

张宝富 谭笑 蒋慧娟 编著

光纤通信系统

原理与实验教程



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

光纤通信系统原理与实验教程

张宝富 谭笑 蒋慧娟 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从应用的角度, 首先介绍了几种典型的光纤通信系统, 如点到点的数字、模拟和波分复用 WDM 光纤通信系统; 其次围绕一个实际的光纤通信系统, 介绍了系统的组成部件 (如光纤与光缆、光收发模块、光纤连接器等无源光器件), 以及光发送机、光纤线路、光接收机和光纤通信系统的实验项目及方法; 最后简要介绍了一个实际的光纤通信系统实验平台和光纤通信用仪表。

本书配有大量国内外著名光通信公司的实际光纤光缆、光器件、光通信产品和仪表的图片, 给出了常用的各种光器件和光纤类型、实际的光发送和光接收电路以及各种接口电路, 便于读者动手开发光纤通信产品。它所提供的光纤通信系统实验平台为光纤通信实验课程的开设提供了一种全新的实验教学模式。

本书适合用做电子与通信工程、光电子技术、电子信息工程、自动控制和计算机应用等专业光纤通信原理与实验课程的教学用书, 也可供从事光纤通信产品开发的工程技术人员用做快速入门的参考书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

光纤通信系统原理与实验教程 / 张宝富, 谭笑, 蒋慧娟编著. —北京: 电子工业出版社, 2004.1

ISBN 7-5053-9409-6

I. 光… II. ①张… ②谭… ③蒋… III. 光纤通信—教材 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 109390 号

责任编辑: 张来盛 特约编辑: 印晓芬

印 刷: 北京四季青印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 15 字数: 384 千字

印 次: 2004 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 5 000 册 定价: 22.00 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

基于光纤技术的电信网络已成为最主要的信息传输系统，无论是在陆地还是在海底，都已形成了拥有巨大传输容量的光纤链路。随着光纤通信的迅猛发展，社会对于既懂得光纤通信基本理论，又掌握相关实用技术的人才的需求日益增长。因此，各大学的许多专业，如电子与通信工程、光电子技术、电子信息工程和计算机应用等，纷纷开设了有关光纤通信方面的专业课程，以培养这方面的专业人才。目前，可以购得的与光纤通信相关的教材种类繁多，但是从应用的角度来讲述光纤通信的基本原理，并与实际的测量实验相结合的书籍还很少见。为了给广大的在校学生打开一个接触实际光纤通信的窗口，帮助他们将所学基础课与专业基础课知识有效地衔接起来，并掌握一些从事实际工作所需的基本知识，编著者结合自身多年教授光纤通信理论和实验课程的经验，以自行研制的光纤通信实验平台为模板，编写了此书。

全书共分为 10 章。第 1 章简述了点到点的数字、模拟光纤通信系统和波分复用光纤通信系统；第 2 章至第 4 章详细介绍了实际应用中的光纤与光缆、光源与光发送机、光检测器与光接收机及其性能指标；第 5 章至第 8 章阐述了光发送机实验、光纤线路实验、光接收机实验和光纤通信系统实验的实验项目及相应的实验方法，并配有相应的产品介绍供查阅，以便正确选购器件并对光通信产品有一定的了解；第 9 章介绍了一个实际的光纤通信实验平台的设计方案及其具体实现，提供了大量不可多得的实际应用电路；第 10 章给出了几种常用光纤通信仪表的使用方法。

“光纤通信系统”是一门实验性很强的课程，除了课堂理论学习外，还需要实验性环节与之配合，否则学习效果会受到很大的影响。由于种种原因，光纤实验课程的开设很困难，许多学校只停留在理论的课堂教学上。为了克服这些不足，我们经过多年的研究，成功研制了一个光纤通信实验平台，多次获教学成果奖，现已广泛用于解放军理工大学及兄弟院校的教学，取得了良好的教学效果。该平台紧扣光纤通信的知识点，采用模块化设计，实验项目多，学生主动性强，学生在平台上操作实验形象直观。

本书由张宝富、谭笑和蒋慧娟共同编写。由于公开出版的与光纤通信实验相关的教程并不多见，本书的编写尚属一项尝试性的工作，加之编著者水平所限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

电子邮件地址：zhangbaofu@163.com

编著者

2003 年 9 月于南京

目 录

第 1 章 光纤通信系统概述	(1)
1.1 光纤通信的基本概念	(1)
1.2 点到点的光纤通信系统	(3)
1.2.1 模拟光纤通信系统	(7)
1.2.2 数字光纤通信系统	(9)
1.3 波分复用 (WDM) 系统	(11)
1.4 光纤通信的现状与展望	(14)
习题	(17)
参考文献	(18)
第 2 章 光纤、光缆与无源光器件	(19)
2.1 光纤与光缆	(19)
2.1.1 常用的几种光纤及其结构	(19)
2.1.2 光纤的几何参数	(22)
2.1.3 光纤的性能参数	(24)
2.1.4 光缆的典型结构	(30)
2.2 光纤的连接与耦合	(32)
2.2.1 常用的光纤连接器	(32)
2.2.2 光源与光纤之间的耦合	(33)
2.2.3 光纤熔接	(35)
2.3 光功率的分路与合路	(36)
2.3.1 常用的耦合器	(36)
2.3.2 性能参数	(37)
2.4 光波分复用	(37)
2.4.1 几种常用的波分复用器	(37)
2.4.2 性能参数	(40)
2.5 光功率衰减与放大	(41)
2.5.1 固定和可变光衰减器	(41)
2.5.2 EDFA	(43)
2.5.3 SOA	(46)
习题	(46)
参考文献	(48)
第 3 章 光源与光发送机	(49)
3.1 光源的种类	(49)
3.1.1 发光二极管 LED	(49)
3.1.2 半导体激光二极管 LD	(54)

