

面向 21 世纪

高等学校信息工程专业系列教材

光 纤 通 信

Optical Fibre Communications

张宝富 崔敏 王海潼 编著

刘增基 主审

西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>



面向 21 世纪高等学校信息工程类专业系列教材

光 纤 通 信

Optical Fibre Communications

张宝富 崔 敏 王海潼 编著
刘增基 主审

西安电子科技大学出版社

2004

内 容 简 介

本书内容涉及光纤通信领域的多个方面,具体包括传输光纤、半导体光源和光检测器、无源光器件、光放大器、光纤通信系统的组成部件及系统设计、SDH 和 WDM 光网络的基本组成原理以及光纤通信用测试仪表的基本原理及测试方法等。

本书最大的特点是内容的选取兼顾了已被广泛使用的最具代表性的光纤通信技术和现代光纤通信的最新进展,同时所选内容以基本概念和原理为主,具有相对的稳定性,是进一步深入学习和掌握光纤通信新技术的基础。

本书是光纤通信的一本基础性教材,也是一本普及性读物。它可作为高等院校电子信息工程、通信工程、广播电视等相关专业的本科教材和有关光纤通信的自考、函授教材,也可作为光纤通信的教学训练和技术培训教材以及广大科技人员的自学用书。

* 本书配有电子教案,需要者可与西安电子科技大学出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信=Optical Fibre Communications/张宝富等编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2004.2

(面向 21 世纪高等学校信息工程类专业系列教材)

ISBN 7-5606-1334-9

I. 光… II. 张… III. 光纤通信-高等学校-教材 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 114813 号

策 划 马乐惠

责任编辑 阎 彬 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安万花印务有限责任公司

版 次 2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 16.75

字 数 392 千字

印 数 1~4000 册

定 价 18.00 元

ISBN 7-5606-1334-9/TN·0250(课)

XDUP 1605001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

序

第三次全国教育工作会议以来,我国高等教育得到空前规模的发展。经过高校布局和结构的调整,各个学校的新专业均有所增加,招生规模也迅速扩大。为了适应社会对“大专业、宽口径”人才的需求,各学校对专业进行了调整和合并,拓宽专业面,相应的教学计划、大纲也都有了较大的变化。特别是进入21世纪以来,信息产业发展迅速,技术更新加快。面对这样的发展形势,原有的计算机、信息工程两个专业的传统教材已很难适应高等教育的需要,作为教学改革的重要组成部分,教材的更新和建设迫在眉睫。为此,西安电子科技大学出版社聘请南京邮电学院、西安邮电学院、重庆邮电学院、吉林大学、杭州电子工业学院、桂林电子工业学院、北京信息工程学院、深圳大学、解放军电子工程学院等10余所国内电子信息类专业知名院校长期在教学科研第一线工作的专家教授,组成了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材编审专家委员会,并且面向全国进行系列教材编写招标。该委员会依据教育部有关文件及规定对这两大类专业教学计划和课程大纲,对目前本科教育的发展变化和相应系列教材应具有的特色和定位以及如何适应各类院校的教学需求等进行了反复研究、充分讨论,并对投标教材进行了认真评审,筛选并确定了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材的作者及审稿人。这套教材预计在2004年春季全部出齐。

审定并组织出版这套教材的基本指导思想是力求精品、力求创新、好中选优、以质取胜。教材内容要反映21世纪信息科学技术的发展,体现专业课内容更新快的要求;编写上要具有一定的弹性和可调性,以适合多数学校使用;体系上要有所创新,突出工程技术型人才培养的特点,面向国民经济对工程技术人才的需求,强调培养学生较系统地掌握本学科专业必需的基础知识和基本理论,有较强的本专业的基本技能、方法和相关知识,培养学生具有从事实际工程的研发能力。在作者的遴选上,强调作者应在教学、科研第一线长期工作,有较高的学术水平和丰富的教材编写经验;教材在体系和篇幅上符合各学校的教学计划要求。

相信这套精心策划、精心编审、精心出版的系列教材会成为精品教材,得到各院校的认可,对于新世纪高等学校教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

