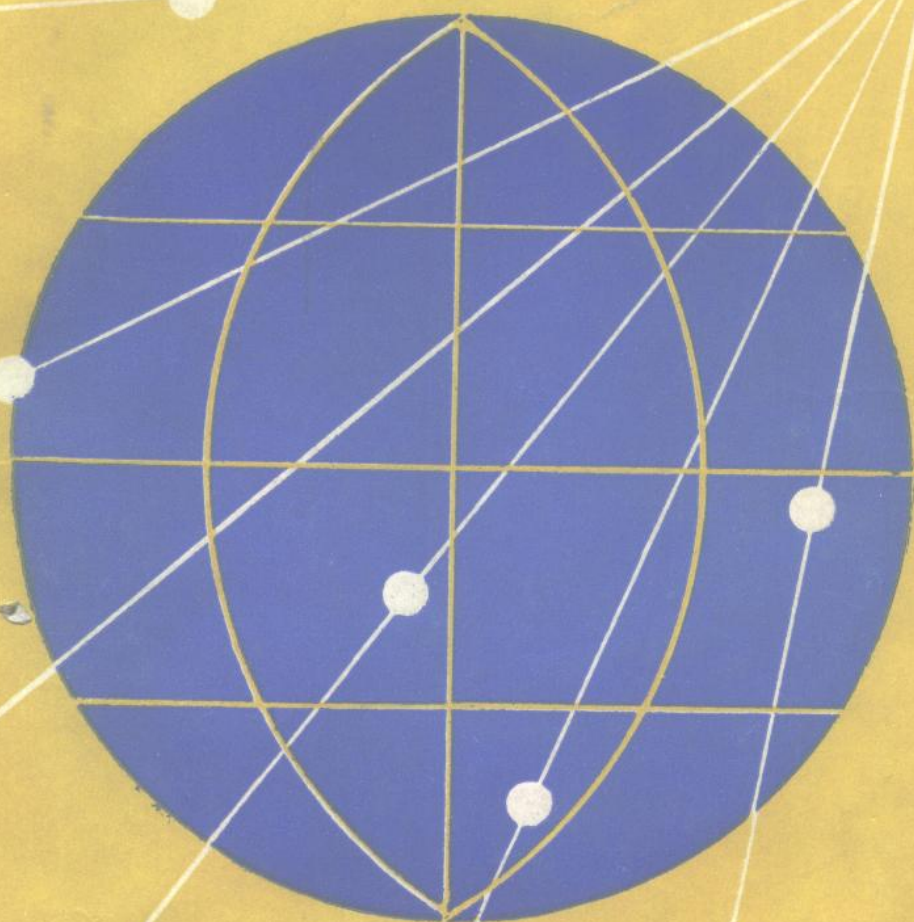


○ 陆自南 编著

○ 上海交通大学出版社

通信系统



TONG XIN XI TONG

73.4
599

通信系统

陆自南 编

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书重点阐述了近代通信的三种重要方式——短波单边带通信、卫星通信和光纤通信。此外,对其他通信方式也作了适当介绍。全书共分四篇:第一篇介绍光纤通信(光纤、光器件、光纤通信系统及测试方法等);第二篇介绍短波单边带通信(单边带通信的基本概念、系统组成、性能指标、方案选择、短波数据传输及其计算机模拟等);第三篇介绍卫星通信(卫星通信的基本概念、多址接入方式、通信线路设计和地面站设备等);第四篇介绍微波通信及其他通信方式(微波接力通信、散射通信和网通信等)。

本书附有大量复习题及若干实验,有利于自学,以及实践环节的培养。

本书内容丰富,资料充实,叙述深入浅出,可作大专院校通信系统课程的教材和参考书,亦可作为自学教材及有关工程技术人员的参考书。

007/33

通信系统

出版:上海交通大学出版社

(淮海中路1984弄19号)

发 行:新华书店上海发行所

印 刷:上海交通大学印刷厂

开 本:787×1092(毫米)1/16

印 张:32.25

字 数:792000

版 次:1989年5月第1版

印 次:1989年6月第1次

印 数:1—1700

科 目:188—245

ISBN7-313-00374-9/TN·913

定 价:6.30 元

上海交通大学出版社

前 言

本书由我校本科生油印教材“通信系统”修改而成，它总结了多年的教学经验和有关的科研成果。编写本书的目的主要为了满足大学本科教学的需要，同时也为了便于广大读者了解通信技术在各种通信系统中的应用。本书重点阐述了近代通信中的三种重要方式——短波单边带通信、卫星通信和光纤通信。此外，对其他通信方式也作了适当介绍。

全书共分四篇：第一篇主要介绍光纤通信，重点阐述了光纤、光器件、光纤通信系统的基本原理；第二篇主要介绍短波通信的特点及其计算机模拟、单边带通信的基本概念、系统组成、性能指标、方案选择、短波数字传输的问题等；第三篇主要介绍卫星通信，重点阐述了卫星通信的基本概念、多址联接方式、通信线路设计和地面站设备等；第四篇简要介绍微波接力通信、散射通信、网通信等。