3.2	光源的封装与组件	(63)
3.2.1	LED 组件	(63)
3.2.2	LD 组件	(64)
3.3	光发送机的组成	(66)
3.3.1	模拟光发送机电路	(67)
3.3.2	数字光发送机电路	(68)
3.4	数字光发送机性能指标	(72)
3.5	模拟光发送机性能指标 (调制度)	(73)
3.6	光发送模块	(74)
3.7	线路码型	(75)
3.7.1	NRZ+扰码	(76)
3.7.2	CMI	(77)
3.7.3	5B/6B	(78)
3.7.4	1B1H	(79)
	习题	(81)
	参考文献	(81)
第 4 章	光检测器与光接收机	(83)
4.1	光检测器的种类	(83)
4.1.1	PIN	(83)
4.1.2	APD	(87)
4.2	光接收组件	(89)
4.3	光接收机的组成	(90)
4.4	数字光接收机的性能指标	(92)
4.4.1	灵敏度	(92)
4.4.2	动态范围	(97)
4.5	模拟光接收机的性能指标	(99)
4.6	光接收模块	(100)
4.6.1	模拟光接收模块	(101)
4.6.2	数字光接收模块	(101)
	习题	(103)
	参考文献	(103)
第 5 章	光发送机实验	(104)
5.1	半导体光源 $P-I$ 特性曲线测试	(104)
5.2	码型变换	(105)
5.3	平均发送光功率的测试	(109)
5.4	消光比 (EXT) 测试	(110)
5.5	模拟光发送机的实验	(111)
5.6	光源、组件与光发送模块产品	(112)
5.6.1	LED 及组件	(112)

5.6.2	LD 及组件	(116)
5.6.3	数字光发送模块	(120)
5.6.4	模拟光发送模块	(123)
	习题	(123)
	参考文献	(124)
第 6 章	光纤线路实验	(125)
6.1	光纤几何特性测量	(125)
6.2	光纤机械接续与熔接	(126)
6.3	光纤损耗特性测量	(128)
6.3.1	截断法	(128)
6.3.2	光时域反射计 (OTDR) 测试	(130)
6.3.3	插入法	(131)
6.4	光纤带宽测试	(133)
6.5	光纤无源器件特性测试	(134)
6.6	中继距离的测试	(134)
6.7	光纤及无源光器件产品介绍	(135)
6.7.1	单模与多模光纤	(135)
6.7.2	光缆产品	(137)
6.7.3	FC/ST/SC 活动连接器	(139)
6.7.4	分路器与星型耦合器	(141)
6.7.5	WDM 波分复用器	(144)
6.7.6	固定与可变光衰减器	(145)
6.7.7	EDFA 产品	(146)
	习题	(149)
	参考文献	(149)
第 7 章	光接收机实验	(150)
7.1	光接收机灵敏度测试	(150)
7.2	光接收机动态范围的测试	(151)
7.3	眼图实验	(152)
7.4	误码测试	(155)
7.5	抖动观察	(159)
7.6	光检测器及其组件产品介绍	(160)
7.6.1	PIN 及其组件	(160)
7.6.2	APD 及其组件	(164)
7.6.3	数字光接收模块	(165)
7.6.4	模拟光接收模块	(167)
	习题	(168)
	参考文献	(168)
第 8 章	光纤通信系统实验	(169)

8.1	语音光纤传输系统	(169)
8.2	视频图像光纤传输系统	(172)
8.3	数据光纤通信系统与计算机中的光接口	(175)
8.4	2M 数字光纤通信系统	(180)
8.5	WDM 光纤通信系统	(184)
	习题	(185)
	参考文献	(185)
第 9 章	光纤通信系统实验平台	(186)
9.1	总体设计考虑	(186)
9.2	组成框图	(187)
9.3	实验平台的具体实现	(190)
9.4	实现电路图解	(195)
	习题	(208)
	参考文献	(208)
第 10 章	常用光纤通信仪表简介	(209)
10.1	光功率计	(209)
10.2	稳定光源	(211)
10.3	光时域反射计 (OTDR)	(213)
10.3.1	工作原理	(213)
10.3.2	OTDR 结构方框图	(217)
10.3.3	光时域反射计的正确使用	(218)
10.4	误码、抖动测试仪表	(220)
10.5	光纤熔接机	(221)
10.6	PCM 终端测试仪	(226)
	习题	(227)
	参考文献	(227)
附录 A	分贝	(228)
A.1	定义	(228)
A.2	分贝毫瓦 (dBm)	(228)
A.3	奈培	(228)

