

普通高等院校

电子信息类系列教材

*DianXin ChuanShu
YuanLi Ji YingYong*

电信传输 原理及应用

© 胡庆 田增山 姚玉坤 编著



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

普通高等院校电子信息类系列教材

电信传输原理及应用

胡庆 田增山 姚玉坤 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

电信传输原理及应用 / 胡庆, 田增山, 姚玉坤编著.
北京: 人民邮电出版社, 2009.9
(普通高等院校电子信息类系列教材)
ISBN 978-7-115-20093-8

I. 电… II. ①胡…②田…③姚… III. 电信—通信理论—
高等学校—教材 IV. TN911

中国版本图书馆CIP数据核字 (2009) 第132433号

内 容 简 介

本书是根据电信传输技术和传输线路的现状而编写的。全书共分8章, 主要包括电信传输的基本概念、金属传输线、波导传输线、介质光波导的传输线的传输理论和应用、无线通信传输理论、移动通信传输信道、微波通信传输线路、卫星通信传输线路的系统构成及应用。每章都配有实践活动和习题。本书选取了当前电信传输中的最新应用作为分析实例, 概念阐述清楚, 理论分析深入浅出。

本书可作为通信与信息专业本科、专科院校教材, 也可供相关科研、教学和工程技术人员参考。

普通高等院校电子信息类系列教材

电信传输原理及应用

-
- ◆ 编 著 胡 庆 田增山 姚玉坤
责任编辑 滑 玉
执行编辑 贾 楠
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1 092 1/16
印张: 12.5
字数: 300千字 2009年9月第1版
印数: 1-3 000册 2009年9月河北第1次印刷

ISBN 978-7-115-20093-8

定价: 25.00 元

读者服务热线: (010) 67170985 印装质量热线: (010) 67129223
反盗版热线: (010) 67171154

前 言

信息传输是信息社会的三大标志之一，“传输技术”的发展，决定着“整个通信网络”的发展。在通信技术高速发展的当今社会，传输是现代信息网络的生命线，信息的高速传输使人们决策帷幄中，致胜千里之外，传输是决定“整个通信网络”的发展要素，可以说没有传输，就没有真正意义上的通信，因此，“电信传输原理”是通信与信息工程类专业的重要专业基础课，有很广的适用面，是掌握“光纤通信系统”、“移动通信”、“微波卫星通信”、“现代通信网”、“计算机网络”、“宽带接入网技术”等知识领域的铺垫。

本书以电信传输需求的理论分析为线索，融合了近 10 年的教学经验、多年的工程应用和最新科研成果，根据电信传输技术和传输线路多样化的快速发展而编写的。书中以电磁场理论为基础，注重用传输应用实例来介绍各种传输方式的概念、原理、技术和各种通信传输信道，每章都有从实际工作中精心提炼出来的应用实例，力求给读者一个比较全面、系统的从理论到实际的信息传输的完整框架。

全书共 8 章，主要包括电信传输基本概念和基本分析方法，金属传输线、波导传输线、介质波导（光纤）传输线的传输理论和应用，微波、卫星、移动通信信道及其传输线路特征，且本书选取了当代电信传输中的最新应用作为理论讨论的实例，概念解释清楚，理论分析深入浅出。

本书第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 7 章由胡庆编写，第 5 章、第 6 章由田增山编写，第 8 章由姚玉坤编写。全书由胡庆主编并统稿。在编写期间得到张德民、张毅、胡敏、樊自浦、唐宏、张齐光、汪强等大力协助，在此一并表示感谢。

本书可作为高等学校工科通信工程、信息工程、电子信息科学与技术及其他电子信息类专业本科生教材，也可供研究生、科技工作者和工程技术人员参考。

由于编者水平所限，书中难免存在疏漏和错误之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2009 年 7 月

目 录

第 1 章 电信传输的基本概念	1	2.3.2 均匀传输线方程的解	25
1.1 电信传输发展及广泛应用	1	2.4 传输线的基本特性参数	27
1.2 电信传输系统模型	2	2.4.1 特性阻抗 Z_C	27
1.2.1 通信、电信及电信传输	2	2.4.2 传输常数 γ	28
1.2.2 电信传输系统模型	3	2.4.3 反射系数与驻波比	31
1.2.3 信号的种类和电磁波波段的划分	4	2.4.4 传输功率	32
1.2.4 电信传输的主要特点	5	2.4.5 相速度、传输线波长与群速度	33
1.3 电信传输介质的结构及应用	6	2.5 传输线的工作状态	36
1.3.1 架空明线及应用	7	2.5.1 传输线的阻抗匹配	36
1.3.2 市话对称电缆及应用	8	2.5.2 传输线的阻抗不匹配	37
1.3.3 同轴电缆及应用	8	2.5.3 串音衰减和串音防卫度	38
1.3.4 金属波导及应用	8	实践活动	39
1.3.5 光纤光缆及应用	8	习题	40
1.3.6 无线信道及应用	9	第 3 章 波导传输线理论	41
1.4 传输特性和传输单位	9	3.1 波导传输线及应用	41
1.4.1 传输特性	9	3.1.1 波导传输线的结构及种类	41
1.4.2 传输单位	10	3.1.2 波导的电参数及在微波天馈线系统的应用	41
实践活动	13	3.1.3 波导在微波器件上的应用	43
习题	13	3.2 波导传输线常用分析方法及一般特性	43
第 2 章 金属传输线理论	15	3.2.1 波导传输线常用分析方法	44
2.1 常用的传输线及应用	15	3.2.2 波沿波导传输的一般特性	47
2.1.1 常用传输线的结构及种类	15	3.3 矩形波导及其传输特性	50
2.1.2 全塑市话对称电缆的电参数及应用	17	3.3.1 矩形波导中 TE、TM 波的场方程	50
2.1.3 双绞线电缆的电参数及应用	18	3.3.2 矩形波导的传输特性	54
2.1.4 同轴电缆的电参数及应用	20	3.4 圆波导及其传输特性	57
2.2 传输线常用分析方法及电参数	21	3.4.1 圆波导中 TE、TM 波的场方程	58
2.2.1 传输线常用分析方法	21	3.4.2 圆波导中波的传输特性	61
2.2.2 长线的分布参数和等效电路	21	3.5 同轴线及其传输特性	62
2.3 传输线方程及其解	23	3.5.1 同轴线中的 TEM 模的场	
2.3.1 均匀传输线的方程	23		