为了适应现代通信技术的迅速发展，上海交通大学电子工程系先后开出《短波通信》、《卫星通信》、《光纤通信》等课程。为了使通信专业的本科生能建立各种通信系统的整体观念，又较早开出《通信系统》课程。本课程不可能全面而具体地讨论各种通信系统的问题，只能采用点面结合的方法，主要内容作重点介绍，次要内容作适当介绍。为配合自学和复习，每章后附有复习题，并附有若干实验，以利于课堂教学与自学相结合，理论与实践相结合。

本书经作者多次讲授，又结合科研实践反复修改。由于该书内容丰富、深入浅出、通俗易懂，不仅可作为高等学校电子类无线电技术、通信专业的教材，而且适用于工厂和研究所从事通信工作的有关工程技术人员参考，也可作为业余高等学校电子类无线电技术、通信专业的教材及大专院校无线电技术、通信专业的毕业实习的教学参考书。

由于编者水平有限，书中难免有缺点与错误，请读者批评指正。

编者 1987年6月

目 录

结论	(1)
通信系统概述	(1)
通信系统的模型及基本参数	(2)
无线电波的传播方式	(3)
光纤通信	(4)
复习题	(6)
第一篇 光纤通信	(7)
第一章 光纤传光原理及其传输特性	(7)
1.1.1 光纤分类	(7)
1.1.2 光的折射与反射现象	(7)
1.1.3 光纤传光原理	(8)
1.1.4 沿光纤传输的光波的模	(11)
1.1.5 光纤的传输损耗	(16)
1.1.6 光纤的色散特性	(20)
1.1.7 光纤色散的表示方法	(27)
1.1.8 光纤的最佳折射率分布	(30)
1.1.9 光纤与光缆的结构	(31)
复习题	(34)
第二章 光纤通信的光源	(36)
1.2.1 光的本质及激光特点	(36)
1.2.2 激光产生的条件	(38)
1.2.3 半导体激光器的原理	(42)
1.2.4 半导体激光器的结构	(47)
1.2.5 单模激光器举例	(50)
1.2.6 半导体激光器的特性	(51)
1.2.7 非相干光源——发光二极管	(52)
1.2.8 光源的发射面与接收面之间的功率传输	(56)
1.2.9 光源与光纤的耦合	(58)
1.2.10 光源调制方式及其电路	(65)
复习题	(72)
第三章 光检测器	(74)
1.3.1 真空光电二极管原理	(74)

1.3.2	光电二极管	(75)
1.3.3	雪崩光电二极管	(77)
1.3.4	APD 特性	(08)
1.3.5	长波长光检测器	(82)
1.3.6	接收器件与光导纤维的耦合	(85)
1.3.7	PIN 光电二极管的电路模型	(86)
1.3.8	雪崩光电二极管的电路模型	(89)
1.3.9	PIN 的噪声	(90)
1.3.10	APD 的噪声	(96)
	复习题	(99)
第四章	光纤通信接收机	(100)
1.4.1	引言	(100)
1.4.2	光接收机的基本组成	(100)
1.4.3	噪声分析	(102)
1.4.4	场效应管和双极晶体管放大器的噪声	(112)
1.4.5	前端放大器设计	(118)
1.4.6	数字接收机的灵敏度	(123)
1.4.7	发送机和信道参数对系统性能的影响	(131)
1.4.8	模拟光接收机	(134)
1.4.9	光接收机实例	(136)
1.4.10	光检测器——前置放大组件及光接收机发展方向	(139)
	复习题	(142)
第五章	光纤通信系统	(144)
1.5.1	通用光纤通信系统的组成	(144)
1.5.2	经济成本的考虑	(144)
1.5.3	调制方式	(145)
1.5.4	光纤线路编码方式	(148)
1.5.5	指标分配	(151)
1.5.6	模拟通信系统指标	(152)
1.5.7	数字通信系统指标	(155)
1.5.8	多用途服务系统	(157)
1.5.9	WDM 技术和相干光技术在系统中应用	(160)
1.5.10	光纤系统参量测量	(161)
	复习题	(164)
	实验	(164)
	参考文献	(168)