第 1 章 光纤通信系统概述

早在电通信诞生之前,可见光就已用做通信的手段了,如我国周朝就用烽火台的火光来传递信息。这种通信主要用于报警、呼叫或特定的事件,是一种利用普通光的视觉光通信。但从利用光波做载波来传递信息的角度出发,光通信的历史只能从光通信的先驱贝尔发明光电话算起。1880年贝尔发明了光电话,它利用光载波信号来传送语音。虽然受当时技术条件的限制,这种光电话没有真正的使用价值,但贝尔是用光束传输信息的先驱者。光电话问世后光通信的进展很慢,沉睡了近一个世纪,直至1960年人类研制成功了世界上第一台激光器,为光通信提供了一个良好的光束(高频率、高输出功率、高的信号承载能力)和1970年由美国康宁(Corning)公司研制成功低损耗光纤(20 dB/km),为光通信找到了一个优良的传输媒质后,这才开始了光纤通信迅猛发展的时代。目前光纤通信的发展远远超出了人们的预料,给通信领域带来了革命性的变化,并成为了20世纪最伟大的技术成就之一。

本章首先阐明了光纤通信的基本概念,以及光纤通信系统与电缆通信系统相比所具有的优点,然后介绍了几种典型的光纤通信系统,如模拟光纤通信系统、数字光纤通信系统和波分复用光纤通信系统,同时还分析了每一种系统的性能指标。

1.1 光纤通信的基本概念

所谓光纤通信,是利用激光源产生的光波来携带信息,并在光纤信道上进行传输的一种通信方式。

激光这一词是从英文 Laser 翻译过来的,而 Laser 一词是由英文“Light Amplification by Stimulated Emission Radiation”的第一个大写字母构成的,其含义是受激辐射光放大。由于激光频率很高,极大地提高了通信容量,因此引起了通信工作者的广泛重视,使激光很快在通信领域得到了应用。激光器一问世,人们就模拟无线电通信进行了大气激光通信的研究,采用的激光源有氦-氖激光器和二氧化碳激光器等。由于需要大功率发射,当时所需的激光器的体积相对很大,相应的设备笨重。但近来大功率半导体激光器的研制成功,已使大气激光通信在实用化的道路上迈出了一大步。由于其以大气作为光波的传输媒质,因而还存在致命的缺点,如:大气信道衰减(雨、雾、灰尘和自然辐射对光能的吸收和散射,使光能迅速衰减)随机变化量大,需要补偿;大气湍流现象(是由大气中各处的密度不同、温度不同引起的)导致的接收光斑发生所谓的闪烁现象和漂移现象;需要安装便于调整校准的光学收发天线等。

为了克服大气对激光束的影响,人们将光波在大气中的传输转移到传输介质中。英国标准远程通信实验室的英籍华人高锟(K. C. Kao)博士提出了大胆的设想,他认为电可以沿着导电的金属线向前传输,光也可以沿着导光玻璃纤维(即光导纤维)传输。光导纤维一词是由英国的 Kapany 在1956年首次创造的,他和另一个科技工作者在1951年就用纤维束进行了光传导实验,他们的研究工作促进了医学领域中应用极广的柔性纤维镜的发展(如胃镜等)。

20世纪60年代,光导纤维的损耗很大,大于1000 dB/km,使光通信的传输距离被限制在短距离内。1970年,在纽约的康宁(Corning)玻璃厂的 Kapron, Keck 和 Maurer 发明了一

种低损耗光纤，其损耗小于 2 dB/km，这是光通信系统在实际应用中的一大突破。这种采用光导纤维来传送光波的通信就是现在所说的光纤通信，光导纤维现简称为光纤。自 1970 年以后，光纤技术以指数规律快速向前发展。1974 年，贝尔实验室找到了制造低损耗光纤的方法，称为化学气相沉积法 (MCVD)，成功研制了损耗为 1 dB/km 的光纤。1976 年日本电话电报公司研制出损耗更低的光纤，损耗下降为 0.5 dB/km。20 世纪 80 年代后期，光纤损耗可降低到 0.16 dB/km。

就在光纤损耗获得巨大突破的同时，美国贝尔实验室在 1970 年研制成功了能在室温条件下连续工作的半导体激光器。与气体、液体、固体和离子等激光器相比，半导体激光器具有体积小、耗电少、通过改变注入电流可方便地实现对信号的调制、寿命长以及可靠性高等优点。至此，可以说光纤通信向实用化方向发展的两大条件——良好的载波信号的产生（即半导体激光源）和理想的传输介质（即光纤），都得到了满意的解决。

光波实际上是一个高频的电磁波。在讨论高频电磁波时，习惯采用波长来代替频率描述，波长与频率的关系为

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

式中， λ 为电磁波的波长，其物理含义是电磁波在空间变化一个周期所经历的长度； c 为光波在空气中行进的速度，其值为 3×10^8 m/s； f 为电磁波的频率，其物理含义是电磁波在单位时间 (s) 内变化（峰-峰值）的次数。

对于光波，波长常用单位有 μm ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$)、 nm ($1 \text{nm} = 10^{-9} \text{m}$)、 Å ($1 \text{Å} = 10^{-10} \text{m}$)。目前光通信所使用的光波波长大约为 $1 \mu\text{m}$ ，主要位于红外线波段。通常，将小于 $1 \mu\text{m}$ 的波长（如 $0.85 \mu\text{m}$ ）称为短波长，将大于 $1 \mu\text{m}$ 的波长（如 $1.30 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ ）称为长波长。

光波的频率比目前电通信使用的频率都高，因而其通信容量最高。通信系统的通信容量与系统的带宽成正比。为了方便比较，通常系统的带宽用带宽与载频的百分比（即带宽利用系数）来表示。例如，一个载频为 100 MHz 的无线电通信系统，如果带宽利用系数为 10%，则系统带宽为 10 MHz；而对于载频为 1 GHz 的微波通信系统，若带宽利用率仍为 10%，则系统带宽为 100 MHz。光波的频率一般在 $1 \times 10^{14} \sim 4 \times 10^{14}$ Hz 内，在带宽利用率仍为 10% 的情况下，系统的带宽为 10~40 THz，这是电通信无法比拟的。与电通信相比，光纤通信具有如下的优点：