方程	62	5.2.1 地面对无线电波传播的 影响	100
3.5.2 同轴线中高次模的场方程	64	5.2.2 大气对无线电波传播的 影响	105
3.5.3 单模传输与同轴线尺寸的关系	66	5.3 无线信道噪声与衰落	108
实践活动	66	5.3.1 信道噪声与噪声指标分配	108
习题	67	5.3.2 衰落原因与分类	109
第4章 介质光波导传输理论	68	5.3.3 抗衰落技术	111
4.1 光纤、光缆及应用	68	5.4 无线电波传播损耗	115
4.1.1 光纤、光缆的结构及种类	68	5.4.1 无线电波传播损耗	115
4.1.2 光纤在电信网中的应用	71	5.4.2 无线传播模型	118
4.1.3 光纤在电视、数据传输中的应用	72	5.5 无线通信的多址连接方式	119
4.1.4 光纤在计算机校园网络的应用	73	5.5.1 频分多址方式	120
4.1.5 光纤在桥梁工程结构健康监测中的应用	74	5.5.2 时分多址方式	121
4.2 基于射线理论的光纤传输原理分析	75	5.5.3 码分多址方式	122
4.2.1 基本光学定律	75	5.5.4 空分多址方式	124
4.2.2 阶跃光纤中射线理论分析法	75	实践活动	125
4.2.3 渐变光纤中射线理论分析法	77	习题	125
4.3 基于波动理论的光纤传输原理分析	79	第6章 移动通信传输信道的特性	126
4.3.1 阶跃光纤中 LP 模的场方程	79	6.1 移动通信系统及应用	126
4.3.2 光纤的 LP 模及其特性	82	6.1.1 移动通信系统结构及传输特点	126
4.4 影响光纤传输特性因素	85	6.1.2 移动通信的容量	132
4.4.1 损耗特性	85	6.1.3 移动通信在传输领域的应用	134
4.4.2 色散特性和带宽	88	6.2 移动通信的信道特征	137
4.4.3 非线性特性	92	6.2.1 多径效应与快衰落	137
实践活动	94	6.2.2 阴影效应与慢衰落	139
习题	94	6.2.3 慢衰落特性和衰落储备	139
第5章 无线通信传输理论	96	6.2.4 移动信道的传输损耗	140
5.1 无线电波传播特征	97	6.2.5 移动通信信道结构模型	141
5.1.1 电波传播所涉及的地球大气层	97	6.3 移动信道的噪声与干扰	141
5.1.2 电波在空间的传播模式	98	6.3.1 噪声的分类及特性	141
5.1.3 电波传播的方式及特征	99	6.3.2 邻道干扰和同频道干扰	144
5.2 地物对电波传播的影响	100	6.3.3 互调干扰和远近效应	146
		6.4 移动通信传输模型和传输损耗	148
		6.4.1 室外传播模型	148
		6.4.2 室内传播模型	152

实践活动	153	实践活动	167
习题	153	习题	167
第7章 微波通信传输信道的特征	155	第8章 卫星通信传输线路的特征	168
7.1 微波中继传输系统及其应用	155	8.1 卫星通信的传输系统及应用	169
7.1.1 微波中继传输系统的组成 及频率配置	155	8.1.1 卫星通信系统的组成及 频率配置	169
7.1.2 微波中继传输系统的应用	159	8.1.2 卫星通信的应用	175
7.2 微波中继的传输线路	160	8.2 卫星通信传输线路	178
7.2.1 地物对微波收信功率影 响的工程计算	161	8.2.1 卫星线路的噪声和干扰	179
7.2.2 对流层对微波天线高度设计影 响的工程计算	162	8.2.2 卫星线路接收机载噪比 C/N 与 G/T 值的计算	181
7.3 微波传输线路噪声及参数 计算	163	8.2.3 卫星传输线路的 C/T 值计算	184
7.3.1 微波线路噪声分析	164	实践活动	188
7.3.2 微波传输线路参数计算	165	习题	188
		参考文献	190

1.1 电信传输发展及广泛应用

众所周知，在信息通信高速发展的当今社会，传输无处不在。没有传输，就没有真正意义上的通信，要实现国家信息基础设施（the National Information Instructure, NII）的发展目标，必须首先构建以光纤/电缆为主，微波/卫星为辅、覆盖全国和全球、天地一体化的通信传输网络。现如今，只有对信道的传输性能和传输原理有足够的理解才能以较少的投入获得高质量的通信。信息的高速传输使人们决策帷幄中，致胜千里之外。