第二篇 短波 SSB 通信系统	(170)
第一章 短波 SSB 通信概论	(170)
2.1.1 SSB 信号的特点	(170)
2.1.2 SSB 发射机的峰包功率	(172)
2.1.3 SSB 调制的特点	(174)
2.1.4 SSB 通信存在的技术问题	(179)
2.1.5 SSB 通信机分类	(180)
复 习 题	(185)
第二章 SSB 发射机的组成及设计考虑	(187)
2.2.1 SSB 信号的产生方法	(187)
2.2.2 SSB 发射机的组成原则	(191)
2.2.3 SSB 发射机的失真	(198)
2.2.4 SSB 调制器	(202)
2.2.5 SSB 发射机的技术指标及其测试	(205)
2.2.6 SSB 发射机设计考虑	(210)
复 习 题	(212)
第三章 SSB 接收机的组成和前端部分	(213)
2.3.1 SSB 接收机的原理概述	(213)
2.3.2 SSB 接收机的前端部分	(219)
2.3.3 混频器	(224)
2.3.4 SSB 接收机的干扰	(232)
2.3.5 减小非线性干扰的基本方法	(246)
复 习 题	(254)
第四章 SSB 接收机的解调器及 AGC 系统	(256)
2.4.1 SSB 解调器的工作原理	(256)
2.4.2 SSB 解调器的实际电路	(259)
2.4.3 恢复载频产生的方法	(265)
2.4.4 SSB 信号解调时的失真	(268)
2.4.5 各种信号的解调方法	(276)
2.4.6 SSB 信号的第二、第三种解调方法	(293)
2.4.7 SSB 接收机的 AGC 系统	(297)
复 习 题	(305)
第五章 SSB 接收机的方案选择	(307)
2.5.1 SSB 接收机的主要技术指标	(307)
2.5.2 SSB 接收机的主要技术指标测试	(318)

2.5.3	变频次数与中频的选择、高中频接收机的组成	(333)
2.5.4	通频带的计算和窄带中频滤波器的选择	(344)
2.5.5	波段划分	(348)
2.5.6	增益与选择性分配原则	(352)
2.5.7	灵敏度计算和 AGC 电路概算	(359)
	复习题	(359)
第六章	短波信道的计算机模拟及其传输数字信号的问题	(361)
2.6.1	引言	(361)
2.6.2	多普勒频移及多径效应对数字信号的影响	(364)
2.6.3	SSB 电台对数字传输的影响	(368)
2.6.4	提高短波通信的可靠性及其传输数字信号的方向	(373)
2.6.5	短波信道的计算机模拟	(384)
	复习题	(409)
	实验	(409)
	参考文献	(416)
第三篇	卫星通信	(417)
第一章	卫星通信概论	(417)
3.1.1	卫星通信的发展历史	(417)
3.1.2	卫星通信的基本特点	(421)
3.1.3	通信卫星的基本组成	(425)
3.1.4	卫星通信的使用频段(无线电窗)	(429)
3.1.5	卫星轨道	(431)
3.1.6	太阳对卫星通信的中断现象	(437)
	复习题	(440)
第二章	卫星通信的多址联接	(442)
3.2.1	概述	(442)
3.2.2	频分多址方式	(444)
3.2.3	时分多址方式	(448)
3.2.4	码分多址方式	(450)
3.2.5	其他多址方式	(451)
	复习题	(452)
第三章	卫星通信线路的设计与计算	(453)
3.3.1	线路标准	(453)
3.3.2	载波功率与噪声功率计算	(455)

3.3.3 卫星通信线路设计	(466)
3.3.4 地面站设计的考虑	(478)
复习题	(479)
第四章 地面站设备	(481)
3.4.1 地面站的组成及各部分功能	(481)
3.4.2 天线系统	(482)
3.4.3 大功率发射系统	(483)
3.4.4 高灵敏度接收系统	(485)
3.4.5 终端设备 MDE	(485)
复习题	(489)
实验	(489)
参考文献	(489)
第四篇 其他通信方式	(490)
第一章 微波中继通信	(490)
4.1.1 概述	(490)
4.1.2 微波中继站组成	(491)
4.1.3 微波站址、频段的选择及波道频率的配置	(492)
4.1.4 微波通信的发展前途	(493)
第二章 散射通信	(494)
4.2.1 概述	(494)
4.2.2 对流层散射通信	(494)
4.2.3 电离层散射通信	(495)
4.2.4 流星余迹通信	(496)
第三章 通信网	(497)
4.3.1 综合业务数字网(ISDN)	(497)
4.3.2 计算机网络	(498)
4.3.3 移动通信网	(501)
复习题	(502)
参考文献	(502)