(1) 通信容量大。由于光纤的可用带宽较大，一般在 10 GHz 以上，因此光纤通信系统具有较大的通信容量。而金属电缆存在的分布电容和分布电感实际起到了低通滤波器的作用，限制了电缆的传输频率、带宽以及信息承载能力。现代光纤通信系统能够将传输速率为几十 Gbit/s 以上的信息传输上百英里（1 英里 = 1.609 3 km），10 Gbit/s 的光通信系统已商用化，允许数百万条语音和数据信道同时在一根光缆中传输。实验室里，达 1 Tbit/s 的系统已研制成功，光纤通信巨大的信息传输能力使其成为了信息传输的主体。

(2) 传输距离长。光缆的传输损耗比电缆低，因而可传输更长的距离。光纤通信系统仅需要少量的中继器，光缆与金属电缆的造价基本相同，少量的中继器使光纤系统的总成本比相应的金属电缆通信系统要低。

(3) 抗电磁干扰。光纤通信系统避免了电缆由于相互靠近而引起的电磁干扰。金属电缆发生干扰的主要原因就是相互间的电磁场的影响。由于光纤的材料是玻璃或塑料，都不导电，

因而不会产生磁场，也就不存在相互之间的电磁干扰。

(4) 抗噪声干扰。光纤不导电的特性还避免了光缆受到闪电、电机、荧光灯及其他电器源的电磁干扰(EMI)，外部的电噪声也不影响光频的传输能力。此外，光缆不辐射射频(RF)能量的特性也使它不会干扰其他通信系统，这在军事上的运用是非常理想的，而其他种类的通信系统在核武器的影响(电磁脉冲干扰)下则会遭到毁灭性的破坏。

(5) 适应环境。光纤对恶劣环境有较强的抵抗能力。它比金属电缆更能适应温度的变化，腐蚀性的液体或气体对其影响也较小。

(6) 重量轻、安全、易敷设。光缆的安装和维护比较安全、简单，这是因为：首先，玻璃或塑料都不导电，没有电流通过或电压的干扰；其次，它可以在易挥发的液体和气体周围使用而不必担心会引起爆炸或起火；第三，它比相应的金属电缆体积小、重量轻，更便于机载工作，而且占用的存储空间小，运输也方便。

(7) 保密。由于光纤不向外辐射能量，很难用金属感应器对光缆进行窃听，因此它比常用的铜缆保密性强。这也是光纤系统对军事应用具有吸引力的又一方面。

(8) 寿命长。尽管还没有得到证实，但可以断言，光纤系统远比金属设施的使用寿命长，因为光缆具有更强的适应环境变化和抗腐蚀的能力。

1.2 点到点的光纤通信系统

光纤通信系统是由光发送机、光接收机、光纤(或光缆)和各种耦合器件等组成的信息传输系统。光发送机的核心器件是半导体激光器，它用来产生携带信息的光载波，将电信号变换成光信号，然后在光纤中传输。光接收机的核心器件是光检测器，它用于将光信号变换成电信号。光纤通信系统可以根据系统所使用的激光光波的波长、携带信息的形式、传输光纤、信号的调制方式、光接收方式的不同和光纤中传送的是单波长通道还是多波长通道的信号分成各种光纤通信系统。

自20世纪70年代以来，各种各样的光纤通信系统如雨后春笋般地发展起来，大体经过了这样几个阶段。

第1代光纤通信系统在20世纪70年代末大量投入营运，由 $0.85\ \mu\text{m}$ 的光源和多模光纤构成。由于在 $0.85\ \mu\text{m}$ 波长上光纤损耗较大，多模光纤的传输带宽有限，因而第1代光纤通信系统只能用在低速率、短距离条件下，例如1976年美国在亚特兰大安装的商用系统，传输码速率为44 Mbit/s，传输距离仅10 km。

20世纪80年代初，采用 $1.3\ \mu\text{m}$ 的半导体发光二极管或激光二极管作为光源，再加上多模光纤构成了早期的第2代光纤通信系统。由于在 $1.3\ \mu\text{m}$ 波段上光纤损耗较低，因而无中继传输距离可达到20 km。但由于多模光纤严重的多径色散，早期的第2代光纤通信系统仍只能用在低速率场合，传输速率在140 Mbit/s以下。

20世纪80年代中期投入营运的第2代光纤通信系统由 $1.3\ \mu\text{m}$ 的半导体激光器和单模光纤构成。在 $1.3\ \mu\text{m}$ 波长上单模光纤不仅传输损耗低，而且色散最小，因此适宜于长距离、高速率传输，典型的传输速率是140 Mbit/s，中继距离超过了30 km。第3代光纤通信系统采用 $1.55\ \mu\text{m}$ 作为工作波长，以色散位移光纤作为传输媒介。在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长上光纤损耗最小，同时由于采用了色散位移光纤，在此波长上色散也最小，因而这种系统适宜于超高速率、长距离无中继传输。第3代光纤通信系统的典型传输速率为565 Mbit/s、622 Mbit/s和2.488 Gbit/s，