系列教材编委会

2002年8月

高等学校计算机、信息工程类专业

系列教材编审专家委员会

主 任：杨 震（南京邮电学院副院长、教授）

副主任：张德民（重庆邮电学院通信与信息工程学院院长、教授）

韩俊刚（西安邮电学院计算机系主任、教授）

李荣才（西安电子科技大学出版社总编辑、教授）

计算机组

组 长：韩俊刚（兼）

成 员：（按姓氏笔画排列）

王小民（深圳大学信息工程学院计算机系主任、副教授）

王小华（杭州电子工业学院计算机分院副院长、副教授）

孙力娟（南京邮电学院计算机系副主任、副教授）

李秉智（重庆邮电学院计算机学院院长、教授）

孟庆昌（北京信息工程学院教授）

周 娅（桂林电子工业学院计算机系副主任、副教授）

张长海（吉林大学计算机科学与技术学院副院长、教授）

信息工程组

组 长：张德民（兼）

成 员：（按姓氏笔画排列）

方 强（西安邮电学院电信系主任、教授）

王 晖（深圳大学信息工程学院电子工程系主任、副教授）

胡建萍（杭州电子工业学院电子信息分院副院长、副教授）

徐 祎（解放军电子工程学院电子技术教研室主任、副教授）

唐 宁（桂林电子工业学院通信与信息工程系副主任、副教授）

章坚武（杭州电子工业学院通信工程分院副院长、教授）

康 健（吉林大学通信工程学院副院长、教授）

蒋国平（南京邮电学院电子工程系副主任、副教授）

总 策 划：梁家新

策 划：马乐惠 云立实 马武装 马晓娟

电子教案：马武装

前 言

光纤俗称玻璃纤维,是由高纯度的玻璃棒经拉丝工艺制成的,它以其优良的传输特性已经成为信息社会最主要的信息传输手段。光纤到小区、光纤到办公桌、光纤布线、光纤网络等应用已遍布全球,这表明光纤通信已成为现代通信技术的主要支柱之一。越来越多的院校师生和科技人员由于学习和工作的需要或是自己的兴趣,需要了解和掌握光纤通信技术及其应用。为了使读者学习并掌握该技术,我们在多年教学和科研工作的基础上编写了这本书。

本书是光纤通信的一本基础性教材,也是一本普及性读物。它重点介绍光纤通信的基本原理,内容的选取兼顾了已被广泛使用的最具代表性的光纤通信技术和现代光纤通信的最新进展,同时所选内容具有相对的稳定性,是进一步深入学习和掌握光纤通信新技术的基础。其内容涉及光纤通信的理想传输介质——光纤、采用的理想半导体光源、光纤通信系统的组成部件及系统设计、SDH和WDM以及光放大器的基本原理、光纤通信常用测试仪表的基本原理及测试等。

本书的内容共分9章。第1章:概述,介绍了光通信的概念、光信号的频谱、光纤通信的优点及光波技术基础。第2章:光纤,介绍了光纤与光缆的结构与简单的工艺,光纤传输特性,光纤中的光学现象。第3章:光源与光检测器,介绍了半导体激光器与光检测器的工作原理。第4章:无源光器件,介绍了构成光纤通信系统的无源光器件,如光纤连接器、波分复用器、光开关、光滤波器等。第5章:光放大器,介绍了光放大器的基本工作原理。第6章:光发送机与光接收机,介绍了光发送机(调制)与光接收机(解调)的工作原理。第7章:光纤通信系统及设计,介绍了两种典型系统——IM-DD与WDM+EDFA的设计考虑及设计举例。第8章:SDH与WDM光网络,介绍了SDH与WDM的组网原理、网络保护及网络管理等。第9章:光纤通信常用仪表及测试,介绍了常用光纤通信仪表,如光功率计、光衰减器、波长测试仪、OTDR、光谱分析仪等的工作原理及测试。

实验课程和相应的实验设施可以大大增强读者对光纤通信技术的理解。为了该课程的教学,作者经过多年潜心研究,研制了“光纤通信教学实验系统”并已经在许多院校的光纤通信教学中使用,收到了良好的教学效果。有需要者可与作者联系。

本书可作为电子信息工程、通信工程、广播电视等相关专业的本科教材和有关光纤通信的自考、函授教材,也可作为光纤通信的教学训练和技术培训教材以及广大科技人员的参考用书。

本书由张宝富、崔敏和王海潼合作编写。张宝富和王海潼编写了第1~6章,崔敏编写了第7~9章。由于光纤通信原理是一门理论性很强的课,因此作者在编写时力求理论叙述通俗易懂,概念定义清晰,尽量避免繁琐的公式推导,注重结论的物理含义、原理与实际应用的结合。