绪 论

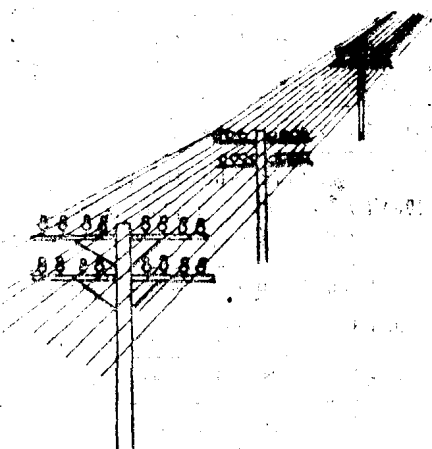
通信系统概述

自从人类社会产生后,就有了通信。所谓通信,广义上说,就是把信息或消息从一个地方传送到另一个地方去。最简单的是人力通信。

随着科技的发展,出现了采用电信号(或光信号)通过电信道(或光信道)来传送各种信息的近代通信系统。

根据传送信息的线路或媒质不同,通信系统又分为利用导线(或光纤、光缆)完成信息传送的有线通信及利用无线电波(或光波)在空间传播来完成信息传送的无线通信两类。

有线电通信的传输线路主要有架空明线、对称电缆和同轴电缆三种类型。图1所示的就是常见的架空明线。在现代通信中它已不能担任主干线路的任务,主要因为架空明线开通电路总数有限,电路数增加,传送的频率更高,衰减增加更多,消除线间串音更困难,而传送的频率进入无线电长波段,长波干扰严重。另外架空明线易腐蚀受损。它的电气特性易随天气变化而改变。对称电缆是一条对称且包含多对相互绝缘的电话线。每对线由两根完全相同的芯线组成。根据芯线结构不同又分为低频对称电缆和高频对称电缆。前者的每对芯线扭在一起,而后者的芯线每两对构成一个四线组。我国高频对称电缆用得较多的是1个四线组、4个四线组和7个四线组三种。其中4个四线组共8对芯线,每对芯线可开通60路载波电话(也有120路的),共可开通480路电话,比架空明线增加1倍左右。自同轴电缆出现后,它退居其次。同轴电缆中含有许多同轴管,有4、8、10至20多根的,如图2所示。每两对同轴管(一去一来),最多可以开通10800~13200路电话电路,同轴电缆也可用来传送电视信号。同轴电缆衰减小,抗外界干扰能力强,能克服“串音”问题。所以目前同轴电缆是有



1 架空明线

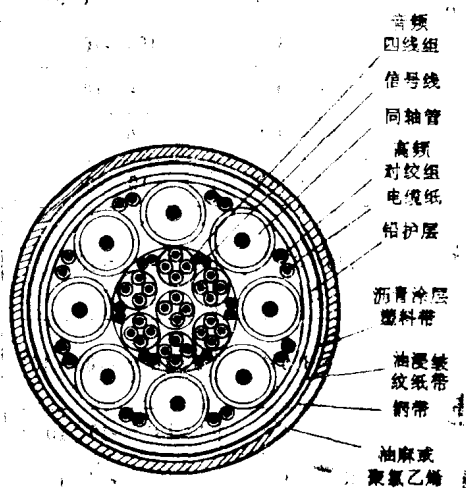


图2 同轴电缆结构

线电通信的重要方式。我国已建成的京、沪、杭同轴电缆线路，可传递1800路电话，也可传递电视。由于技术上特别是经济上的原因，它尚无较大的发展，将来可能大部分被光缆代替。无线电通信从19世纪后期至今发展惊人，通信距离可达亿万公里，可传递多种信息，一条线路可同时传递几十路电视、几万路以至更多路数的电话。它的发展过程是提高通信可靠性和通信速率的过程。主要是不断扩展使用频率范围，到目前为止已基本掌握长波至厘米波的有关理论和技术问题。目前正在研究毫米波、亚毫米波等通信方式。

另外是不断寻找新的传输方式，如利用卫星作为中继站的卫星通信方式，其容量大、距离远、稳定可靠，目前已取代大部分国际短波通信业务。在地下或海底通信中采用超长波，在军事上很有价值。毫米波的表面波及波导传输正在试验研究中。近年来出现的光通信也是容量惊人的先进、有效而实用的通信方式。

目前常用的无线电通信主要是短波通信、微波卫星通信和微波接力通信以及散射通信。

从应用角度出发，目前我国陆地上以同轴电缆和微波接力通信为主；而国际上以卫星通信和海底同轴电缆通信为主。

现代化的通信要求把各种通信手段组成综合数字通信网(IDN)，要求把各种通信信号均变成数字信号，再经过数字传输和数字交换，实现全国各地、世界各地以至宇宙空间的网通信，待世界进入“信息时代”后，将实现综合业务数字网(ISDN)通信。

通信系统的模型及基本参数

发射机、信道和接收机是通信系统的三个组成部分。其中信道是发射机与接收机之间的传输媒质。在通信系统中信息源一般有电报、电话、传真、电视、数据等。信息源必须是能被发射机所发射，并能被接收机所检测的独特的物理模型。

表 1 电磁波频的分类

波段名称	频率范围(Hz)	波长范围(m)	频段名称	应用范围(举例)	
极长波	30~300	10 ³ k~10 ⁴ k	极低频ELF	部分乐器和话音频率	
—	300~3000	100k~1000k	音频 VF	话音频率主要部分	
超长波	30~3k	10k~100k	甚低频VLF	海岸潜艇通信, 海上导航	
长波	300~30k	1k~10k	低频 LF	大气层、地下岩层通信, 海上导航	
中波	1500~300k	200~1k	中频 MF	广播, 海上导航	
短波	1.5~30M	10~200	高频 HF	远距离短波通信, 短波广播	
超短波	米波	300~300M	1~10	甚高频VHF	电离层散射通信 30~60MHz, 流星余迹通信 30~100MHz, 人造电离层通信 30~144MHz, 对大气层内、外的飞行体通信
	分米波	3k~300M	10×10 ⁻² ~100×10 ⁻²	超高频UHF	中、小容量微波中继通信及对流层散射通信 700~10000MHz。分米波的高端也称为微波
微波	厘米波	30k~3G	1×10 ⁻³ ~10×10 ⁻²	特高频SHF	大容量微波中继通信及数字通信、卫星通信
	毫米波	300k~30G	1×10 ⁻⁵ ~10×10 ⁻³	极高频EHF	再入大气层时的通信、波导通信
激光	1000G 以上	2×10 ⁻⁴ 以下		大气激光通信(10.6μm), 光纤通信	