人类历史上第一次进行电报通信发生在 1837 年，英国人在 1.5km 的距离上作了电报表演，第一次进行电话通信发生在 1876 年，贝尔获美国专利局授予的电话专利，并在 1877 年用硬双铜线架设了电话线路，从此传输线可以传输比电报信号频率高得多的语音信号。这是电信传输线路的最早应用。在百余年的时间里，从第一条成功地将 4 根相互绝缘、直径为 1.65mm、于 1851 年完成的铜线电缆的敷设，它沟通了英法之间的电报联系，到第一条于 1955 年完成的从纽芬兰到苏格兰海底越洋同轴电话电缆。平行双导线和同轴线是传输线的重要形式。其在今天仍有重要的价值，且使用频率已经达到微波波段。在普通电磁波、微波和光纤技术中，电信传输线路非常重要，它既是能量和信息的载体及传播工具，也是构成各种元件及仪器的基础。回顾电信传输线路发展的历史，可以看到电信传输的理论发展历程。

1865 年，麦克斯韦在题为《电磁场的动力学理论》的论文中奠定了电磁场理论的基础，利用麦克斯韦的成果进行传输线理论研究成为了可能。1876 年，亥维塞利用麦克斯韦方程推导出了经典电报方程，并于 1903 年架设一条线路，连接了利物浦和瓦灵顿两个城市，使亥维塞的理论完全得到了证明。经典电报方程既适用于平行双导线，又适用于同轴线，可用于高频的双导体传输系统。1893 年，英国物理学家汤姆逊（电子的发现者）发表了一本论述麦克斯韦电磁理论的书，肯定了圆金属壁管子传输电磁波的可实现性，预言波长可与圆柱直径相比拟，这就是微波传输线即圆波导，直到 1936 年才得以实现。1897 年，英国物理学家瑞利在发表的论文中，讨论了矩形截面和圆形截面“空柱”中的电磁振动，即对应后来的矩形波导和圆波导，并引进了截止波长的概念。瑞利还得到了矩形波导中主模的场方程组，并讨论了圆波导中的主模。到 1931 年，人们看出了波导技术实用价值。1936 年，贝尔实验室的科学家做出了实验波导线长为 260m 的青铜管，直径 12.5cm，信号波长为 9cm。后来，人们把

1936年当作微波技术开始的年份。

20世纪40年代是微波大发展的时期，如测量、雷达、微波中继等方面，特别在微波中继方面发展迅速。1948年美国建设了从纽约到波士顿的微波中继线路，传送480路电话和1路电视信号；在移动通信方面，1946年美国在圣路易斯城建立了世界上第一个公用汽车电话业务，频率从150MHz~450MHz；在卫星通信方面，英国空军雷达专家阿瑟·克拉克在1945年提出了卫星通信的设想（直到1957年10月，苏联发射了第一颗人造地球卫星，1965年4月美国发射了第一颗商用卫星）。微波传输线可以是同轴线、矩形波导或圆波导，主要被用作天线馈线，在机房信号源到天线之间传输导波。微波传输线理论是微波元器件的理论基础，许多实用天线都可以视为是微波传输线的变型，这使微波传输线理论又成为天线理论的基础。

传输线技术发展到今天，只用简短的文字已不能描述其品种的繁杂、发展的迅速和理论的深奥了。随着电信容量的日益扩大，人们开始使用亚毫米波或更高的频率进行通信，这时金属传输线在理论和技术上都遇到了难题。为寻找新的信息载体，人们将注意力集中到介质传输线和光波上。光波有比亚毫米波高得多的频率，利用光波作为载体，其潜在的通信容量是传统的电通信手段所无法比拟的。英籍华人高锟于1966年发表一篇题为《用于光频的介质纤维表面波导》的文章，文章提出可以从石英中提炼超纯的细丝状纤维，并用于光频成为光波导。1977年，美国芝加哥建成第一条光纤通信线路，长度为6km。1988年建成了横跨大西洋的海底光缆系统，采用的是单模光纤，总长达到19200km。

光纤也叫介质光波导，是介质波导理论的研究成果。光纤传输原理采用的是两套分析方法即射线理论和模式理论。石英光纤的工作波长为850nm~1650nm，单根光纤的可用频带几乎达到200THz，即使在1550nm附近的低损耗窗口，其带宽也达到了15THz。光纤通信的诸多好处，使光纤通信为有线通信的典型代表，它以提高光纤链路传输速率和延长传输距离为目标。

电信传输是人类社会进步的最基本条件，更是现代社会的最重要要求。传输线路的发展，一直与扩大通信容量、延长通信距离相联系，它的发展是促使技术进步的巨大动力。

1.2 电信传输系统模型

1.2.1 通信、电信及电信传输

在人类社会活动中，可以广义地认为各种客观事物的状态及其变化都属于信息。信息可以有多种表现形式，以电话、电视等方式携带的信息通常是实时传送的信息，而书刊、资料、光盘等介质记录的信息则更多是非实时传送的信息。

人们经常需要把自己的想法、意见、消息、情报与别人进行交流，这种互通信息的方式或过程就叫通信。或从更广义上说，无论采用何种方法，使用何种传输介质只要将信息从一地传送到另一地，均可称为通信。再如在古代人类利用烽火台、击鼓、驿站快马接力、信鸽、旗语等实现信息传递也都属于简单通信。此类简单通信只能在近距离内进行，要受到传送空间、距离一定程度上的限制。要实现远距离的通信，并达到迅速、有效、准确、可靠，就要借助于电子技术，把要传递的声音、文字、图像等信息转换成电信号，然后通过介质传送到对方，再还原成原来的信息。例如，电报通信是把文字变成电信号传送到远方去的通信方式；

