

中国通信学会普及与教育工作委员会推荐教材

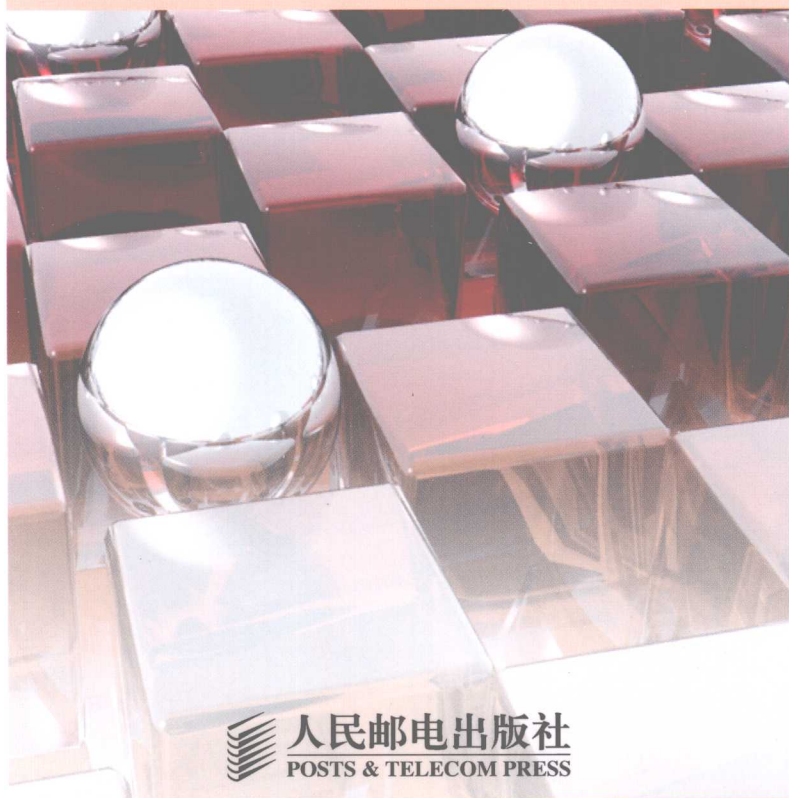
21世纪高职高专电子信息类规划教材

21 Shiji Gaozhi Gaozhuān Dianzi Xinxilei Guihua Jiaocai

通信电子电路

解相吾 解文博 编著

- 精选内容，以应用为目的，以必需、够用为度
- 重视基础，完整介绍通信电子电路的工作原理
- 适应发展，结合移动通信设备实际电路进行分析



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

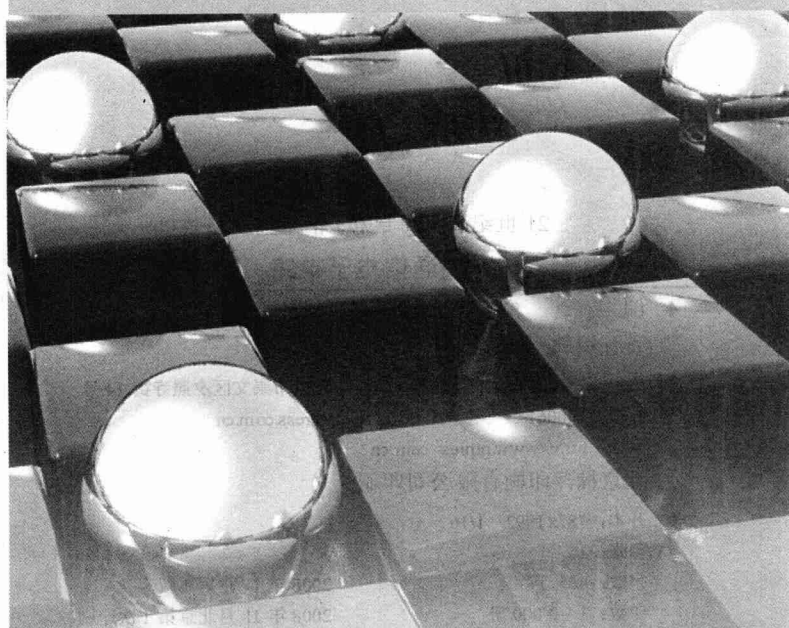
中国通信学会普及与教育工作委员会推荐教材

21世纪高职高专电子信息类规划教材

21 Shiji Gaozhi Gaozhuān Dianzi Xinxilei Guihua Jiaocai

通信电子电路

解相吾 解文博 编著



人民邮电出版社

北京

人民邮电出版社

样书

专用章

图书在版编目(CIP)数据

通信电子电路 / 解相吾, 解文博编著. —北京: 人民邮电出版社, 2008. 11
21世纪高职高专电子信息类规划教材
ISBN 978-7-115-18725-3

I. 通… II. ①解…②解… III. 通信—电子电路—高等学校: 技术学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第132352号

内 容 提 要

本书从实际应用出发,深入浅出地介绍了小信号放大器、谐振功率放大器、正弦波振荡器、调幅与检波、混频与倍频、角度调制与解调、锁相环路与频率合成电路等,对通信设备,尤其是无线通信设备中的应用电路进行了全面分析,同时还专门设计了实训作业指导。