因作者水平有限,书中难免存在不足之处,欢迎读者批评指正。作者电子邮箱:zhangbaofu@163.com。

作 者
2003.10

目 录

第 1 章 概述	1	2.7 光纤模式	30
1.1 光通信的基本概念	1	2.7.1 模的概念	30
1.1.1 光波的电磁频谱	1	2.7.2 多模光纤中的模式数目	31
1.1.2 激光器产生的理想光载波	2	2.7.3 单模光纤的传播模	32
1.1.3 大气光通信	3	2.7.4 偏振模	32
1.1.4 理想的光波传输介质——光纤	3	2.8 光纤的模式色散	32
1.2 光纤通信的优点	4	2.8.1 模间时延差	32
1.3 光纤通信的系统组成	6	2.8.2 模间色散的减少	33
1.4 光纤通信的回顾与展望	7	2.8.3 多模光纤的最大比特率	33
1.4.1 长波长激光器	8	2.9 单模光纤的波长色散或色度色散	34
1.4.2 单模光纤	8	2.9.1 相速	34
1.4.3 SDH 传输体制	8	2.9.2 群速	34
1.4.4 光放大器	10	2.9.3 材料色散	35
1.4.5 WDM 复用技术	10	2.9.4 波导色散	35
1.4.6 全光网络	12	2.9.5 色散补偿	35
1.5 光波技术基础	13	2.10 光纤的损耗	36
1.5.1 光的波粒二象性	13	2.10.1 损耗系数	36
1.5.2 光与物质的相互作用	15	2.10.2 光纤可用频谱	36
1.5.3 电介质的极化	16	2.11 单模光纤	37
1.5.4 光波的传播特性	17	2.11.1 模场直径	37
习题一	19	2.11.2 单模光纤的分类及折射率剖面	38
第 2 章 光纤	20	2.12 光纤的非线性效应	40
2.1 光纤与光缆	20	2.12.1 自相位调制 SPM	41
2.1.1 光纤的结构	20	2.12.2 四波混频 FWM	41
2.1.2 光纤的主要成分	21	2.12.3 受激布里渊散射 SBS	41
2.1.3 光纤的制造工艺简介	21	2.12.4 受激拉曼散射 SRS	42
2.1.4 光缆的技术要求	22	2.13 光孤子的定性描述	42
2.1.5 光缆的结构	23	习题二	42
2.1.6 常用光缆的典型结构	23	第 3 章 光源与光检测器	44
2.2 光纤的折射率分布	25	3.1 半导体 LD 的工作原理	45
2.3 光在光纤中的几何传输	26	3.1.1 光放大	45
2.3.1 反射和折射	26	3.1.2 F-P 腔半导体激光器	48
2.3.2 全反射定律	26	3.2 输出光功率及光源与光纤的耦合	49
2.4 光纤的数值孔径 NA	27	3.2.1 阈值特性	49
2.5 光的波动性	28	3.2.2 注入电流(I)与光功率(P)	
2.6 光纤介质的特性	29	响应特性	49

2014/11/02

3.2.3 光源与光纤的耦合	50
3.3 LD 的输出光谱	52
3.3.1 多纵模 LD	52
3.3.2 单纵模 LD	53
3.4 LD 的调制响应	53
3.5 LD 的温度特性与自动温度 控制(ATC)	55
3.6 LD 的输出光功率稳定性与自动 功率控制(APC)	56
3.7 DFB 和 DBR 激光器	58
3.8 调谐激光器	59
3.8.1 外腔调谐激光器	60
3.8.2 双电极半导体激光器	60
3.9 其他类型的激光器	60
3.9.1 垂直腔面发光激光器(VCSELs) ..	60
3.9.2 锁模激光器	61
3.9.3 量子阱(QW)激光器	62
3.9.4 多波长激光器阵列	63
3.10 激光器组件	63
3.11 半导体 LED	64
3.11.1 LED 的结构	64
3.11.2 LED 的特性	66
3.12 光检测器	67
3.12.1 波长响应	68
3.12.2 光电转换效率与响应度	68
3.12.3 响应速度	70
3.12.4 噪声	70
3.13 PIN	71
3.14 APD	72
3.14.1 APD 的结构	72
3.14.2 雪崩增益	73
习题三	74

第 4 章 无源光器件

4.1 光纤连接器	75
4.1.1 光纤连接损耗	75
4.1.2 光纤连接方法	76
4.1.3 常用的几种连接器	78
4.2 光纤耦合器	79
4.3 光开关	81
4.3.1 光开关的性能参数	81
4.3.2 主要的几种光开关	82
4.4 光纤光栅	84

4.4.1 光纤光栅的结构	84
4.4.2 布拉格光纤光栅 BFG	85
4.4.3 长周期光纤光栅 LFG	85
4.5 光滤波器	85
4.5.1 F-P 腔型滤波器	85
4.5.2 M-Z 干涉滤波器	87
4.5.3 阵列波导光栅(AWG)	88
4.5.4 声光可调滤波器(AOTF)	89
4.5.5 光纤光栅滤波器	91
4.6 WDM 合波/分波器	92
4.6.1 多层介质薄膜 MDTFF	92
4.6.2 熔锥型	93
4.6.3 光纤光栅型	93
4.7 光隔离器与光环行器	94
4.8 光锁相环与非线性光环境 NLOM	95
习题四	96