电话通信是把语言变成电信号传送到远方去的通信方式；图像通信是把固定的或活动的图像变成电信号传送到远方去的通信方式等。

所谓“电信”，就是利用电子技术实现传送信息和交流信息的通信方式。通信的过程就是信息传输的过程。那么“电信传输”，就是指含有信息的电信号的传输。传输介质有金属导线、光纤与自由空间等种类。在金属导线、光纤等有形介质上传输信息的方式就称为有线电信；利用自由空间以电磁波形式传输信息的方式则称为无线电信。有线电信比无线电信的保密性强、受干扰的机会少，比较稳定可靠。但建设费用大，灵活性差。

1.2.2 电信传输系统模型

分处 A、B 两地的任意两用户（人与人、机器与机器、人与机器）间的信息传递是通过电信传输系统来实现的。电信传输系统的组成,如图 1-1 所示。电信传输系统能实现通信的全过程，也称为“通信系统”。

图 1-1 所示的发送终端置于变换器 A 的一端，其功能为：把消息变换成与信道相适配的电信号或光信号，并让信号进入该信道。接收终端位于反变换器 B 的一端，其功能为将从信道接收下来信号进行衰减补偿，并消除或减小畸变和噪声对有用信号的干扰，进行反变换，使其消息重现原貌。

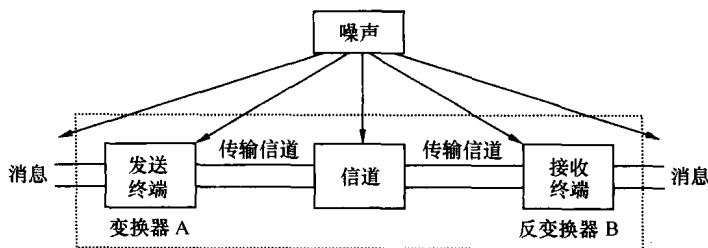


图 1-1 电信传输系统模型示意图

传输信道是信号传输通道的简称，通常由自由空间、光缆、全塑市话电缆、同轴电缆等提供。其主要功能是尽可能减小电信号或光信号在信道中传输损耗，并尽可能减少因畸变和噪声造成的对有用信号的干扰，顺利地把电信号自 A 点（发送终端）迅速且准确无误地输送到 B 点（接收终端）。

噪声会使有用信号发生畸变，使终端设备、传输信道工作在非线性状态。当噪声叠加在有用信号上时，将会降低有用信号的信噪比，进而降低通信质量。

下面通过如图 1-2 所示的实际电信传输系统示例进一步介绍一个完整的电信传输系统的一般结构。一个完整的电信传输系统除了必须具备传输信道部分外，还需要有用户终端设备、交换机、多路复用设备和传输终端设备（收发信机）等。

图 1-2 所示的话机、移动台等是用户终端设备。它的作用是将语音信号转换成电信号，或者进行反变换。交换设备的作用除了实现局内用户间的信号交换，还能同其他局的用户实现连接或转接。多路复用设备的作用是实现多路信号的汇接（复用）。可采用频分、时分、码分多种形式的复用，用以提高信道的传输容量。传输终端设备（如地球站、微波设备、终端增音设备等）的主要作用是将待传输的信号转换成适合信道传输的信号，或进行反变换等。电缆、光缆、微波、卫星是不同形式的传输介质或信号载体。当电信传输系统采用电缆作传

输介质时, 此时传输终端设备为电缆传输终端设备, 相应的传输系统称为电缆传输系统或称为电缆通信系统。若采用光缆作传输介质, 此时的传输终端设备为光端机, 相应的传输系统就称为光缆传输系统, 或称为光纤通信系统。若采用微波作载体, 用微波中继站作信号转接, 此时传输终端设备就是微波端站, 相应的传输系统就称为微波传输系统, 或称微波通信系统。若仍采用微波作载体, 用卫星作中继站, 此时传输终端设备就是卫星地面站(或地球站), 相应的传输系统就称为卫星传输系统或称为卫星通信系统。

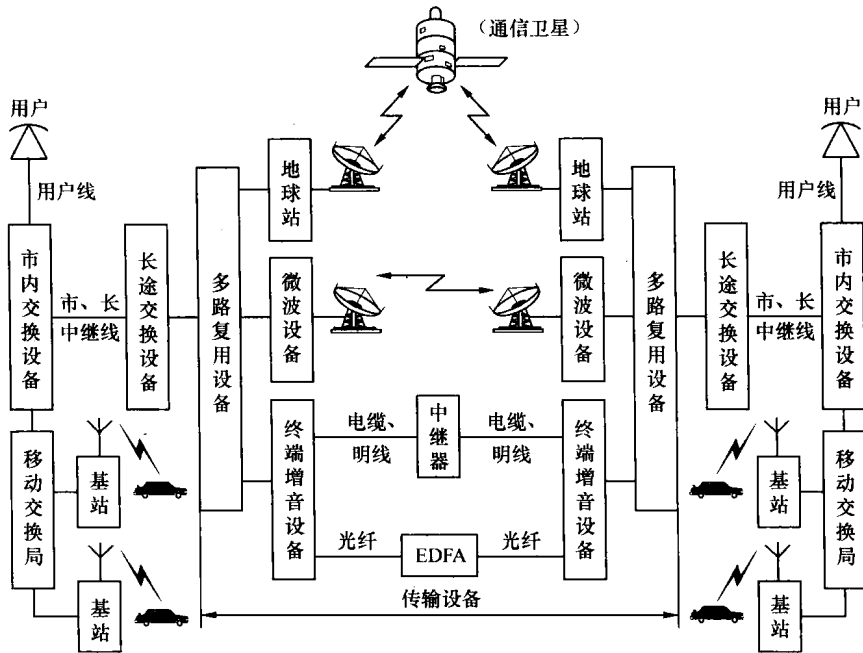


图 1-2 电信传输系统一般结构

由此可见, 无论是电缆通信系统、光纤(缆)通信系统, 还是微波通信系统、卫星通信系统, 它们的基本结构形式都很类似。不同通信系统之间的差异仅在于电信号载体、传输介质和传输终端设备不同。正是由于这些不同, 才使得不同的传输系统具有独特的性能, 也正是本课程重点要讨论的问题, 在随后的几章中将对不同类型的传输信道分别进行介绍。