中继距离超过 100 km。第 3 代光纤通信系统自 20 世纪 80 年代后期研制成功以来,已大量投入使用。

第 4 代光纤通信系统采用波分复用 (WDM) 技术,在同一根光纤中传输多个光载波,获得了更高的传输速率,同时采用光纤放大器直接放大光信号以代替传统的光-电-光中继方式。这种系统的传输速率已经超过 10 Gbit/s,并已投入营运。

第 5 代光纤通信系统的研究与发展也历经了近 20 年的历程,已取得突破性进展。它基于光纤非线性压缩抵消光纤色散展宽的新概念产生的光孤子,实现了光脉冲信号在传输过程中保持其形状不变。

光纤通信系统虽然历经了 5 代的发展,但目前应用最为广泛的不外乎两种系统结构:一种是点到点的直接强度调制/直接检测 (IM/DD) 系统(根据传输信号的性质不同,又可分为数字光纤通信系统和模拟光纤通信系统两种);另一种是波分复用光纤通信系统。本章将分别介绍这几种典型的光纤通信系统的组成及其质量指标。

点到点的光纤通信系统原理框图如图 1.1 所示,图中仅表示了一个方向的传输。反方向的传输结构也是相同的。下面简要介绍各部分的功能,具体工作原理将在后续章节中介绍。

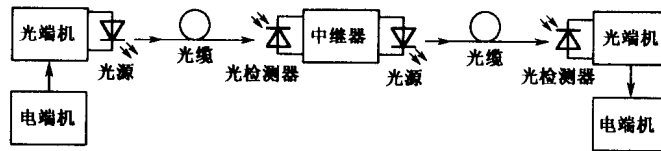


图 1.1 点到点的光纤通信系统原理框图

1. 光发送部分

光发送部分主要由光源、驱动器和调制器组成。光源是发送部分的关键器件,光纤通信系统要求光源有一定的输出光功率,尽可能小的谱线宽度,并且工作稳定、可靠,寿命长(一般要求在 10 万小时以上)。在光纤通信系统中,广泛使用半导体注入式激光器 (LD) 和发光二极管 (LED)。在短波段 ($0.8\sim 0.9\mu\text{m}$),常使用镓铝砷 (GaAlAs) 激光器和发光二极管,此类光源已很成熟,从各个方面都能满足实用光纤通信系统的要求。在长波段 ($1.0\sim 1.6\mu\text{m}$),常采用由铟镓砷磷 (InGaAsP) 材料制成的激光器和发光二极管,此类光源也已相当成熟。

由光源发出的光波在调制器中受到电信号的调制,成为已调光波。有两种调制方式,一种是半导体光源的直接强度调制 (IM),即用电信号对光源(如发光二极管 LED 或激光二极管 LD)的注入电流进行调制,使其输出光波的强度随调制信号而变化,从而实现直接强度调制。此种调制方式不要求单独的调制器,光源和调制器成为一体,即光波的产生和调制在同一半导体激光器或发光二极管内完成。直接调制的设备简单,成本低,容易实现,是目前实用光纤通信系统广泛使用的调制方式。对直接调制的限制因素主要是调制速度。

在直流工作条件下,半导体注入式激光器比较容易做到单纵模输出,但在电信号对其注入电流进行调制后,激光器容易形成多纵模输出,已调光波的光谱宽度显著增加,限制了光纤通信系统的通信容量和通信距离。为了解决这个问题,已研制成功一种分布反馈 (DBF) 激光器,或称动态单纵模激光器,它在直接调制情况下可以得到单纵模输出。这是目前大容量、长距离光纤通信系统的优选光源。

另一种调制方式是间接调制，或称外调制，此种调制的主要特点是光源和调制器分开。有多种间接调制方式，如电光调制、声光调制和磁光调制，目前技术上较为成熟的是电光调制。电光调制利用的是晶体的电光效应（即晶体在外加电场的作用下其折射率发生改变），当光源产生的光波通过用光电晶体（如常用的铌酸锂（ LiNbO_3 ）晶体等）制成的电光调制器时，电信号加在电光调制器上改变晶体的折射率，使之对光波进行调制。电光调制可以实现强度调制、相位调制或偏振调制。间接调制的优点是调制速度快，调制对光源的工作不产生影响，但设备较为复杂，仅在要求很高的调制特性的情况下使用，例如，在大容量、长距离的光纤通信系统中使用。

对于多通道系统，可由 WDM 合波器（MUX）将多个光波长信号进行合路后在光纤中传输，在接收端由 WDM 分波器（DEMUX）分出各个波长，然后送至各自的接收端处理，恢复出原信号。

终端机的作用是对来自信息源的信号进行处理，如模/数转换和多路复用等处理，是常规的通信设备。

2. 光传输部分

光传输部分主要由光纤（或光缆）和中继器组成。在短距离通信系统中，一般不需要中继器。

从发送部分输出的已调光波经耦合器进入光纤。光纤是光纤通信系统的主要组成部分，它的特性好坏将对光纤通信系统产生很大的影响。光纤的种类有很多，从光纤传输的模式来分，有多模光纤、单模光纤和双模光纤等。从光纤的折射率分布来分，有阶跃型光纤、渐变型光纤、偏振保持光纤（保偏光纤）、三角型光纤和 W 型光纤等。为了增加光纤通信系统的通信距离和通信容量，对光纤传输特性总的要求是：有尽可能低的损耗和尽可能小的色散。