第 5 章 光放大器

5.1 引言	97
5.2 掺铒光纤放大器 EDFA	98
5.2.1 EDFA 的放大原理	98
5.2.2 EDFA 的组成结构	99
5.2.3 EDFA 的增益与带宽	101
5.2.4 EDFA 的噪声类型	101
5.3 受激拉曼光纤放大器 SRA	102
5.3.1 SRA 的放大原理	102
5.3.2 SRA 的性能与应用	104
5.4 受激布里渊光纤放大器 SBA	104
5.4.1 SBA 的放大原理	104
5.4.2 SBA 的性能与应用	105
5.5 其他光纤放大器	105
5.6 半导体光放大器 SOA	106
5.6.1 SOA 的放大原理	107
5.6.2 SOA 的性能与应用	108
5.7 光放大器的应用	108
5.8 光纤激光器	109
5.8.1 掺铒光纤激光器	110
5.8.2 光纤光栅激光器	110
5.8.3 光纤受激拉曼和受激布里渊 激光器	111
5.9 光波长变换器	111
5.9.1 半导体光放大器(SOA)中的交叉 增益调制(XGM)技术	112

5.9.2 半导体光放大器中的交叉相位调制(XPM)技术	112	7.3.2 PDH 与 SDH 传输体制	143
5.9.3 半导体光放大器中的四波混频(FWM)技术	113	7.3.3 误码特性和抖动特性	145
习题五	114	7.4 IM-DD 数字光纤通信系统设计	149
第 6 章 光发送机与光接收机	115	7.4.1 总体设计考虑	149
6.1 调制信号的格式	115	7.4.2 设计方法	151
6.1.1 单极性与双极性	115	7.5 WDM+EDFA 数字光纤链路设计	156
6.1.2 归零(RZ)与不归零(NRZ)	116	7.5.1 总体设计考虑	156
6.1.3 扰码	117	7.5.2 波长分配与通道间隔	159
6.1.4 线路码(4B/5B、8B/10B)	117	7.5.3 WDM 系统设计与性能	160
6.2 直接调制 IM 光发送机	117	习题七	164
6.2.1 模拟调制	118	第 8 章 SDH 与 WDM 光网络	166
6.2.2 数字调制	118	8.1 SDH 光同步传送网	166
6.3 外调制	119	8.1.1 SDH 的标准光接口	166
6.3.1 电折射调制器	119	8.1.2 SDH 的速率体系	171
6.3.2 M-Z 型调制器	119	8.1.3 SDH 的帧结构	172
6.3.3 声光布喇格调制器	120	8.1.4 SDH 的复用结构与原理	174
6.3.4 电吸收 MQW 调制器	121	8.1.5 SDH 设备	177
6.3.5 ASK/PSK/FSK 方式	121	8.1.6 SDH 的传送网结构与自愈	186
6.4 光接收机	122	8.1.7 SDH 的网管功能	199
6.4.1 理想的数字光接收机	122	8.2 WDM 光网络	204
6.4.2 实际的光接收机	122	8.2.1 光传送网的分层结构	204
6.4.3 前置放大器噪声	124	8.2.2 WDM 广播选择网	204
6.4.4 APD 噪声	124	8.2.3 WDM 波长选路网 WRN	207
6.4.5 光放大器噪声	124	8.2.4 WRN 的选路算法	209
6.4.6 误码率	125	8.2.5 WDM 的网管	211
6.5 相干接收	129	8.3 其他类型的光网络	213
习题六	133	8.3.1 光纤以太网	213
第 7 章 光纤通信系统及设计	134	8.3.2 无源光网络 PON	217
7.1 模拟光纤传输系统概述	134	8.3.3 HFC 混合光纤同轴网	220
7.1.1 系统构成	134	8.3.4 光因特网(IP over WDM)	222
7.1.2 模拟调制技术	135	习题八	225
7.1.3 主要的噪声和信噪比	135	第 9 章 光纤通信常用仪表及测试	227
7.2 典型的模拟光纤通信系统	136	9.1 引言	227
7.2.1 基带直接强度调制	136	9.2 光纤测试以及光时域反射仪 OTDR	228
7.2.2 多信道传输	137	9.2.1 光纤测试参数	228
7.2.3 VSB-AM/FM 调制传输	138	9.2.2 光纤损耗和色散测试	228
7.2.4 微波 SCM 多路传输	140	9.2.3 光时域反射仪 OTDR	234
7.3 数字光纤通信系统	141	9.3 光功率计与光端机的测试	235
7.3.1 系统构成	141	9.3.1 光功率计	235
		9.3.2 光端机的测试	236

9.4 光纤通信系统测试	243	9.6.2 光谱分析仪(OSA)及应用	250
9.4.1 误码性能及测试	243	9.7 光衰减器及应用	254
9.4.2 抖动性能及测试	244	9.8 网络分析仪及应用	255
9.5 误码测试仪与其他常用仪表	248	习题九	256
9.6 波长计、光谱分析仪 OSA 及应用	249	参考文献	258
9.6.1 波长计	249		