1.2.3 信号的种类和电磁波波段的划分

电信号按照不同的角度可有不同的分类, 按照电信号承载信息的形式不同, 可分为模拟信号和数字信号两种类型, 对应的通信也分为模拟通信和数字通信两大类。

模拟信号, 是指模拟、仿照原有消息变化的电信号。这种信号的幅度变化是时间的连续函数。

例如, 电话机把说话声音通过送话器变成的电信号就是一种模拟信号, 因为送话器输出的电信号的幅度与声压的幅度成正比, 而且是随时间连续变化的。分析表明, 声波是包含着多种不同频率不同振幅正弦波成分的复杂波形, 其频率范围约为 $20\text{Hz} \sim 20\,000\text{Hz}$ 。在语音频谱中, 女人的声音高频成分多一些, 男人声音低频成分多一些, 如图 1-3 所示。

数字信号在时间上和幅度上的取值都是离散的。数字信号在传输上有很多优点, 最主要

的是它的抗干扰性强。由于它是以 1、0 两种状态传输的，在接收端只要正确地判断是“1”或者是“0”，一定程度上降低了干扰。

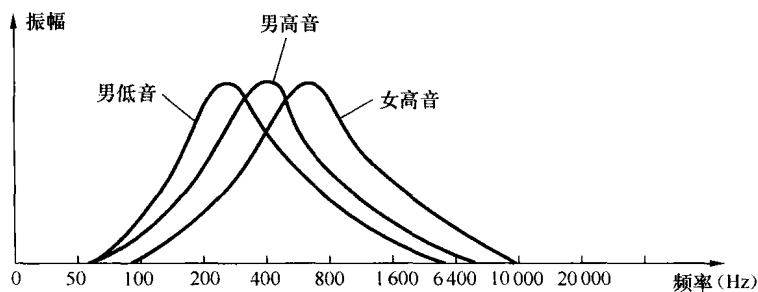


图 1-3 声音的频率成分

近代，由于计算机的发展，出现了人与计算机和计算机与计算机之间的通信。这种通信传输的都是数字信号，人们把这种通信称为数据通信。

通信所采用的传输方式是由电磁波的频率所决定的。电通信的容量几乎与使用的频率成正比，对通信容量的要求越高，使用频率就越高，如图 1-4 所示。通常无线电通信所用波段是在波长为米至亚毫米范围，目前，移动通信、微波通信和卫星通信这 3 种无线电通信方式都落在微波波段，而除光纤通信以外的有线电通信所用波段是在波长为千米至米范围；有线电视用户接入和计算机数据接入这 2 种有线电通信方式落在超短波波段。光纤通信波段的波长为 $0.8\mu\text{m}\sim 1.65\mu\text{m}$ 。

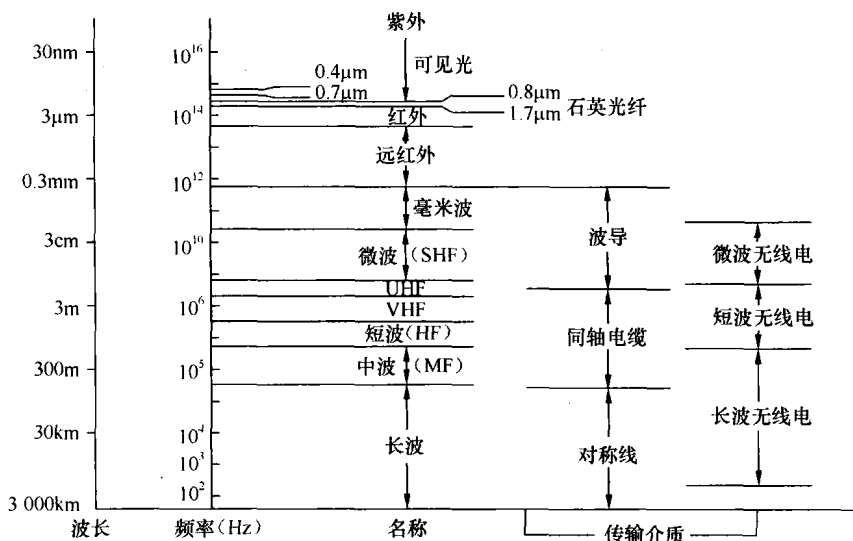


图 1-4 电磁波段划分图

1.2.4 电信传输的主要特点

(1) 传输信号多频率。电信传输中的信号是多频率的、含有信息的，无论是模拟通信还是数字通信，它们的信号都包含着丰富的频率。因此对收、发信机和传输信道带宽的要求非

常严格。例如普通的电话机发出的语音信号频率范围大约 300Hz 到 3 400Hz 左右；有线电视的传输频带更宽，大致达 750MHz 左右。

(2) 有线传输的功率比较小，它一般只有毫瓦量级。例如一部普通固定电话机发出语音信号功率只有 1mW 左右，经过传输到对方用户接收时，只要不小于 $1\mu\text{W}$ 就能满意的通话。而无线传输的功率较大，它一般在瓦量级，例如一部移动电话发出语音信号功率有 1W 左右，经过基站传输到对方用户接收时，一般为 $0.001\mu\text{W}$ ，显然电信号传输属于弱电传输，易受外来干扰，所以提高抗干扰能力、减小传输损耗是电信传输又一重要内容。

