



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

研究生创新教育系列教材

光纤通信器件及系统

主 编 朱京平
副主编 李 杰 张云尧
曹 猛



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



西安交通大学
XIAN JIAOTONG UNIVERSITY

研究生创新教育系列教材

光纤通信器件及系统

主 编 朱京平
副主编 李 杰 张云尧
曹 猛

西安交通大学出版社
· 西 安 ·

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信器件及系统/朱京平主编. —西安:
西安交通大学出版社, 2011. 11
ISBN 978-7-5605-3935-5

I. ①光… II. ①朱… III. ①光纤通信-研究生-教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 083338 号

书 名 光纤通信器件及系统
主 编 朱京平
责任编辑 王 欣

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)
传 真 (029) 82668280
印 刷 陕西元盛印务有限公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 20.625 字数 380 千字
版次印次 2011 年 11 月第 1 版 2011 年 11 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-3935-5/TN·129
定 价 38.00 元

读者购书、书店添货如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。
订购热线:(029)82665248 (029)82665249
投稿热线:(029)82664954
读者信箱:jdjgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

总 序

创新是一个民族的灵魂,也是高层次人才水平的集中体现。因此,创新能力的培养应贯穿于研究生培养的各个环节,包括课程学习、文献阅读、课题研究等。文献阅读与课题研究无疑是培养研究生创新能力的重要手段,同样,课程学习也是培养研究生创新能力的重要环节。通过课程学习,使研究生在教师指导下,获取知识并理解知识创新过程与创新方法,对培养研究生创新能力具有极其重要的意义。

西安交通大学研究生院围绕研究生创新意识与创新能力改革研究生课程体系的同时,开设了一批研究型课程,支持编写了一批研究型课程的教材,目的是为了推动在课程教学环节加强研究生创新意识与创新能力的培养,进一步提高研究生培养质量。

研究型课程是指以激发研究生批判性思维、创新意识为主要目标,由具有高学术水平的教授作为任课教师参与指导,以本学科领域最新研究和前沿知识为内容,以探索式的教学方式为主导,适合于师生互动,使学生有更大的思维空间的课程。研究型教材应使学生在在学习过程中可以掌握最新的科学知识,了解最新的前沿动态,激发研究生科学研究的兴趣,掌握基本的科学方法,把教师为中心的教学模式转变为以学生为中心教师为主导的教学模式,把学生被动接受知识转变为在探索研究与自主学习中掌握知识和培养能力。

出版研究型课程系列教材,是一项探索性的工作,有许多艰苦的工作。虽然已出版的教材凝聚了作者的大量心血,但毕竟是一项在实践中不断完善的工作。我们深信,通过研究型系列教材的出版与完善,必定能够促进研究生创新能力的培养。

西安交通大学研究生院

前 言

从 1970 年光纤的损耗降到 20dB/km 以来,光纤通信技术呈现出飞速发展的态势;1980 年量子阱阵列激光器取得了标志性进展,各国开始了光通信系统建设;1990 年掺铒光纤放大器(EDFA)、分布反馈激光器、波分复用技术等商用化,光纤通信走入辉煌;进入 21 世纪以来,光纤入户、自由空间光通信又备受关注。在光通信技术蓬勃发展的形势下,培养和造就一大批掌握光通信器件及系统基础知识、基本理论与基本技能,了解该领域最新发展动态的高级专业技术人才,成为当今社会的迫切需要,而一本内容全面系统且能跟上时代步伐的《光纤通信器件及系统》教材,可以为学生及从业人员掌握有关知识,从事有关方面的研究、开发与市场等工作打下基础。

西安交通大学多年来一直面向电子与信息工程学院的研究生开设光通信器件及系统课程。在对国内外的有关教材的使用中我们体会到,鉴于光纤、光通信无源器件等光纤通信技术的飞速发展与不断突破,现有教材已难适应研究生掌握光通信领域最新动态的培养要求,为此我们不断系统研究国内外有关方面的教材、专著、资料,吸收有用成份,充实有关内容,形成了本教材。教材一方面注重双基知识学习,另一方面力求反映国内外相关领域的最新研究与应用动态,目的是尽可能满足电子信息科学类电子科学与技术、光信息科学与技术等专业硕士生课程教学的需要,也希望能为对光通信有兴趣的科学研究人员和工程技术人员提供有益的帮助。