第 1 章 概 述

早在三千多年前,我国的周朝就有利用烽火台的火光传递信息的通信,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。1880 年,贝尔发明了光电话,利用光载波信号来传送话音。受当时技术条件的限制,这种光电话没有真正的使用价值,但贝尔仍然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。沉寂了近一个世纪后,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源(高频率、高输出功率、高的信号承载能力),使光纤通信的发展在实用化的道路上向前迈了一大步。1970 年,低损耗光纤(20 dB/km)由美国康宁(Corning)公司研制成功,为光通信找到了一个优良的传输介质,又使光纤通信在实用化的道路上向前迈进了一大步,从此便进入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期,它给通信领域带来了革命性的变革,并成为本世纪最伟大的技术成就之一。

本章首先阐明了光通信、光纤通信的基本概念及光纤通信与电缆通信相比所具有的优点,然后简要介绍了光纤通信的发展现状以及对未来的展望,最后介绍了学习光纤通信所需的光波基础知识,对于没有学过光波理论的读者是一个很好的补充。

1.1 光通信的基本概念

光通信是利用光波来传送信息的。光波的频率比目前电通信使用的频率高得多,因而其通信容量很大。

通信系统的通信容量与系统的带宽成正比。为了比较方便,通常系统的带宽用载频的百分比,即带宽利用系数来表示。例如,一个载波频率为 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 10 GHz 的微波通信系统,若带宽利用率仍为 10%,则系统带宽为 1 GHz。光波的频率一般在 $1 \times 10^{14} \sim 4 \times 10^{14}$ Hz 范围内,在带宽利用率仍为 10%的情况下,系统的利用带宽在 10 000~40 000 GHz 范围内,这是电通信无法比拟的。

1.1.1 光波的电磁频谱

光波实际上是一高频的电磁波。在讨论高频电磁波时,我们习惯采用波长来代替频率描述。波长与频率的关系为

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

其中: λ 为电磁波的波长,其物理含义是电磁波在时间上变化一周,其波前在空间变化一

周所行进的长度； c 为光波在自由空间中传播的速度，其值为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ； f 为电磁波的频率，其物理含义是交变电磁波在单位时间（每秒）变化的周期数。

对于光波来说，波长常用单位有微米 μm ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$)、纳米 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)、埃 $\text{\AA}$ ($1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$)。

图 1.1 给出了光波在电磁波频谱中的大体位置分布（注意：通常将频率为 1 GHz 以上的无线电波称为微波）。光波的频率一般可达到 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ Hz}$ ，对应的波长在 $10 \sim 100\,000 \text{ nm}$ 之间。可进一步将光波细分为红外线、可见光和紫外线。

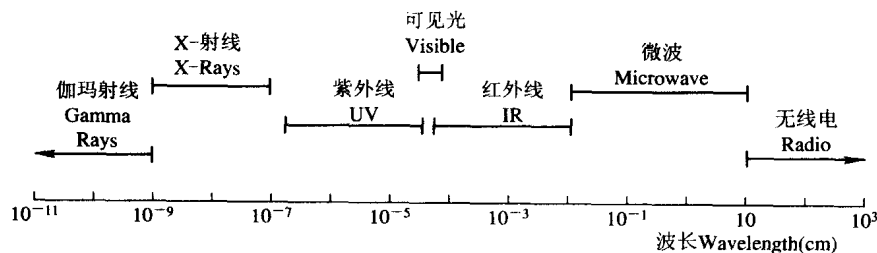


图 1.1 电磁波频谱图

红外线（波长 $> 0.76 \mu\text{m}$ ）：这一波段的波长比人眼实际可见的光的波长要长得多，可细分为近红外（波长为 $0.76 \sim 15 \mu\text{m}$ ）、中红外（波长为 $15 \sim 25 \mu\text{m}$ ）和远红外（波长为 $25 \sim 300 \mu\text{m}$ ）。这一波段的信号主要用于光波通信、红外制导、电子摄像及天文学。

可见光（波长位于 $0.39 \sim 0.76 \mu\text{m}$ ）：这一波段就是人眼实际可见的波长，像自然光源（如太阳光）和白炽灯、日光灯以及许多激光源（如 He-Ne 激光器）等装饰性的人造光源，它们发出的光都是人眼可见的可见光。

紫外线（波长 $< 0.39 \mu\text{m}$ ）：这一波段的波长比人眼实际可见的光的波长要短得多，这一波段的信号很少应用于通信。

目前光通信所使用的光波波长大约为 $1 \mu\text{m}$ ，主要位于近红外波段。通常将小于 $1 \mu\text{m}$ 的红外波长称为短波长，将大于 $1 \mu\text{m}$ 的红外波长称为长波长。

1.1.2 激光器产生的理想光载波

早期的光通信，如用烽火台的火光传递简短的消息，贝尔的光电话利用太阳光来传递话音信号，它们所传送信息的容量小、距离短、可靠性低、设备笨重，究其原因这是由于采用了太阳光等普通光源。