目前，最常用的石英光纤的损耗已接近理论极限，短波段的损耗可达 2.1 dB/km ，长波段的损耗可达 0.18 dB/km 以下。光纤的带宽也达到了很高的水平，多模光纤的带宽距离积可达 $3 \text{ GHz} \cdot \text{km}$ ，单模光纤可达数十 $\text{GHz} \cdot \text{km}$ ，在 $1.3 \mu\text{m}$ 波长左右可实现零色散区，即光纤的带宽可接近无穷大。由于长波长的损耗低、带宽宽，所以现在长距离通信中一般不用短波长光纤通信系统，而主要采用 $1.3 \mu\text{m}$ 单模光纤通信系统。由于 $1.55 \mu\text{m}$ 窗口光纤损耗更低，现在的实用光纤通信系统正在向 $1.55 \mu\text{m}$ 波长区发展。

为了进一步降低光纤损耗，增加光纤通信系统的中继距离，人们正在研究更低损耗的超长波长（ $2 \mu\text{m}$ 以上）光纤材料。这是一些非石英系的玻璃或单晶材料，它的理论极限损耗很低，有些可达 10^{-9} dB/km 。例如， TnB （碲化钼）在 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 的低损耗窗口为 10^{-3} dB/km 。此外，为了适应外差光纤通信系统的特殊要求，人们还正在研制各种偏振保持光纤。它对将来发展长距离、大容量的光纤通信系统有重要意义。光传输线路的损耗还包括光纤接头和连接器的损耗，由于光纤线路由许多光纤连接而成，光纤接头和连接器的损耗将对系统产生不小的影响。目前接头损耗可达 0.01 dB 以下，活动连接器损耗达 0.1 dB 。

由于光纤的损耗和带宽限制了光波的传输距离，当光纤通信线路很长时，要求每隔一定的距离就要加入一个中继器，它与有线通信的增音机的作用相同。但应该指出，由于光纤损耗很低，光纤通信的中继距离要比有线通信，甚至微波通信大得多。目前， 2.4 Gbit/s 单模光纤长波长通信系统的中继距离可达 153 km ，已超过微波中继距离好几倍，这就可以减少光纤

通信线路中的中继器数目，从而提高光纤通信的可靠性和经济效益。

从光通信的意义来说，中继器应是光波的直接放大，但目前实用的光纤通信系统都是光-电转换型的中继器，即电中继器。它由光接收机和光发送机组成，光接收机首先接收从光纤中传来的被衰减的光信号，并将它变为电信号，然后对电信号进行放大，再用电信号直接调制发送机中的光源，产生已调光波，再耦合进入光纤，达到光信号放大的目的。此种中继器设备比较复杂，而且由于反复的光-电、电-光变换而增加了信号的失真。

随着光电器件制造技术的进一步发展，光波的直接放大已成为现实，现已研制成功各种类型的光放大器，均可作为光直接放大中继器。通过光纤传输后衰减的光信号可用光放大器直接放大，继续向前传输以达到长距离通信的目的。目前，光放大器尤其是掺铒光纤放大器（EDFA）已在实用的光纤通信系统中得到了广泛使用。

随着高速光纤通信系统的出现，由于光纤放大器的使用克服了光纤的损耗对系统性能（如中继距离）的影响，因而影响光纤通信系统传输性能的因素（即光纤的色散和非线性特性）成了限制系统性能的主要因素。为了克服光纤色散的影响，目前已有相应的解决方案（如色散补偿光纤等），新一代的光纤通信系统（如光孤子通信系统）也已实验成功。

3. 光接收部分

光电检测（波）器是光接收的主要部件，从光纤中传输来的已调光波信号入射到光电检波器的光敏面上，光电检波器将光信号解调成电信号，然后进行电放大处理，还原成原来的信息。因为光纤输出的光信号很微弱，所以，为了有效地将光信号转换为电信号，要求光电检波器有高的响应度、低噪声和快的响应速度。

目前，实用光纤通信系统使用的半导体光电检波器有：PIN 光电二极管和雪崩光电二极管（APD）。前者是无增益的，后者是有增益的。由于半导体材料对不同波长有不同的响应度，因此，短波长广泛使用硅雪崩光电二极管，长波长广泛使用锗雪崩光电二极管或铟镓砷磷雪崩光电二极管和 PIN 光电二极管。为了提高光接收机灵敏度，在长波长广泛使用 PIN-FET 接收组件，它是用 PIN 光电二极管做光电检波器，场效应晶体管 FET 作为前置放大器的组合器件。

正在研究的一种新型光电晶体管光电检波器（如量子阱器件）既有较大的增益，又有较小的噪声，现已有试制性产品，预计不久将在实用光纤通信系统中应用。

光纤通信系统有两种接收方式：一种是直接检波（DD, Direct Detection），即单独使用光电检波器直接将光信号变换为电信号。此种接收方式的优点是设备简单、经济，是当前实用光纤通信系统普遍采用的接收方式。另一种是外差检测（波）方式（CD, Coherent Direction），即光接收机产生一个本地振荡光波，与光纤输出的光波信号在光混频器中差拍产生中频信号，再经光电检波器变换为中频电信号。此种方式能大幅度提高光接收机的灵敏度，但设备比较复杂，对光源的频率稳定性和光谱宽度要求很高，目前还处于实验阶段。但大量的理论和实际工作已充分证明，相干光通信是一种很有发展前途的光纤通信系统，随着光纤和光电器件制造技术的进一步提高，将显示出它更大的优越性。