电磁波谱的分类如表 1 所示。由表可见现代无线电通信系统的典型信道是中长波、地表波、超短波及微波视距传输信道，短波电离层反射信道，超短波流星余迹散射信道，超短波及微波对流层散射信道，超短波电离层散射信道，超视距绕射信道，人造卫星中继信道等。现代光通信系统的典型信道是大气激光通信信道和光纤通信信道。上面的信道均具有输入、输出端，输入功率或输出功率，基本上属于线性信道。在输入端无信号输入时，在信道输出端存在一定的噪声功率，信号通过信道有时延损耗等，这种信道可分为恒参信道（信道参数不随时间变化，如卫星中继信道）和变参信道（信道参数随时间而变化的信道如短波电离层反射信道）。通信系统的干扰源包括信道中的噪声与干扰以及分散在通信系统其他位置上的各种噪声。在信道传输信号的过程中会受到各种干扰，主要是加性干扰（与信号线性叠加）和乘性干扰（信道中输出信号是输入信号与信道传递函数的乘积）。

通信系统的主要几项基本参数是信息传输速率、可靠性、方便性及成本。这些参数彼此相关并相互依赖。一般信息传输速率是最重要的。在一定时间内传输的信息量决定于信息传输速率。信息传输速率决定于收发信息所使用的物理形式和技术，最后决定于系统的设计和结构方式。通信系统的可靠性是系统随时收发信息准确无误的保证，它受多种因素影响，首先受系统的器件或部件好坏的影响，同时受信道中噪声的影响，系统设计中应适当选择器件及信道，尽量避免噪声影响。另外通信系统要求实用、有效和方便。系统成本与其他要求是矛盾的统一，一定条件下，成本是决定因素之一，成本问题既要从经济角度考虑，还要从能量和材料角度着想。一般情况下，判定系统成本有效的关键是传输单位信息所耗费的成本，利用这种方式可以有效地比较不同系统的成本。

无线电波的传播方式

无线电波从发射天线向天空发射出去，如果天线无方向性，电波向四面八方传播。如果天线有方向性，电波就向指定的方向传播。电波离开发射天线后，主要决定于周围介质。因此在地球范围内的通信，必须知道地面、地下、大气层以及地球自身的磁场和宇宙其他部分对电波的影响。由于地球的电磁特性相当复杂，难以严格处理电波传播问题，只能在理论分析的基础上大量实践，这是研究电波传播的主要特点。实际的介质是不均匀的，因此在不同介质分界面上会产生折射和反射。在规则的界面上产生反射，在不规则的界面上，电波的反射是杂乱的漫反射，称为散射。电波遇障碍时会绕过障碍而传播到视线以外的空间，称为绕射。电波传播的方式如图 3 所示。图中①为地表波，又叫地波，它沿地表面传播。这种传播方式适用于长波和中波，因为长波、中波的波长较长，绕射能力强，并且电波被地面及障碍物所吸收的能量少，这样电波的传播距离就远。地表波不受天气季节、阳光等影响，所以传播比较稳定。②为直射波，像光线一样从发射天线发射后直接到达接收天线的电波。由于地球是一个球体，所以当

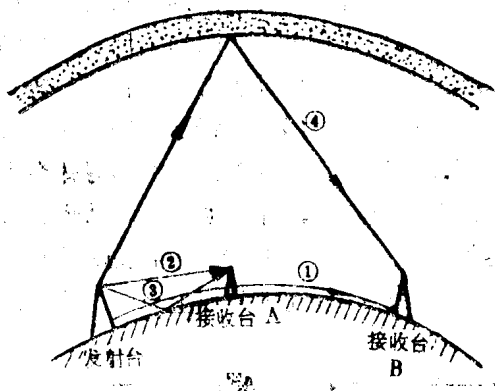


图 3 电波传播路径

在地面接收的情况下可利用的距离只不过 50~60km。超短波及微波等只能利用直射波传播。因此微波中继通信要每隔 50~60km 设一个中继站。电视台的服务范围一般在半径为 50~60km 的区域内。微波中继、市内移动通信、调度通信、电视广播、卫星通信、雷达等均用直射波。③为大地反射波，经地面或附近其他物体反射的电波。接收台 A 接收的是直射波和大地反射波的合成电波，即直射波或视距波，上面 ①、②、③ 统称为地面波。④为天波，又称电离层波，它利用高空的电离层对无线电波的反射作用来传播。利用电离层和地面的来回反射，可以把电波传得很远，甚至绕地球环行也可以。电离层对传播的短波吸收很小，而大部分被反射；对长波吸收很大；对超短波来说，它能穿透电离层，不被反射。但电离层受太阳光照射及黑子等的影响很大，电离层的电离浓度会有明显变化。另外，还有绕射波和散射波，图 3 中未画出。