全书共 13 章。第 1 章为绪论,扼要介绍光通信系统的分类、发展历程、基本概念及典型系统等;第 2 章至第 9 章系统介绍光通信系统的光源与光发射机、光检测器及光接收机、光纤、光放大器、光开关、光调制器、光波分复用器以及其他光无源器件等构成光通信系统的重要器件;第 10 章到第 13 章分别介绍光通信系统的性能与设计、光波分复用系统、空间光通信系统及全光通信系统等典型光通信系统。每一章自成体系,从基本原理入手,系统介绍了基本概念、基础知识、相关技术及发展动态。

本书由朱京平主编。其中第 1,5,10,12,13 章由朱京平编写,第 4,6,8 章由李杰编写,第 7,9,11 章由张云尧编写,第 2,3 章由曹猛编写。

作者对西安交通大学教学研究与教学改革项目的资助,以及项目执行中各位专家在评审等环节所提的宝贵意见及认可表示衷心的感谢!对西安交通大学出版

社的支持和帮助表示感谢！特别需要指出的是，董猛同学在调研、材料准备、插图绘制、编排、校稿过程中作了大量工作，本书的形成中凝聚了该同学的大量心血，其认真负责的工作态度令人印象深刻，在此表示感谢！孙波行、管今哥等同学在编排、校稿等方面也做了不少工作。近几届研究生从学生角度对原讲义提出了不少宝贵建议，本单位师长也给以不少帮助，西安交通大学研究生院、电子与信息工程学院等给予大力支持，在此一并表示感谢！同时感谢家人在工作和学习中给予的全面理解与帮助！还需要特别指出的是，编写过程中编者从已列出和因篇幅所限未能列出的同行有关教材与学术专著中汲取了大量知识，教材包含了他们的大量智慧与劳动成果，因而应该说本教材的作者也应包含他们中的每一位，在此作者向他们表示诚挚的感谢！

由于笔者水平有限，本书在内容取材、体系安排、文字表述方面必然有不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2011年4月于西安交通大学

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 光通信系统的分类	(2)
1.2 光纤通信系统的发展历程	(2)
1.3 光纤通信系统的基本构成	(4)
1.4 光纤通信系统相关基本概念	(7)
1.5 典型光纤通信系统	(9)
第 2 章 光源与光发射机	(14)
2.1 半导体发光二极管(LED)	(14)
2.2 半导体激光器(LD)	(18)
2.3 发射机	(27)
第 3 章 光检测器与光接收机	(34)
3.1 光电检测器的工作原理——光电效应	(34)
3.2 光检测器的特性	(36)
3.3 光电检测器分类及典型光电检测器	(37)
3.4 光电检测器与光纤的耦合	(49)
3.5 光检测器的可靠性及注意事项	(50)
3.6 光接收机的基本组成	(51)
3.7 光接收机的特性	(54)
3.8 平衡式光接收机	(59)
第 4 章 光 纤	(61)
4.1 光纤的结构和类型	(61)
4.2 光在光纤中的传播	(64)
4.3 单模光纤	(66)
4.4 多模光纤	(70)
4.5 光纤中的场结构及场图	(72)
4.6 光纤的传输特性	(74)
4.7 光纤制造工艺	(78)

4.8	光纤的连接与耦合	(81)
第5章	光放大器	(83)
5.1	光放大器的作用	(83)
5.2	光放大器的分类	(85)
5.3	掺铒光纤放大器(EDFA)	(86)
5.4	半导体光放大器(SOA)	(99)
5.5	光纤拉曼放大器(FRA)	(102)
第6章	光开关	(108)
6.1	光开关的典型应用	(108)
6.2	光开关的性能参数	(110)
6.3	光开关的分类	(113)
6.4	机械式光开关	(114)
6.5	非机械式光开关	(119)
6.6	光开关应用前景分析	(135)
第7章	光调制与光调制器	(137)
7.1	光源的调制方式	(137)
7.2	光源的直接调制	(139)
7.3	典型的光源间接调制方式	(140)
7.4	高速通信系统用典型间接调制器	(148)
第8章	光波分复用器	(153)
8.1	光波分复用器的工作原理、光学特性与分类	(155)
8.2	光纤耦合型波分复用器	(157)
8.3	角色散型波分复用器	(160)
8.4	滤波器型波分复用器	(165)
8.5	其他类型波分复用器	(168)
8.6	光波分复用器的应用现状及发展趋势	(171)
第9章	其他光通信无源器件	(173)
9.1	光纤连接器	(173)
9.2	光耦合器	(186)