(3) 电信传输的效率较高。由于电信传输是弱电传输，其传输效率非常重要。要想把含有信息的能量尽可能多地传送到接收负载上，要求传输线或信道都应处在阻抗匹配连接的状态下。除此之外还要求外来干扰小，显然有线传输效率高于无线传输的效率。

(4) 电信传输离不开信号的变换。信号的变换也是电信传输中一个重要特点。例如电话传输必须有声变电和电变声的过程。图像传输就有光变电的变换和逆变换过程。又例如在频分复用多路通信中，利用频率的变换措施，可以在同一对线路上传输多路信号而互不干扰。在时分复用多路通信中，应用抽样技术，把多路低速率的数字信号时分复用成高速率数字信号，从而达到在同一对线上多路信号互不干扰。由于数字信号抗干扰能力强，因此现代通信中一般均利用数字信号进行传输，所以，模—数转换和数—模转换技术在现代通信中获得广泛应用。

1.3 电信传输介质的结构及应用

信息的传播是需要一定的物理介质中完成，这种物理介质称为传输介质。传输介质是提供 A、B 两地传递信息的通道。比如，空气（大气层）是传送声音的介质，因而人与人之间能交谈或能听到远处发出的声音。在月球上是没有空气的，因而，在月球上要完成两个人之间面对面的交谈，不借助于电信是无法听到对方声音的。电信的传输以速度快、距离远为优势，故是信息传输的一种重要的手段。那么，电信传输的介质又有哪些呢？

一般来说，电信号的变化体现在电压或电流的变化，电压或电流的变化会导致导线周围的电场或磁场的变化。电场与磁场的总称为电磁场。电磁场的传播需要一定的时间过程，其速度每秒可达二三十万公里，这种以很高速度传播的电磁场叫做电磁波。电信号的传输实质是电磁波的传播。它的传播方式因传输的介质不同可分为两类：一类是电磁波在自由空间的传播，这种传播方式叫做无线传输，其能量比较分散，传输效率较低；另一类是电磁波沿某种传输线传播，这种传播方式叫做有线传输，其传输的电磁波能量大部分集中在传输线周围，传输效率较高。现代通信传输方式可概括为图 1-5 所示。