光纤通信

光通信的历史很悠久，最早是目视阶段，第二阶段为光电方式，主要用抛物面镜会聚光信号，再以光电管转换为电信号。第三阶段为传光线路的探索。20 世纪 60 年代初氦氖激光器进入实用阶段。传光线路探索包括透镜列波导、反射镜列波导、气体透镜波导、薄膜式光波导、空心式光波导等。

第四阶段即光学纤维问世，1970 年美国康宁公司 Kapron 等人发表了有关 20dB/km 的光纤的文章。有线光通信就是光纤通信，发、收端分别采用半导体光源器件和光检测器件，传输介质是光纤，又称光导纤维或光波导。图 4 为电磁波的波谱图。图 4 中画出了二氧化碳(CO₂)激光器及氦氖激光器(He·Ne)的对应的波长位置，分别为 10.6μm 和 0.6328μm。显然可见光边上有氦氖(He·Ne)激光器(又称红光可见光激光器)。而二氧化碳激光器波长对应区域在近红外区内。有线光通信即光纤通信对应的波长范围 $\lambda=0.8\sim1.8\mu\text{m}$ ，如图 4 中所示，它属于电磁波谱中的近红外区。

图 4 中也画出了与波谱图相对应的频谱图。光波与其他波长的电磁波一样，在真空中的传播速度约为 $3\times10^8\text{m/s}$ ，根据波长 λ 、频率 f 和波速 c 之间关系式 $f=c/\lambda$ ，可计算出各种波长对应的频率。

光纤通信系统如图 5 所示。发端首先将用户传送的语音变为电信号，然后使半导体激光器或发光二极管等光源发出的光强度跟随电信号的强弱变化，称为光强度调制，并利用光纤把该光信号传向远方；收端则采用光电检测器接收光信号，经光电转换还原为电信号，最后再解调为接收端用户能理解的语音信号，这样就构成一个完整的模拟光纤通信系统。

各种模拟信号(如电话信号等)可先进入脉码调制电端机(PCM)进行编码，然后送入光端机，经过放大等处理，再经半导体激光器光强度调制，转换为光信号，经光耦合器送入光纤，传输至远方，如图 6 所示。从光纤传来的光信号在收端经光耦合器用半导体光电检测器变换成电信号，由 PCM 电端机译码解调还原成语音信号送入各电话终端中去。为了传输更长的距离，一般在中间加上光中继器。目前中继器一般包括三部分：光电检测器、判决再生器、光源。

光纤通信具有下列优点：

1. 传输频带宽，通信容量大。目前使用的光频率比微波高 $10^3\sim10^4$ 倍，通信容量约

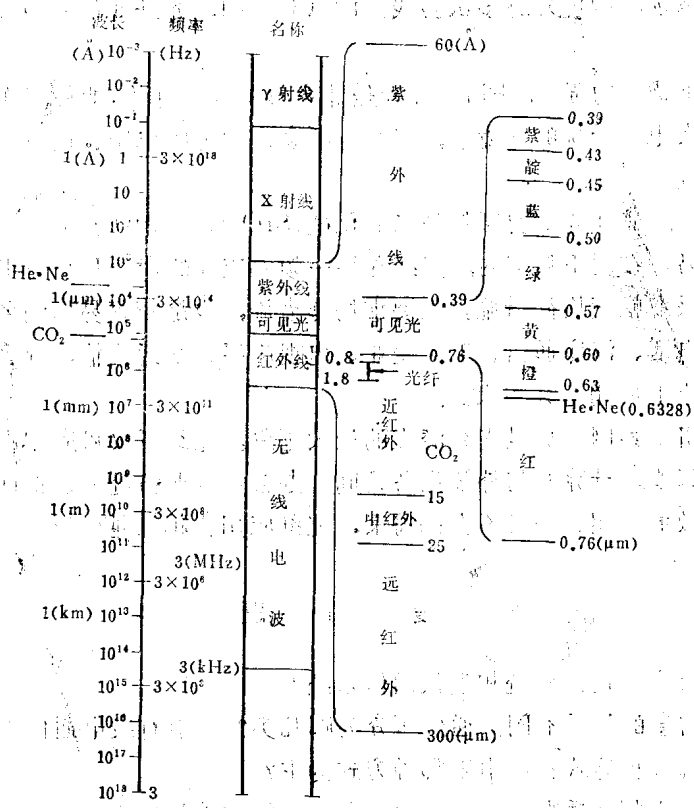


图 4 电磁波谱(根据对数表作成)