9.3	光衰减器	(189)
9.4	光隔离器	(193)
第 10 章	光纤通信系统的性能与设计	(198)
10.1	模拟基带直接光强调制光纤传输系统性能评价与设计	(198)
10.2	副载波复用光纤传输系统性能评价与设计	(204)
10.3	数字光纤通信系统性能评价与设计	(211)
10.4	光纤通信性能评价的两类关键指标	(219)
10.5	光纤通信系统设计	(222)
第 11 章	光波分复用系统	(227)
11.1	光波分复用技术概述	(227)
11.2	WDM 系统的概念、组成与结构	(230)
11.3	密集波分复用(DWDM)技术	(234)
11.4	稀疏波分复用(CWDM)技术	(241)
11.5	光波分复用系统的应用	(253)
第 12 章	空间光通信技术	(257)
12.1	空间光通信的特点	(257)
12.2	自由空间光通信系统的基本原理及结构	(259)
12.3	空间光通信系统中的光学系统设计与器件选择	(262)
12.4	空间光通信中的 ATP 系统设计	(274)
12.5	空间光通信现状及发展趋势	(277)
第 13 章	全光通信技术	(291)
13.1	概述	(291)
13.2	全光通信网的关键技术	(298)
13.3	代表性全光网	(311)
13.4	全光网的未来	(314)
	参考文献	(318)

第 1 章 绪 论

传输层作为整个有线通信网体系中的最底层,在近 30 年经历了铁线、铜缆和光纤三种传输介质。随着社会的进步和人们对通信服务质量(QoS)期望与数据业务量的不断提高,铁线与铜缆已经不能满足现在通信发展的要求并逐步被淘汰,光通信成为目前传输层唯一有效的传输手段。

光通信系统是以光为载波,通过光电变换,用光来传输信息的通信系统。20 世纪末是光通信发展最为辉煌的时期,人们不断追求通信的超高速、大容量,10 G、40 G、80 G 甚至 160 G 的超高速率光通信系统迅速研制成功并逐渐投入商用。然而这种辉煌由于各种业务的发展没有及时跟上,导致 21 世纪最初几年国际经济危机来袭时,光通信业不可避免地受到了巨大的冲击,很多公司面临转型、破产。目前,随着人们对光通信认识的进一步提高及经济的回暖,该领域正处于一个艰难的上升阶段,技术上呈现出以下发展趋势:

首先,光通信研究的重点已经从大容量、超高速转变为实现智能化、自动化。自动交换光网络(ASON)应运而生,将以往光网络复杂、冗余的人工连接指配,变为简单、便利的自动信道配置,使得线路敷设的人力、物力和财力都大大节省,且保护倒换功能也大大提高。

其次,光通信网络向边缘化发展。随着通信行业的迅速发展,光网络逐渐从核心网向边缘网络发展,城域网中开发了业务类型多、传输速度快的多业务传输平台(MSTP),接入网由双绞线上网方式(xDLS)向光纤到户(FTTH)发展。

第三,空间光通信技术日益成熟。一方面,世界各发达国家对卫星轨道之间、星对地、地对星、空对地、地对空、地对地等各种形式光通信系统进行了广泛的研究,一些先进国家已经推出空间光通信的产品;另一方面,自由空间激光通信成为解决“最后一公里”瓶颈问题的有效手段,同时也是宽带光纤通信的有效补充。