光接收除了把来自光纤的光信号还原成电信号外，还有放大、整形和信号再生等功能，然后再把信号输入到接收端的电端机。接收端电端机的作用完成与发送部分的电端机相反的功能。

在研究设计或者评价一个通信系统的好坏时，必然涉及系统的质量指标问题。光纤通信系统中的质量指标是很多的，归纳起来主要有以下几个方面：

- (1) 有效性，指消息的传输速度；
- (2) 可靠性，指消息传输的质量；
- (3) 适应性，指环境使用条件；
- (4) 标准性，指元件的标准性、互换性；
- (5) 经济性，指成本是否低；
- (6) 保密性，是否便于加密；
- (7) 使用维修，是否方便。

其中最主要的指标是有效性和可靠性。这两个指标通常是矛盾的，应用中一般根据实际需要综合考虑，尽可能取得满意的结果。

根据电端机送入光端机信号的性质不同，点到点的光纤通信系统又可以分为模拟和数字光纤通信系统两类。虽然评价系统性能的指标仍然是相辅相成的有效性和可靠性，但是由于传输的信号不同，一个是模拟信号，一个是数字信号，因而有效性和可靠性具体表现形式不同，具体讨论如下。

1.2.1 模拟光纤通信系统

与模拟通信相比，数字通信虽然占用频带较宽，但是其抗干扰能力强，传输质量与通信线路长度无关，并且便于组成统一的综合业务（语音、图像和数据等业务）数字通信网。近年来，随着超大规模集成电路（VLSI）的发展，各种数字通信设备的体积不断减小，价格不断降低，可靠性也得到了提高。因此，在公用通信网中应用数字通信技术所带来的综合经济效益逐渐超过了采用传统模拟传输技术所产生的经济效益。这里所说的公用通信网指的是公用交换电话通信网（PSTN）和公用交换分组数据网（PSPDN）。数字通信已成为现代信息传输的重要手段，为各种通信系统所争相采用。

大家或许会问：既然数字通信技术如此优越，为何还有不少地方在使用模拟光纤通信系统呢？原因很简单，市场中采用何种技术，主要是看其能否带来更好的经济效益，而不是说，哪种技术性能优越就采用哪种技术。这一原则在 IT 行业技术发展史中屡见不鲜，相干光波通信系统的兴衰便是其中典型的一个例子。目前通信系统的现状是，一方面正在积极地实验和建立宽带综合业务数字网（B-ISDN），另一方面现有的模拟通信网仍在运行并将继续在国民经济中发挥作用。于是人们希望找到一种过渡形式，去适应数字信号与模拟信号的兼容以及 B-ISDN 和已有的模拟网并存的通信体制。在这种情况下，光纤模拟传输技术的作用就不容忽视了。特别是在专用光纤通信系统中，模拟调制传输技术有着明显的特点。所谓专用通信系统，这里指的是不开放公用或不妨碍公用通信网经营管理的通信系统，如广播电视短程线传输、工业与交通监控管理系统、共用天线（包括有线电视）系统、计算机网乃至宽带的综合业务局域网（LAN）中的光纤传输系统等。在这些系统中，信息多以模拟调制方式进行传输，其中主要包括图像信号和数据信号等内容的传输。

一条模拟光纤通信链路及测试系统如图 1.2 所示。输入的模拟信号可以是语音、图像，也可以是其他模拟波形。最简单的光纤链路形式是单路模拟信号直接强度调制/直接检测。

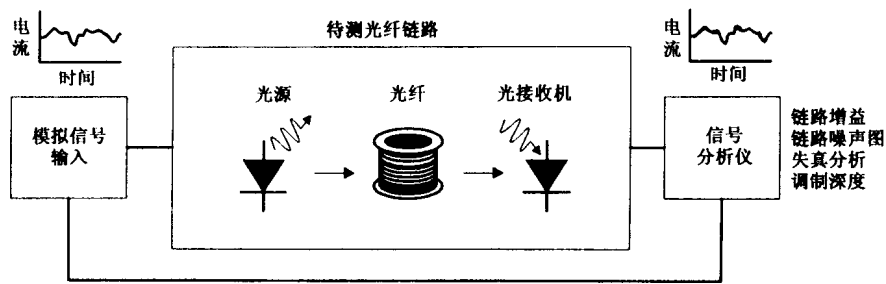


图 1.2 模拟光纤通信链路及测试系统

由于光纤是带宽很宽的一种传输介质，因此为了增强模拟光纤通信系统的有效性，人们常采用频分复用（FDM）技术。FDM 是将所给的信道带宽分割成互不重叠的许多小区间，每个小区间能顺利通过一路信号。这一方式通常被称为副载波复用（SCM），如图 1.3 所示。所谓副载波是指除光载波外，多路信号还调制在电的频分复用副载波上。每一副载波可用压控振荡器来产生，然后对信号进行调制，已调信号经合路器形成复合信号去驱动光源，传输系统所用光纤一般为单模光纤。在接收端，采用宽带光电检测器对光信号进行直接检测，然后用传统的微波技术和器件选择出所需要的信道加以解调。副载波的频率可以从 VHF 频段到微波波段，其频率仅受到激光器调制速率的限制，目前已达 20 GHz 左右。因此，副载波复用具有频带宽、容量大的特点。