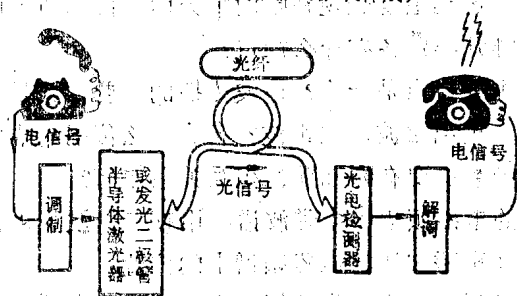


图 5 光纤通信系统

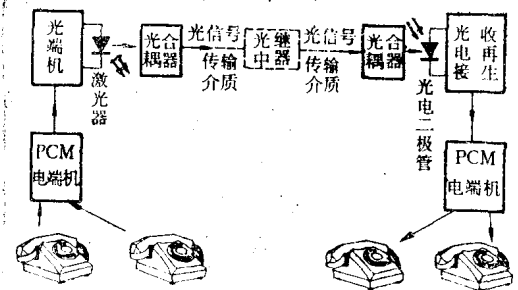


图 6 PCM 多路电话光纤通信系统

可增加 $10^3 \sim 10^4$ 倍。

2. 中继距离远, 国内外许多试验线段的试验表明, 光纤通信无中继的直通距离比金属导线远得多。

3. 抗电磁干扰能力强, 无串话。光纤是非金属的光导纤维, 即使工作在强电磁场附近或处于核爆炸后强大电磁干扰的环境中, 光纤也不会产生感应电压、电流。避免了最讨厌的最难去掉的电磁干扰。

5. 资源丰富。光纤的主要原料是二氧化硅(SiO_2), 资源丰富而便宜, 取之不尽。

6. 均衡容易。在运用频带内, 光纤对每一频率成分的损耗几乎是相等的, 一般不需在中继站和接收端采取幅度均衡措施。如要求均衡措施, 也是较容易达到要求的。

光纤通信在电话、海底通信、工矿企业、电视广播、交通运输、计算机通信网中均可应用。光纤在军事上的应用意义更大。

另外, 计算机及其网络更是光纤潜在的最大用户。光纤不仅可应用在计算机网络中, 而且在计算机数据母线、计算机与外部设备之间、办公室内业务处理设备间及计算机内连线等方面均可得到有效的应用。预计不久的将来, 光纤应用会越来越广泛。

复 习 题

1. 什么叫做广义通信系统和近代通信系统?
2. 按传送信息的媒质不同, 通信可分为哪几类? 其中有线电通信中以哪种方式为主? 无线电通信包含哪几种方式? 其中以哪种方式为主?
3. 通信系统模型包括哪几部分? 简述各部分的功能和作用。
4. 无线电通信的发展过程主要表现在哪两个方面? 目前研究的重点是什么?
5. 信道大致划分为哪几类? 各有什么特点?
6. 研究电波传播的主要特点是什么? 电波传播的主要形式是什么?
7. 什么叫做地表波、电离层波、视距波? 各有什么传播特点?
8. 通信系统的基本参数主要有哪几项? 相互关系如何?
9. 画出微波与光波的电磁频谱和电磁波谱, 用频率和波长两种刻度, 标明光纤通信与激光通信使用波长、频率在电磁波谱、电磁频谱上的位置。
10. 简述光纤通信的优越性。光通信的简史可分为哪几个阶段?
11. 略述光纤通信已在哪些场合中开始应用? 不久的将来将在哪些场合中应用?

第一篇 光 纤 通 信

第一章 光纤传光原理及其传输特性

1.1.1 光纤分类

从传输特性来划分, 光纤可分为单模和多模两种。光在光纤介质中传播, 它的电磁场在光纤中按一定的方式分布, 这种分布方式称为模式。单模光纤是指只允许一种电磁场分布方式存在的光纤。多模光纤是指允许多种电磁场分布方式同时存在的光纤。单模光纤直径很小, 一般在 $5\mu\text{m}$ 以下。光在单模光纤中的传光原理一般用电磁波理论即模式理论来解释。目前比较成熟的是多模光纤。这种光纤的芯径比较大, 约在 $80\mu\text{m}$ 左右。在多模光纤中的传光原理一般用射线光学理论即射线理论来解释比较方便。为了更完整而全面解释光纤传光原理, 有时用射线理论和模式理论结合起来解释。

多模光纤在结构上可以分为两大类。一类是均匀阶跃折射率分布型, 简称阶跃折射率光纤 (SI), 如图 1.1.1(a) 所示, 它由内外两层折射率不同的石英材料 (SiO_2) 组成, 纤芯的折射率 n_1 比包层的折射率 n_2 大。另一类是渐变折射率分布型, 也称梯度折射率光纤 (GI), 如图 1.1.1(b) 所示, 由图可知, 纤芯轴心的折射率最大, 沿半径方向折射率逐渐减小, 到了与包层的交界面上, 折射率与包层相等。因为 SI 分布的传光原理比较容易解释, 因此不管用射线理论还是模式理论均先以 SI 分布为例, 以后再对 GI 分布进行解释。