第四,光孤子通信、超长波长通信和相干光通信方面也正在取得巨大进展。

总之,在信息化的今天,光通信系统已经深入到我们生活的每一天,对光通信器件和系统有一个深入的认识,已成为信息通信类学生知识结构的重要方面。

1.1 光通信系统的分类

目前有实用前途的光通信系统一般包括光纤通信系统和空间光通信系统。其中光纤通信由于低损耗光纤技术的突破及半导体激光器的问世,最先走向成熟,并且在 20 世纪 90 年代取得了辉煌成就;而自由空间光通信是在 20 世纪 90 年代激光器和光调制技术都已成熟时才成为现实,而此时,光纤通信系统已经成为一项巨大的产业,深入到人们生活的方方面面。为此,本书以光纤通信器件及系统为核心展开,在此基础上对空间光通信进行了必要的介绍。

本章对光通信系统的分类也以光纤通信系统为主。根据所使用的光波长、传输信号形式、传输光纤类型、信号调制方式以及光接收方式的不同,将光纤通信系统如表 1.1 所示分类。

表 1.1 光纤通信系统的分类

分类方式	类别	特点
按信号类型	数字光纤通信	抗干扰能力强,传输质量好
	模拟光纤通信	对系统要求高,适用于图像传输
按光波长通道个数	单波长(通道)	技术难度小,应用成熟
	多波长(WDM)	传输容量大,距离远
按调制方式	直接强度调制 IM	技术成熟,成本低
	外调制	高速传输,成本较高
按接收方式	直接检测 DD	技术成熟,成本低,效率高
	相干调制 CD	灵敏度高,传输容量大,距离远
按光纤特性	多模光纤 MMF	采用 850 nm 波长,距离短
	单模光纤 SMF	采用 1310/1550 nm 波长,传输容量大,距离远

1.2 光纤通信系统的发展历程

1880 年,贝尔发明了一种利用光波作载波传递话音信息的“光电话”,证明了利用光波作载波传递信息的可能性,是光通信历史上的第一步。

20 世纪 60 年代中期以前,人们曾苦心研究过光圈波导、气体透镜、空心金属波导管作为光通信传输媒质,但终因它们衰耗过大或者造价昂贵而无法实用化。

1966年,英籍华人高锟(K. C. Kao)博士首次利用无线电波导通信原理,提出了低损耗的光导纤维(简称光纤)概念,他在英国电机工程师学会的学报(Proc. Inst. Elect. Eng. PIEE)杂志上发表了被称为“光纤通信里程碑”的论文——《用于光频的介质纤维表面波导(Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies)》,从理论上证实了光纤作为传输媒质实现光通信的可能性,并设计了通信用阶跃光纤,科学预言了制造超低耗光纤的可能性。高锟先生也因此获得2009年诺贝尔物理学奖。这是诺贝尔物理学奖首次授予技术科学领域的科学家,由此可见高锟先生这一贡献的重要性。

1970年美国康宁玻璃公司根据高锟的设想制造出当时世界上第一根20 dB/km光纤(光波沿光纤传输1 km后,光损耗为原有的1%),虽然只有几米长,寿命也仅有几个小时,但它证实了超低损耗光纤技术与工艺方法的可行性,为光通信找到了理想传输媒体,是光通信研究的重大实质性突破。

1970年,贝尔实验室研制成功室温下连续振荡的半导体激光器(LD)。

鉴于构成光通信系统传输媒质的低损耗光纤与信号源的半导体激光器都是在1970年研制成功的,人们把1970年称为“光纤通信元年”。之后,世界各发达国家对光纤通信的研究倾注了大量的人力与物力,从而使光纤通信技术取得了极其惊人的进展:

1974年贝尔实验室发明了改进的“化学气相沉积法(MCVD)”来制造低损耗光纤,使光纤损耗下降到1 dB/km;

1976年日本电报电话公司研制出损耗0.5 dB/km的光纤;

1976年美国在亚特兰大成功地进行了44.7 Mbps的光纤通信系统试验,开通了世界上第一个实用化光纤通信系统,其采用波长为0.85 μm ,码率为45 Mbps,中继距离为10 km;

1976年日本电报电话公司开始了64 km,32 Mbps突变折射率光纤系统的室内试验,并研制成功1.3 μm 波长的半导体激光器;

1979年,日本电报电话公司研制出0.2 dB/km的极低损耗石英光纤(1.5 μm);

1980年,多模光纤通信系统商用化(码率140 Mbps,波长0.85 μm),并着手单模光纤通信系统的现场试验工作;

1984年,实现了中继距离50 km,速率为1.7 Gbps的实用化光纤传输系统;