1960 年 7 月 8 日，美国科学家梅曼 (Maiman) 发明了世界上第一台红宝石激光器。激光器发出的激光与普通光源发出的光相比，其光束的强度极高，方向性极好，光谱的范围小，相位和频率一致性好，其特性与无线电波类似，是一种理想的通信载波，可用来携带信息进行长距离传输。因此激光器的出现使得光通信进入了一个崭新的阶段。

激光一词是从英文 LASER 翻译过来的，而 LASER 一词是由英文 “Light Amplification by Stimulated Emission Radiation” 中的首字母构成的，其含义是受激辐射光放大。由于其频率很高，可极大地提高通信容量，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应用。继红宝石激光器问世后，各种不同材料的激光器相继出现，如氦-氖激光

器、二氧化碳激光器、氩离子激光器和半导体激光器等。

1.1.3 大气光通信

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。由于发射功率很大,因此那时所需的激光器的体积相对较大,相应的设备较笨重。近年来大功率半导体激光器的研制成功,使得大气激光通信在实用化的道路上迈出了一大步。目前,大气激光通信(由于光通信使用的光源无一例外地都采用激光器,因而光通信实际上就是激光通信)在民用和军事通信中都具有重要作用,为建立全天候、具有高机动性和高灵活性、工作稳定可靠的信息平台开辟了广阔前景。这主要是由于它具有如下优点:

(1) 具有安装便捷、使用方便的特点,很适合于在特殊地形、地貌及有线通信难以实现和机动性要求较高的场所工作。

(2) 具有不挤占宝贵的无线电频率资源、电磁兼容性好、抗强电磁干扰能力强、保密性好等特点。当然其有效通信距离和带宽有待进一步提高。

(3) 跟微波、毫米波通信相比,半导体激光通信系统在价格上也有较强的竞争优势,是一种易于被市场和用户接受的通信手段。

(4) 它是组建各种室内、室外局域网和最后 1000 m 接入的有效手段。因为它的合理应用,会使蜂窝网中宝贵的频率资源得到更加充分的利用,所以它对于城市中移动电话蜂窝网的建设和发展有着不可低估的价值。

(5) 它是未来实现卫星之间通信的有效手段,因此,在构筑外层空间通信网上,半导体激光自由空间通信将发挥重要的作用。

(6) 由于它利用极窄的激光束作为载波,传播的发散角非常小,不易捕获,保密性好,因此具有很好的军事应用前景。

虽然大气光通信与其他无线通信相比,具有如上的优点,但是由于它以大气作为光波的传输介质,因而存在致命的缺点,目前远未得到应有的发展和推广应用。大气光通信主要存在以下的技术问题:

(1) 大气信道衰减随机变化量大(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),需要补偿。

(2) 大气湍流现象(因大气中各处的密度和温度不同而引起的)使介质折射率发生不均匀的随机变化,其结果是使接收光斑发生所谓的闪烁现象和漂移现象。

(3) 需要功耗小,转换效率高,激光输出功率大,调制带宽及伺服系统简单的激光发射器件。

(4) 需要灵敏度高,噪声特性好,适合于常温环境下工作的接收器件。

(5) 需要体积小,重量轻,光学特性好,便于安装、调整校准的光学收发天线。

(6) 需要背景噪声的滤除技术。

(7) 在机动性要求高和工作平台方位稳定性差的场合应用时需要自动跟踪瞄准。

1.1.4 理想的光波传输介质——光纤

大气光通信虽然在机动性、灵活性方面具有优势,适合于大气层视距范围、星际之间、

水下等特殊场合的通信,但用于长距离的陆地和海底通信显然不理想。然而光通信的许多优点驱使人们进一步探索光波新的传输介质。

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地下,如在金属或水泥管道内每隔一段距离安放一个反射镜,通过反射镜的反射使光波限制在管道内向前传输,如图 1.2 所示。这种方法虽然克服了大气对激光束的影响,但需要摆放许多反射镜,给实际的施工、维护带来诸多不便,而且每反射一次,光能就损耗一次,经过多次反射之后光能迅速降低,传输距离受到限制。与之类似的方法还有将反射镜换成透镜,这些方法虽然理论上是可行的,但无实际的应用价值。由于光通信在地上(大气光通信)和地下(反射镜传送)都不能理想地传送光波,因而其发展由于传输介质问题而出现了低潮。正在许多人对光通信的前途表示担忧时,英国标准远程通信实验室的英籍华人高锟博士(K. C. Kao)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,光也可以沿着可以导光的玻璃纤维,即光导纤维传输。光导纤维一词由英国的 Kapany 在 1956 年首次提出,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在医学领域中应用极广的柔性纤维镜(如胃镜)的发展。