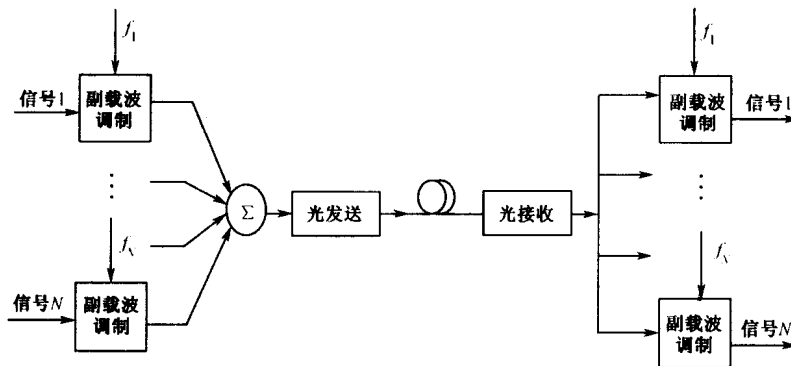


图 1.3 SCM 系统框图

由于系统中采用了许多光电器件和光纤信道，因而信号在传送过程中必然受到各种随机噪声的影响，它们是影响模拟传输系统可靠性的重要因素。噪声的来源主要由 3 部分组成：系统自身的热噪声、激光器的强度噪声和光电探测器的散粒噪声。其中，热噪声占主要地位。除此以外，非线性失真也是模拟系统，特别是大容量多路复用的模拟调制系统中影响传输质量的重要原因。非线性失真主要是由光源的非线性特性引起的。光源的输出光功率与注入电流之间的关系近似为线性关系，输出光功率随着注入电流的增大而增大，但当注入电流大到一定的值时，输出光功率的增大就会变得缓慢。LD 激光器的线性比 LED 发光二极管更差，因为它是阈值器件，只有当注入电流大于阈值时才有激光输出，因此使用时应工作在线性区。

对于模拟通信系统，人们最关心的是信号在传送过程中的失真或畸变。又由于系统中存

在各种噪声和非线性关系，因而采用信噪比（SNR，即信号功率与噪声功率之比）来衡量信号的恶化程度。对于实际的系统习惯采用载噪比（CNR），它是指载波功率与噪声功率均方根之比。在模拟系统中使用载噪比分析而不是信噪比，这是因为信息信号是叠加在一个射频（RF）载波上传送的，因此要计算载波的功率来代替信号的功率。在实现一个模拟光纤通信系统时，除了应主要考虑的参数载噪比之外，还需要考虑带宽和传输系统中由于非线性引起的信号失真，如交调或互调失真。

1.2.2 数字光纤通信系统

如上所述，光电变换器件（如激光器或发光二极管）的线性特性不很理想，还不能像电气中的载波模拟调制那样进行多路复用，只适用于线性度要求不很高的电视信号的多路复用。所以，现在的光纤通信系统绝大多数是采用数字调制来实现多路复用的。从这种意义上说，光纤通信适用于数字通信而不是模拟通信。

一条数字光纤通信链路如图 1.4 所示。图中给出了传输链路中几个关键点的波形，这些波形展示了光纤链路的一些特性。

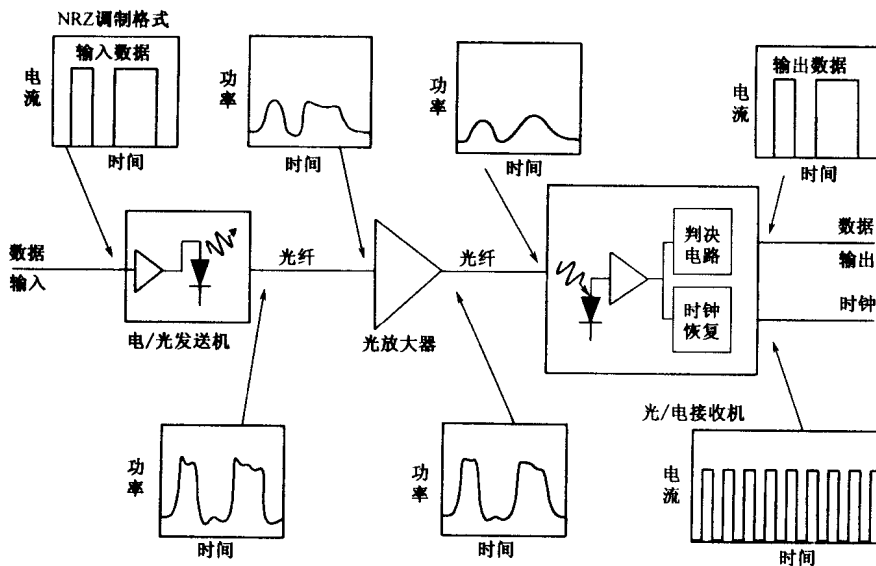


图 1.4 数字光纤通信链路

由前面的介绍可知，对于长距离的光纤通信系统，需要有中继器，其作用是把经过长距离光纤传输后产生衰减和畸变的微弱光信号放大、整形，再生成一定强度的光信号，继续传送，以保证良好的通信质量。传统的中继器采用的是光-电-光形式，即把接收到的光信号用光电探测器变换为电信号，经放大、整形、再生后，再调制光源，把电信号变换为光信号，重新发出，而不是直接把光信号放大。数字光纤通信系统中的中继器原理框图如图 1.5 所示。它完成了均衡放大、识别再生和再定时功能，是标准的 3R 中继器（Reshape, Regenerate, Retime）。模拟中继器一般被称为 1R 中继器，它所完成的功能只有均衡放大。这也是模拟中继器与数字中继器的主要区别所在。