我国在20世纪80年代末开始敷设八横八纵光纤干路网;

1990年极低损耗石英光纤损耗降到0.14 dB/km,已接近石英光纤的理论损耗极限值0.1 dB/km;

1990年,单模光纤通信系统进入商用化阶段(565 Mbps,波长为1.31 μm);

1990年,着手进行零色散移位光纤和波分复用(WDM)及相干通信的现场试验,用波长 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 的单模光纤传输系统实现了中继距离超过 100 km ,速率为 2.4 Gbps 的光纤传输,而且数字同步体系(SDH)的技术标准也陆续制定;

1991年,掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)进入商用化阶段,中继距离大大增加,使得在 2.5 Gbps 速率上传输 $4\text{ }500\text{ km}$ 的试验,以及 10 Gbps 的速率上传输 $1\text{ }500\text{ km}$ 的试验得以成功;

1993年,同步数字系统(Synchronize Digital Hierachy, SDH)产品开始商用化(622 Mbps 以下);

1995年, 2.5 Gbps 的SDH产品进入商用化阶段;

1996年, 10 Gbps 的SDH产品进入商用化阶段;

1997年,采用波分复用技术的 20 Gbps 和 40 Gbps 的SDH产品试验取得重大突破,使得波分复用光通信成为主流发展技术,系统的通信容量成数量级增加;

2000年, $1\text{ }000$ 路以上的超密集波分复用器问世, Tbps 级的高速网实验产品已经试验成功。

通信系统的光源从1970年第一只室温连续工作的同质结半导体激光器,经由异质结条形激光器,发展到分布反馈式激光器(DFB)以及多量子阱激光器(MQW);光接收器件也从简单的硅PIN光二极管发展到量子效率达 90% 的Ⅲ-V族雪崩光二极管(APD);光开关、密集波分复用器、光隔离器、光放大器等各种光无源器件相继问世,性能不断提高;光放大器与光波分复用技术取得突破。这些都使得光纤通信技术成为目前通信系统的主流商用技术。

现代化的通信网主要由传输网、交换网和接入网三大部分组成。目前,传输网已基本实现数字化、光纤化;交换网也基本实现程控化、数字化;而接入网由于建设技术复杂、实施难度大及耗资庞大而成为通信网建设中的“瓶颈”,国际权威专家们把宽带综合业务接入网称为信息高速公路的“最后一公里”。随着技术的发展,业内人士普遍认为,自由空间激光通信、光纤入户等方案将是解决“最后一公里”瓶颈问题的有效手段。光孤子通信、超长波长通信和相干光通信方面也正在取得巨大进展,未来的光通信技术必将在人们的生活中占据更重要的位置。

1.3 光纤通信系统的基本构成

从原理上讲,光纤通信系统与其他通信系统的区别只是信息传输过程中所使用的载波频率的不同。光载波的频率在约 100 THz 的数量级,而微波载频的范围在 $1\sim 10\text{ GHz}$,由于光载波频率远远高于微波频率,光通信的信息容量可以比微波系统高 $10\text{ }000$ 倍,调制带宽可以达到约 1 Tbps 的量级。

图 1.1 给出了最基本的光纤通信系统示意图,它由光发射机、通信信道和光接收机三个部分组成。光发射机负责将要传输的语音、图像、数据等信息转变成适合于在光纤上传输的光信号;通信信道包括最基本的光纤中继放大器 EDFA 以及各种无源器件等;而光接收机则从接收的光信号中提取信息并转变成电信号,以获得对应的语音、图像、数据等信息。

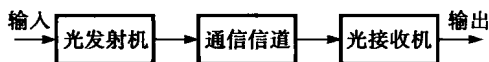


图 1.1 光纤通信的最基本结构

1.3.1 通信信道

光通信信道由光纤、光放大器及光无源器件等组成网状系统。

1.3.1.1 光纤

光纤是光纤通信系统通信信道的主体,其作用是将光信号从发射机传送到接收机。光纤的损耗和色散影响着光纤通信系统的传输距离和传输容量。损耗使得光纤中光功率随距离按指数规律减小,直接决定了长途光纤通信系统的中继距离。色散使得光脉冲在光纤中传输时发生展宽,形成码间干扰。由多模光纤具有的多模色散导致的脉冲展宽很快(典型值约为 10 ns/km),因此中长距离光纤系统均采用单模光纤传输。单模光纤材料色散导致的脉冲展宽较小(典型值 $<0.1\text{ ns/km}$),且可通过控制光源质量进一步减小,因而大多数应用中可以接受,但它仍然是光纤通信系统中限制码速和传输距离的重要因素。