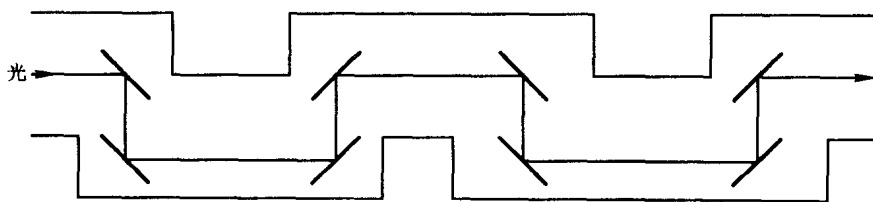


图 1.2 利用反射镜传送光束

20 世纪 60 年代,光导纤维的损耗很大,大于 1000 dB/km ,使得光通信的传输距离限制在短距离内。1970 年,纽约康宁(Corning)玻璃厂的 Kapron、Keck 和 Maurer 发明了一种低损耗光纤,其损耗小于 20 dB/km ,这是光通信系统在实际应用中的又一大突破。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。光导纤维简称称为光纤。自 1970 年以后,光纤技术以指数规律快速向前发展。1974 年,贝尔实验室发明了制造低损耗光纤的方法(称为化学气相沉积法 MCVD),并成功研制出了损耗为 1 dB/km 的光纤。1976 年,日本电话电报公司研制出更低损耗的光纤,损耗下降为 0.5 dB/km 。20 世纪 80 年代后期,光纤损耗降低到了 0.16 dB/km 。

1.2 光纤通信的优点

就在对光纤损耗的研究获得巨大突破的同时,美国贝尔实验室于 1970 年研制成功了可在室温连续工作的半导体激光器。与气体、液体、固体、离子等激光器相比,半导体激光器体积小,耗电少,通过改变注入电流可方便地实现对信号的调制,具有寿命长、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障碍——没有良好的激光源和理想的传输介质,都得到了圆满的解决。此后各种各样的光纤通信系统如雨后春笋般地发

展起来。

1976年,在美国亚特兰大成功进行了速率为44.7 Mb/s的光纤通信系统实验。

1977年,美国芝加哥电话局进行了速率为44.7 Mb/s的光纤通信系统现场试验。

1978年,日本进行了速率为100 Mb/s的光纤通信系统现场试验。

1980年,日本进行了速率为400 Mb/s的光纤通信系统现场试验。

1989年,ITU-T(国际电信联盟电信委员会)制定了155 Mb/s、622 Mb/s、2.5 Gb/s等SDH速率标准。现在,10 Gb/s系统也已商用化。

自1982年以后,光纤通信迅速发展,促进了光纤的应用和产业化,光纤的需求量呈指数规律上升。无论是在陆地,还是在海底都敷设了光纤,光纤甚至已经延伸到了我们的办公桌和家中。光纤之所以在世界各国的各个领域得到广泛的应用,成为高质量信息传输的主要手段,是因为光纤与传统的金属同轴电缆相比,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,使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,使传输频率、带宽以及信息承载能力受到限制。现代光纤通信系统能够将速率为几十Gb/s以上的信息传输上百英里,允许大约数百万条话音和数据信道同时在一根光缆中传输。实验室内,传输速率达Tb/s级的系统现已研制成功。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。光纤系统仅需要少量的中继器,而光缆与金属电缆的造价基本相同,少量的中继器使光纤通信系统的总成本比相应的金属电缆通信系统的要低。

(3) 抗电磁干扰。光纤通信系统避免了电缆间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金属导体向外泄漏电磁波。由于光纤的材料是玻璃或塑料,都不导电,因而不会产生电磁波的泄漏,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),外部的电噪声也不会影响光波的传输能力。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下(电磁脉冲干扰)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,而且腐蚀性的液体或气体对其影响较小。

(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,而且它占用的存储空间小,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。这也是光纤通信系统对军事应用具有吸引力的又一个方面。

(8) 寿命长。尽管还没有得到证实,但可以断言,光纤通信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。

当然光纤系统也存在一些不足:

(1) 接口昂贵。在实际使用中,需要昂贵的接口器件将光纤接到标准的电子设备上。

(2) 强度差。光缆本身与同轴电缆相比抗拉强度要低得多。这可以通过使用标准的光纤包层 PVC 得到改善。

(3) 不能传送电力。有时需要为远处的接口或再生的设备提供电能，光缆显然不能胜任，在光缆系统中还必须额外使用金属电缆。

(4) 需要专用的工具、设备以及培训。需要使用专用工具完成光纤的焊接以及维修；需要专用测试设备进行常规测量；光缆的维修既复杂又昂贵，从事光缆工作的技术人员需要通过相应的技术培训并掌握一定的专业技能。