现有的传输线有架空明线、对称电缆、同轴电缆、金属波导管和光纤等。各类传输线结构如图 1-6 所示。

无线电传播的传输介质是对流层、平流层或电离层，传播方式有直射波、反射波、地波、散射波等，如图 1-7 所示。

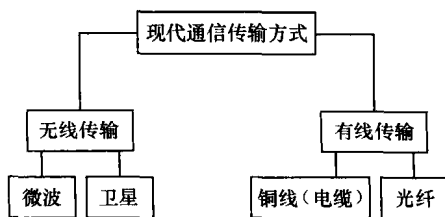


图 1-5 现代通信传输方式

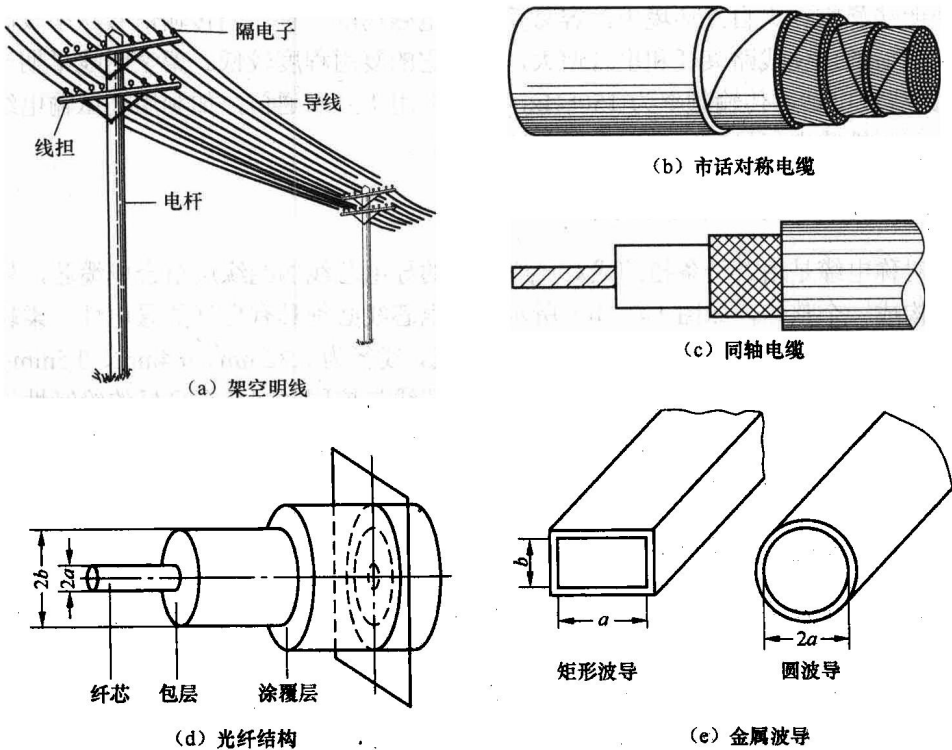


图 1-6 通信传输线路

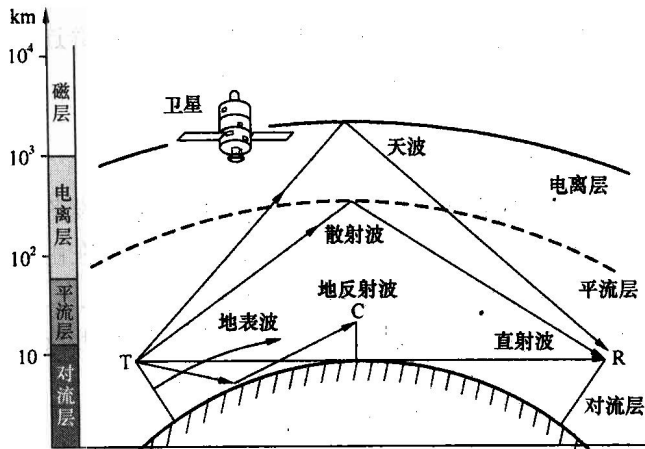


图 1-7 大气层的结构和无线电波的传播

1.3.1 架空明线及应用

架空明线是将金属裸导线架设在电线杆上的一种常用通信线路。它主要由导线、电杆、线担、隔电子和拉线等组成，如图 1-6 (a) 所示。金属裸导线捆扎在隔电子上，隔电子是固定在线担上的。隔电子应具有良好的绝缘性能，线担用于固定隔电子、电杆、拉线等。金属裸导线之间保持一定的间距，用于传输电信号，主要有直径为 3.0mm 及 2.5mm 的铜线，直

径为 (7×1.8) mm 及 (7×1.5) mm 的钢芯铝绞线和直径为 4.0mm 及 3.0mm 的钢线。

架空明线暴露在大自然环境中，容易受外界电磁场的干扰。当传输信号频率较高时，具有一定的辐射性，使线路衰耗和串音增大，所以它的复用程度较低。架空明线早期一般用来开通 12 路载波电话，传输频率为 150kHz，现今多用于专网通信，如利用高压输电线实现载波通信；利用铁路电气机车输电线实现载波通信等。

1.3.2 市话对称电缆及应用

市话对称电缆是由若干条扭绞成对（或组）的导电芯线加绝缘层组合成缆芯，外面再包裹保护层构成一个整体，如图 1-6（b）所示，导电芯线必须具有良好的导电性、柔软性和足够的机械强度。目前，最常用的导电芯线是软铜线，线径为 0.32mm、0.4mm、0.5mm、0.6mm 和 0.8mm 5 种规格；绝缘层是为保证芯线之间和芯线与护层之间具有良好的绝缘性能。主要作为传统的语音通信介质，是当前电信接入网的主体。在全球范围内，对称电缆接入比例高达 94%，其传输业务正向非语音业务方向发展。

1.3.3 同轴电缆及应用

同轴电缆又称为同轴线对，属于不对称的结构。它是由内、外导体和内、外导体之间的绝缘介质和外护层 4 部分组成的，如图 1-6（c）所示。

同轴电缆根据同轴管的尺寸大小可分为：大同轴电缆，内导体外径 5mm、外导体内径 18mm；中同轴电缆，内导体外径 2.6mm、外导体内径 9.5mm；小同轴电缆，内导体外径 1.3mm、外导体内径 4.4mm；微同轴电缆，内导体外径 0.7mm，外导体内径 2.9mm。还有一种专用于射频频段的同轴电缆，称为射频同轴电缆。

同轴电缆主要用于端局间的中继线、交换机与传输设备间中继连接线、移动通信的基站发信机与天线间的馈线、有线电视系统中用户接入线等。

1.3.4 金属波导及应用

波导是用来导引电磁波、使它按人们意图向某个方向传输的设备。

金属波导是用金属制成的中空柱状单导体。由于电磁波是在由金属壁所围住的柱形空间内，沿着波导所规定的方向前进，所以又叫做闭波导。

金属波导的种类较多。按截面形状划分有：矩形波导、圆柱形波导等，如图 1-6（e）所示。金属波导常用于微波或卫星的收、发信机与天线间馈线。

1.3.5 光纤光缆及应用

光缆是由光纤、加强件和外护层构成。光纤是由纤芯、包层和涂敷层组成的，如图 1-6（d）所示。纤芯由石英等制成，折射率通常用 n_1 表示，它是光波的主要通道。包层也由石英等制成，其折射率为 n_2 ，且 $n_1 > n_2$ ，其作用是构成全内反射的条件。涂敷层由聚乙烯等制成，为光纤增加机械强度。

光纤作为传输介质其主要优点是传输频带宽、通信容量大、传输损耗小、抗电磁场干扰能力强、线径细、重量轻、资源丰富等。为各种通信系统广泛使用，目前光纤是最理想的传输线。

1.3.6 无线信道及应用

无线信道是靠电磁波在大气层的传播来传递信息的，如图 1-7 所示。要构成一条无线信道需有发射机、发射天线、接收天线、接收机。无线信道比有线信道受到更多自然界和人为的干扰，但无线信道也具有无可比拟的优点，它不受导线的限制，因此接收者可以在范围极其广泛的地域接收信号。无线信道可根据电信使用频率不同分为短波、超短波、微波等。