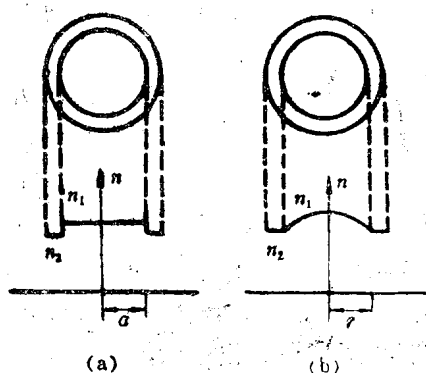


图 1.1.1 光纤的折射率分布
(a) SI 折射率分布; (b) GI 折射率分布。

1.1.2 光的折射与反射现象

光作为一种电磁波, 严格描述其运动过程, 必须应用麦克斯韦方程。采用麦克斯韦方程推导出波动方程后即可严格地描述光强和相位, 由于光波的波长很短, 如果仍从麦克斯韦方程出发, 采用波长近似趋向零的几何光学原理或射线方程, 把光波看作“射线”, 即用射线理论来描述, 将较直观而方便, 虽然是近似的方法, 但易于理解传光原理。

下面考虑光在折射率不同的两种介质界面上的折射与反射。折射与反射现象是射线理论中用来简洁地说明传光原理的方便工具。

任一介质 (又称媒质) 的折射率 n , 是光在空气中的速率 c 与在该媒质中的速率 v 之比, 即 $n=c/v$ 。光线经过两个不同介质的界面时, 要发生折射和反射现象, 如图 1.1.2(a) 所

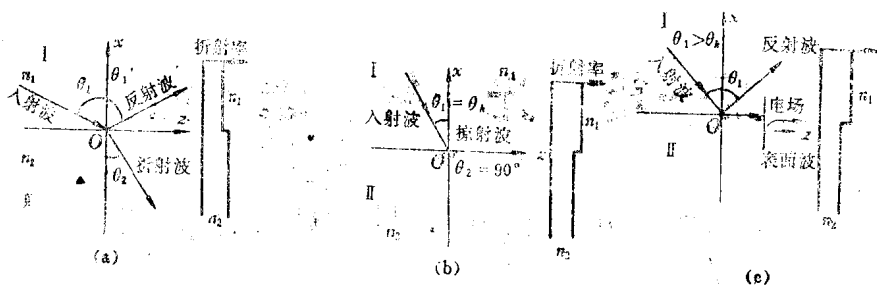


图 1.1.2 光的折射与反射

(a) 折射[表示 $\theta_1=60^\circ$, $n_1=1$ (空气), 并相对于 $n_2=1.5$ (玻璃)时的折射];

(b) 掠射[表示 $n_2=1$ (空气), $n_1=1.5$ (玻璃)时的临界角];

(c) 全反射[表示 $n_2=1$ (空气), $n_1=1.5$ (玻璃)时, 入射角 $\theta_1 > \theta_k$ (临界角)].

示。一束光从折射率为 n_1 的介质 I 左上方射向界面, 一部分光线透过界面进入折射率为 n_2 的介质 II 中, 即为折射; 另一部分光线在界面上反射回来, 即为反射。根据斯奈尔 (Snell) 定律, 光线与界面的垂直线 (即法线) 所成的入射角 θ_1 与折射角 θ_2 之间的定量关系是:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{折射定律}).$$

而

$$\theta_1 = \theta'_1 \quad (\text{反射定律}),$$

现在假设 $n_1 < n_2$, 根据折射定律, 则有

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1,$$

显然 $\theta_1 > \theta_2$ 。其次, 考虑图 1.1.2(b) 中 $n_1 > n_2$ 的情况。根据折射定律, 显然, $\theta_1 < \theta_2$ 。现在将折射角 θ_2 逐渐增大, 即当入射角 θ_1 小到一定程度时, θ_2 就变为 90° 。此时光不再进入介质 II 中, 而在界面掠射, 对应的入射角为 $\theta_1 = \theta_k$ 。

根据折射定律, 则

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = \sin \theta_k / \sin 90^\circ = \sin \theta_k = n_2 / n_1,$$

即 $\theta_k = \sin^{-1}(n_2/n_1)$, θ_k 称为临界入射角, 简称为临界角。

当 $\theta_1 > \theta_k$ 时, 如图 1.1.2(c) 所示。光线从介质 I 射入界面时, 不再进入介质 II 中, 光能量全部被反射, 即从界面返回至介质 I 中, 这称为全反射。因此, 希望光线在介质 I 内发生全反射, 就要求入射角 $\theta_1 > \theta_k$ 。 θ_k 又称为全反射的临界角。若以具体数值为例, 当 $n_2=1$ 时, 对于 $n_1=1.5$ 和 3.5 , θ_k 分别为 41.8° 和 16.6° 。当 $\theta_1 > \theta_k$ 时, 如上所述, 光线不再进入图 1.1.2(c) 中的下方 (x 轴的负方向)。

1.1.3 光纤传光原理

现在利用平面介质波导来研究光纤的传光原理。上述射线理论的全反射概念可以用来解释光纤的传光原理, 比较直观, 易于理解。

在光纤纤芯中存在折射率较高的部分, 在阶跃分布的光纤中, 一般纤芯折射率 $n_1=1.5$,