1.3.1.2 光放大器

由于光纤传输过程中的损耗,同时,实际应用中为使光信号传输距离更远而常采用光分支,因而必须对光信号进行放大,以补偿光分支损耗和光纤损耗。解决这一问题的传统方法是采用光电中继器,而这种光/电/光的变换和处理方式已满足不了现代通信传输的要求,由此发展起了光放大器。

光放大器是在光通信系统中对光信号进行实时、在线、宽带、高增益、低噪声、低功耗以及波长、速率和调制方式透明的直接放大的功能器件。其中掺 Er^{3+} 光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)是现代光通信系统的关键器件之一,且在 20 世纪 90 年代已实现商用化。如图 1.2,一台实用的 EDFA 由光路和辅助电路两大部分组成,其光路部分由掺铒光纤、泵浦光源、光合波器、光隔离器和光滤波器组成,辅助电路主要包括电源、微处理自动控制和告警及保护电路。辅助电路的协调工作是光放大器正常工作的前提。

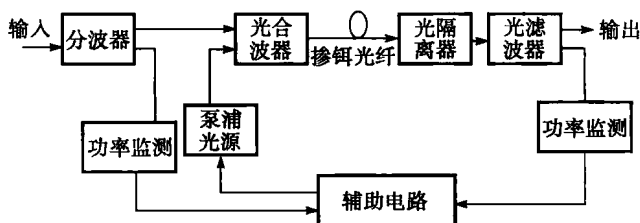


图 1.2 EDFA 典型结构

1.3.1.3 光无源器件

光通信无源器件是在光通信系统实现本身功能的过程中内部不发生光电能量转换的器件。它们在光路中起着光路切换(光开关)、路由选择(光路由器)、光纤连接(光纤连接器)、光功率分配(光耦合器与分配器)、光信号的衰减(光衰减器)和光波分复用(光波分复用器)等作用,没有它们就构不成光纤通信系统。随着光纤技术的飞速发展,这些光无源器件无论在结构上还是在性能上都有了很大的提高,近几年来世界各国都在研究和开发所谓全光网络,即希望在整个传输系统中全部采用光信号,取消光电转换步骤,尽量使用光学手段实现对信号的传输和处理,这对光通信器件尤其是无源器件提出了相当高的要求。

1.3.2 光发射机

在光纤通信系统中,光发射机的作用就是将电信号转变成光信号,并有效地将光信号耦合进入传输光纤中。图 1.3 是光发射机的结构示意图,它主要由光源、调制器和信道耦合器等组成,其中光源是光发射机的“心脏”,目前普遍采用半导体激光器或发光二极管。光信号通过对光载波的调制而获得。目前使用的光载波调制方法有两种,一种是直接对半导体光源的注入电流进行调制,另一种是使用外调制器。在直接调制下,输入信号直接被加到光源的驱动电路上,与使用外调制器相比,直接调制能使系统结构简化,成本降低。信道耦合器通常是一个微透镜,它最大可能地将光信号耦合进入光纤中。

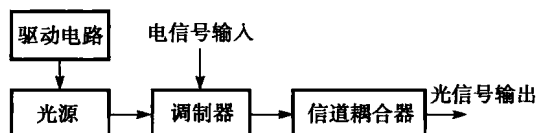


图 1.3 光发射机结构

1.3.3 光接收机

光接收机在光纤的末端将接收到的光信号恢复成原来的电信号,图 1.4 给出了光接收机的结构示意图,它主要由耦合器、光电二极管和解调电路构成。耦合器的作用是将光信号耦合到光电二极管上。光电二极管是光接收机的主要部件,将光纤传来的已调光信号转变成相应的电信号,经放大后送入解调电路进行处理。解调器的设计依赖于系统的调制方式,它对光电二极管送来的信号进行处理,恢复出原来的电信号信息。