短波 ($\lambda = 10\text{m} \sim 100\text{m}$, $f = 3\text{MHz} \sim 30\text{MHz}$) 经电离层的一次或数次反射，传输距离可达上万公里，主要用于应急、抗灾中的电话及数据通信。

超短波 ($\lambda = 1\text{m} \sim 10\text{m}$, $f = 30\text{MHz} \sim 300\text{MHz}$) 主要以直线视距方式在大气层中传输，传输距离约 50km；此外，也可在对流层中作数百公里的超视距通信。主要用于 280MHz 高速寻呼、无绳电话、对讲电话及超短波数字通信等。

微波 ($\lambda = 0.1\text{m} \sim 1\text{m}$, $f = 300\text{MHz} \sim 3\text{THz}$) 主要用于 900MHz 和 1800MHz 蜂窝移动电话、地面微波接力通信、卫星通信、对流层散射通信、空间通信（即用微波在地球站与人造卫星和航天器之间通信）等。

1.4 传输特性和传输单位

1.4.1 传输特性

电信号在各种介质构成的信道上传输时，主要特性是衰减（或称为损耗）和带宽。这两大传输特性直接关系到传输功能的存在价值。

1. 衰减

电信号在各种介质构成的信道上传输时，都会因传输介质本身存在漏电阻和分布电容或自由空间的吸收和散射等，信号功率逐渐损失掉，通常把信号功率的损失称为衰减（或损耗）。显然传输信道越长，其衰减就越大，电信号强度会越弱。为了防止信号功率被继续衰减至零，造成通信中断，当信号传输一定距离后，需沿途在传输信道中设增音站或中继站，对衰减后的信号进行放大处理，补偿传输过程带来的衰耗。常用传输电平描述传输过程中衰减（损耗）或增益的大小。

当信号经过某一传输网络，若输出的信号功率 P_{out} 小于输入端的信号功率 P_{in} ，则称信号经过传输网络时受到的衰减为 A 或传输网络对信号给予了衰减。例如电衰减器、光衰减器等，如图 1-8 所示。

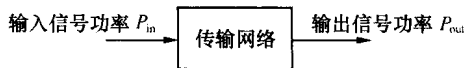


图 1-8 增益与衰减

当信号经过某一传输网络，若输出的信号功率 P_{out} 大于输入端的信号功率 P_{in} ，则称信号经过传输网络时受到的增益为 G 或传输网络对信号给予放大，例如电放大器、光放大器等。

衡量增益与衰减的大小并不是直接用信号输出功率与输入功率之差来表示，而是采用信号的输入功率与输出端功率的比值取以 e 为底的自然对数或取以 10 为底的常用对数来表示。衰减 A 和增益 G 公式如下：

$$A = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad \text{Np 或 } A = 10 \lg \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad \text{dB} \quad (1-1)$$

$$G = -\frac{1}{2} \ln \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad \text{Np 或 } G = -10 \lg \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad \text{dB} \quad (1-2)$$

式中，单位分贝（dB）、奈培（Np）为传输单位。

2. 带宽

带宽的概念定性来说是指在固定的时间内可传输的信息容量。传输线的带宽表示的是在单位时间内从传输线某一点到另一点所能通过的“最高数据率”。

在实际参与传播的信号总由许多频率成分组成的，即占有一定的频带宽度，而传输线的衰减是频率的函数，故当不同频率的信号经过传输线时，其衰减不同，把传输线输出不同频率的功率的最大值降低一半所对应的频率宽度，称为该传输线的传输带宽。

如果将脉冲信号经过同样一段长度的传输线传输后，在其终端观察，出射端脉冲将发生时间展宽，把这种波形展宽现象称为色散，色散大小也直接影响传输线的带宽。

1.4.2 传输单位

传输单位用“分贝”（dB）表示。为什么要用分贝（dB）描述呢？由声学分析可知，人耳对声音强弱变化的感觉不是与信号功率的变化成正比，而是与信号功率变化的对数成正比的。例如将功率为 0.1mW 的信号提高到 1mW，信号功率增大了 10 倍，但对人的听觉来说声音响度只增大 $\lg 1/0.1 = \lg 10 = 1$ 倍。另一方面，人眼对亮度变化同人耳一样，也是和功率变化的对数规律成正比的。因此，采用功率比的对数作为传输单位，正好反映听觉和视觉的特性。

目前国际上通用的传输单位为有两种：分贝（用 dB 表示）和奈培（用 Np 表示）。传输电平就是用分贝或奈培这样的计量单位来表示信号大小或强弱的。电平高意味着信号强、功率大、电压高、电流大，电平低则相反。

所谓某点的电平，是指电信系统中某一信号的实测功率（或电压、电流）值与某参考点的信号功率（或电压、电流）之比的对数值，某参考点的信号功率（或电压、电流）又称为基准功率（或基准电压、基准电流）。需指出的是：基准功率是基本不变的，而基准电压或基准电流则是根据在某一阻抗上所获得的基准功率来确定的。当阻抗变化时，基准电压或基准电流也要随之而变化。由于对数有常用对数和自然对数之分，因此电平的单位也有分贝（dB）和奈培（Np）两种。

1. 相对电平

以功率进行计算时，两点间的相对功率电平为：

$$[L_p] = 10 \lg \frac{P_2(\text{mW})}{P_1(\text{mW})} \quad \text{dB 或 } [L_p] = \frac{1}{2} \ln \frac{P_2(\text{mW})}{P_1(\text{mW})} \quad \text{Np} \quad (1-3)$$

以电压进行计算时，两点间的相对电压电平为：