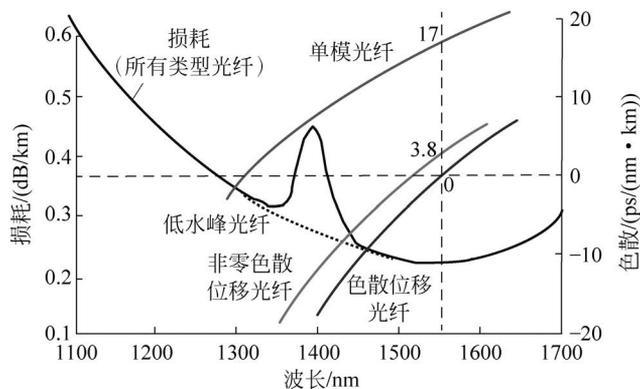


图 1.10 各种单模光纤的色散特性与衰减特性

(请扫 2 页二维码看彩图)

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 0.5 dB/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)。通过采用色散位移光纤,可以同时增加光通信系统的通信距离与通信速率^[112]。

随着波分复用技术的商用化,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。

波分复用系统同时要求高输入功率和低色散,导致了四波混频效应^[112],产生了新的频谱。产生的新频率会对波分复用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, $f_g = f_i + f_j - f_k$ 。色散越低, 四波混频效应产生的新频率能量越高, 对通信干扰越大。当在色散位移光纤上应用波分复用技术时, 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 1.11 所示。图 1.12 给出了每信道输入功率为 3 mW 的 3 信道波分复用系统, 在经过 25 km 的色散位移光纤传输之后, 在输出端测得的光功率谱。

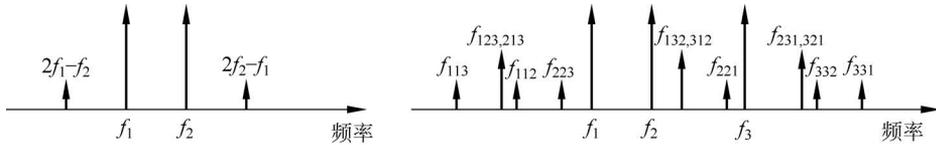


图 1.11 2 信道和 3 信道波分复用系统的四波混频效应示意图

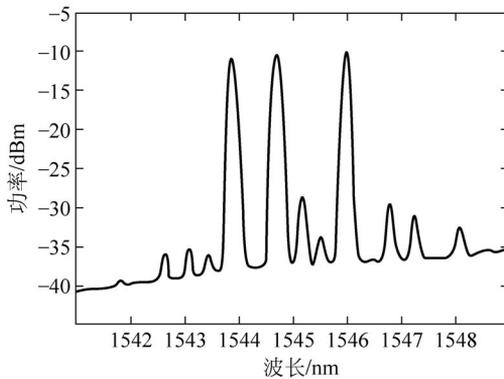


图 1.12 3 mW 每信道、3 信道的波分复用系统经 25 km 色散位移光纤传输之后的输出光功率谱

由于在色散位移光纤上应用波分复用技术时严重的四波混频效应, 色散位移光纤并不适用于波分复用系统, 因此没有得到广泛的使用。为了抑制在 EDFA 带宽内应用波分复用技术时产生的四波混频效应, 一定程度的色散值是必需的, 但同时色散值又必须足够小, 以降低色散损失, 因此研究者们又设计制造了一种新型光纤, 即非零色散位移光纤(NZDSF)。NZDSF 设计时, 将零色散点从 $1.55 \mu\text{m}$ 处移到 EDFA 的放大带宽之外, 如图 1.10 所示, 其在 $1.55 \mu\text{m}$ 处的典型色散值为 $3 \sim 8 \text{ ps}/(\text{ns} \cdot \text{km})$ 。NZDSF 的应用, 同时标准单模光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 处的高色散限制和非线性效应四波混频的限制, 非常适用于波分复用系统^[112]。

由于非线性效应与光纤有效面积成反比, 增大光纤的有效面积可以降低非线性效应。大部分 NZDSF 的有效面积为 $50 \mu\text{m}^2$, 比标准单模光纤小很多。为了提高有效面积, 研究者们设计制造了一种大有效面积的 NZDSF, 称为大有效面积光纤(LEAF), 其有效面积为 $72 \mu\text{m}^2$ 。因此在传输相同的光功率时, 采用 LEAF 降低了光纤中的功率密度和非线性效应, 更加适宜在波分复用系统中使用^[112]。

全世界范围内现在已经铺设了大量色散位移光纤, 用于单波长传输系统, 当升级为波分复用系统时, 四波混频就成为严重问题, 需要进行色散管理。色散管理即是通过合理安排不同色散特性的光纤, 以获得局部较高但对于整体而言却较低的色散, 以抑制四波混频。较低的平均色散使光脉冲展宽小, 较高的局部色散可以破坏形成四波混频互调产物的载波频率