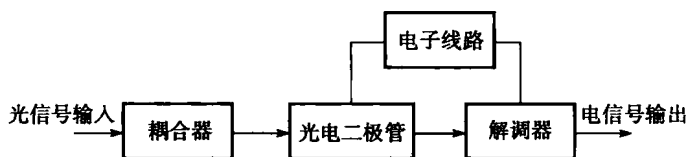


图 1.4 光接收机的结构

1.4 光纤通信系统相关基本概念

本节将介绍通信系统中普遍使用的几个基本概念。从描述模拟和数字信号开始,给出将模拟信号转换成数字信号的方法,然后讨论信道的复用,最后描述各种调制方式和信道容量。

1.4.1 模拟信号和数字信号

通信系统要传送的信号分模拟信号和数字信号。模拟信号就是信号强度随时间连续变化的信号,如:通过麦克风和摄像机将声音和图像信息转变成的连续变化的音频和视频信号;数字信号只取一些分离值,在二进制情况下只存在“1”,“0”码两种可能值。计算机数据信号就是典型的数字信号。

模拟信号可以通过一定的时间间隔进行采样后转变成数字信号。图 1.5 显示了这种变换方法。采样速率由模拟信号的带宽 Δf 决定,根据采样定理,只要采样频率 f_s 满足耐奎斯特准则: $f_s \geq 2\Delta f$, 带宽受限的信号完全可由一系列分离采样值来表示而不丢失任何信息。

采样后还需要通过编码量化成 $0 \leq A \leq A_{\max}$ 范围内的相应值,这里 $A_{\max}$ 是给定模拟信号的最大幅值。实际中通常用一定长度的二进制数对采样信号进行编码,并最终构成数字信号。

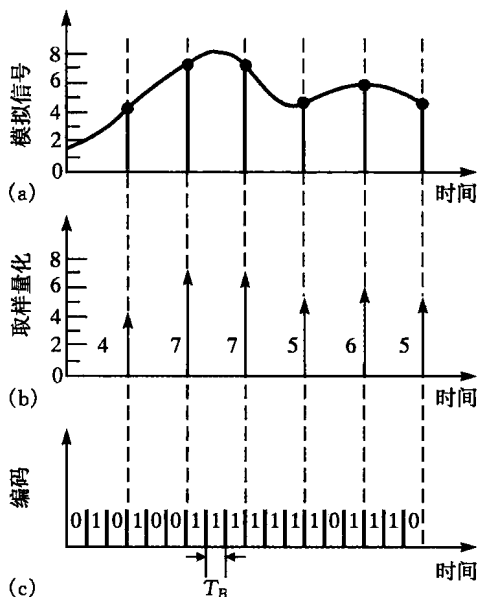


图 1.5 模拟信号转变成数字信号

1.4.2 信道复用

模拟信号和数字信号都具有一定的信号带宽,表征信号傅里叶变换后对应的频率范围。当采用数字信号表述该信号时信道带宽对应于一定的比特率 B ,也就是每秒钟传输的比特数: $B = 1/T_B$, T_B 称比特时间,是指每一字节的持续时间。数字音频信道大约 $B = 64 \text{ kbps}$,而大多数光纤通信系统能传送 100 Mbps 甚至 10 Tbps 的信号。为此常采用信道复用方法来充分利用光纤信道容量。信道复用的方式主要有时分复用(TDM)和频分复用(FDM)两种。

TDM 的不同信道数据交叉形成一个复合数据,例如, 64 kbps 单信道音频信号 $T_B = 15 \mu\text{s}$,如果采用 TDM 方法将 5 个这样的信道复合起来,相邻码之间仍有 $3 \mu\text{s}$ 的延迟。TDM 只适用于数字信号。

FDM 的信道在频域上分隔开来,每一信道采用不同载波频率,载波频率的间隔应大于信道的带宽以避免信道频谱重叠。FDM 对模拟和数字信号都适用。

FDM 在光域内称为波分复用(WDM)。WDM 在 20 世纪 90 年代中后期取得了巨大成功,并迅速商用化,是目前主流的光传输和复用技术。

1.4.3 调制方式

在光纤通信系统的设计中,首先要考虑如何将电信号转变成光信号。光纤通