(5) 未经受长时间的检验。光纤通信系统的普及时间不太长，还没有足够的时间证实它的可靠性。

1.3 光纤通信的系统组成

光纤通信系统链路的简化框图如图 1.3 所示。通信链路中最基本的三个组成部分是光发射机、光接收机和光纤链路。光发射机由模拟或数字电接口、电压—电流驱动、光源和光源与光纤之间的耦合接口等组成。光纤是高纯度的玻璃或塑料光纤，长距离大容量的光纤链路普遍采用玻璃光纤，对于低速率短距离的传输系统可以采用塑料光纤。光接收机包括光纤与光检波器之间的耦合器件、光检测器、电流—电压转换器、放大器和模拟或数字接口等。

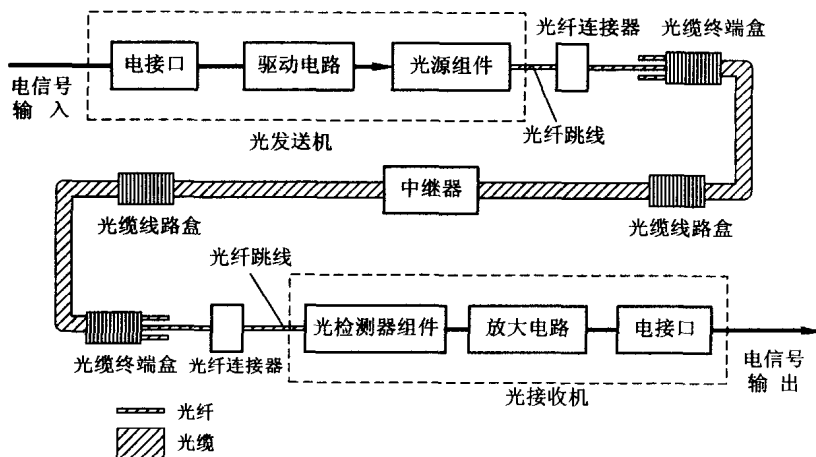


图 1.3 光纤通信系统链路的框图

在光发射机中，光源可由数字信号或模拟信号调制。对于模拟调制，输入接口要求阻抗匹配并限制输入信号的振幅；对于数字调制，信号源已经是数字形式了，若信号为模拟信号，则应先转变成数字脉冲流，此时输入接口应包含模数转换器。

电压—电流驱动是输入电路与光源间的电接口。发射机中的光源是半导体发光二极管(LED)或注入式半导体激光二极管(ILD)，简称LD。这两种二极管的光功率与驱动电流成正比。因此，电压—电流驱动电路是用来将输入信号的电压转换为电流以驱动光源的。

光源—光纤耦合器是一种机械式接口,它的作用是把光源发出的光耦合到光纤或光缆中,光缆由玻璃或塑料纤维光纤、金属包层和外套管组成。光纤—光检波器的耦合器件也是一种机械接口,其作用是把光缆中的光尽可能多地耦合到光检测器中。目前在实际的系统中,都是将光源、光源与光纤的接口和一段光纤封装在一起,形成光源组件。这样就增加了系统的可靠性。这一小段光纤常称为尾纤或光纤跳线。同样,将光纤、光纤与光检测器之间的接口和光检测器封装在一起,就形成光检测器组件。

光检测器常用的有光电二极管(PIN)和雪崩光电二极管(APD),二者都能将光能转化为电流,然后再通过电流—电压转换器变成输出电压信号。

光接收机输出端的模拟或数字接口是一种电接口。该接口对输出电路起阻抗匹配和信号电平匹配的作用。

光纤链路由光纤光缆、光纤光缆线路(接续)盒、中继器等构成。光缆可以架空铺设(敷设),也可以铺设在管道内,或直埋于地下,或铺设于海底。由于制造、铺设等原因,光缆生产厂家生产的光缆一般为2 km一盘,因而如果光发送与光接收之间的距离超过2 km时,每隔2 km将需要用光缆线路盒将光缆连接起来。光缆线路盒一般置于户外,因而要注意防潮、防腐等措施。光缆终端盒主要用于将光缆从户外引入到室内,将光缆中的光纤从光缆中分出来,一般放置在光设备机房内。光纤连接器主要用于将光发送机或光接收机与光缆终端盒分出的光纤连接起来,即连接光纤跳线与光缆中的光纤。

中继器主要用于补偿信号由于长距离传送所损失的能量。由于光纤的损耗和带宽限制了光波的传输距离,因此当光纤通信线路很长时,则要求每隔一定的距离加入一个中继器,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,因此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,2.5 Gb/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的几倍,这就可以减少光纤通信线路的中继器数目,从而提高光纤通信的可靠性和经济效益。

从光纤通信的意义来说,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,而且因反复的光—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,将光波直接放大已成为现实。现已研制成功各种类型的光放大器,它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并继续向前传输,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)已在实际的光纤通信系统中被广泛使用。

1.4 光纤通信的回顾与展望

自1976年光纤通信开始实用化以来,其通信容量以每4年增加10倍的速度发展。之所以发展如此之快,是由于以下几项支撑技术的进步。