本书内容丰富,编排合理,语言简练,通俗易懂,适用对象为高职高专通信、电子信息等专业的学生,以及普通高校独立办学的二级学院和各类成人高校相关专业的学生,本书也可供相关领域工程技术人员参考。

21世纪高职高专电子信息类规划教材

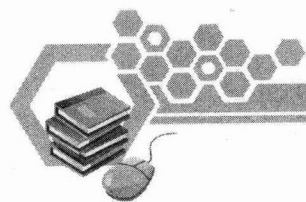
通信电子电路

-
- ◆ 编 著 解相吾 解文博
责任编辑 蒋 亮
 - ◆ 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>
北京楠萍印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 16
字数: 405千字
印数: 1—3000册
 - 2008年11月第1版
2008年11月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-18725-3/TN

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



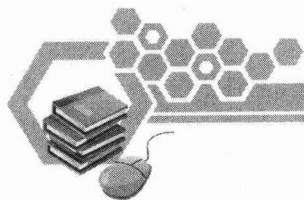
编 委 会

(按姓氏笔画排序)

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 马晓明 | 王钧铭 | 韦泽训 | 刘建成 |
| 孙社文 | 孙青华 | 朱祥贤 | 严晓华 |
| 吴柏钦 | 张立科 | 李斯伟 | 周训斌 |
| 武凤翔 | 宫锦文 | 黄柏江 | 惠亚爱 |
| 滑 玉 | 蒋青泉 | 谭中华 | |

执行编委：蒋 亮

前言



通信电子电路是通信与信息类专业一门重要的专业基础课，具有很强的通用性和实践性。然而，与本专业配套的通信电路教材却为数不多，给教学工作和人才培养造成一定困难。目前一些院校采用高职版《高频电子线路》作为教材，虽然学习难度不大，但很多知识与现代通信系统中的实际应用结合不紧，操作性不强。本书正是作者在这种情况下结合实际需要编写的。本书不但完整地介绍了通信电子电路的工作原理，同时结合移动通信设备的实际电路进行了分析。希望本书的出版对所有电子通信类专业的学生和有关工程技术人员有所帮助。

本书将高频理论与通信技术实际相结合，从模拟通信系统的基本概念和原理入手，由浅入深地介绍通信电路各功能单元电路的结构组成和工作原理，并对通信设备中整机电路进行全面分析，使广大学生和读者通过本书的学习，掌握通信电路的理论知识，提高专业实践的综合应用能力。各章内容重点突出，由概念到理论再到实践，深入浅出，结合实例进行电路分析，使学生在理论知识指导下理解实际电路，比纯理论学习效果更好。

本书在编写过程中，遵循教育部提出的高职高专教育“以应用为目的，以必需、够用为度”的原则，减少复杂的理论分析和推导，避免烦琐的数学计算，内容全面，结构合理，突出实用性，强调实践性，旨在培养学生分析和解决实际问题的能力。

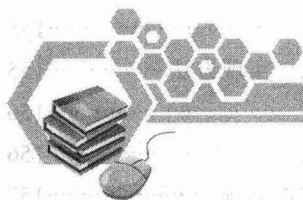
本书主要由解相吾、解文博编写。徐小英、李敏、陈武东、袁世来、钟科科、吴嘉明、杨远辉、莫煜斌、卓伟平等为本书的资料收集和图片处理付出了辛勤的劳动，在此向他们深表谢意。

本书在编写过程中参考了大量的文献和资料，人民邮电出版社对本书的出版给予了大力支持，在此特向付出辛勤劳动的工作人员表示衷心的感谢。

由于作者水平和经验有限，书中难免有错误和不当之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2008年9月



| | |
|------------------------------|----------------------------------|
| 第 1 章 通信的基本概念 1 | 第 3 章 谐振功率放大器 50 |
| 1.1 通信系统的概念..... 1 | 3.1 概述.....50 |
| 1.1.1 终端设备..... 2 | 3.2 谐振功率放大器的工作原理.....52 |
| 1.1.2 传输系统..... 2 | 3.2.1 丙类谐振功率放大器的工作 原理.....52 |
| 1.2 无线电基本概念..... 3 | 3.2.2 丙类谐振功率放大器的性能 分析.....53 |
| 1.2.1 无线电波的传播..... 3 | 3.2.3 丙类谐振高频功率放大器的 功率.....59 |
| 1.2.2 无线电波的频段划分..... 4 | 3.3 谐振功率放大器电路.....61 |
| 1.2.3 无线电波的传播特性..... 5 | 3.3.1 直流馈电电路.....61 |
| 1.2.4 无线电波的调制与解调..... 9 | 3.3.2 输入输出匹配网络.....62 |
| 1.3 无线通信系统的组成..... 11 | 3.3.3 实用电路举例.....63 |
| 1.3.1 广播发射机与接收机..... 11 | 3.4 功率合成器.....65 |
| 1.3.2 发送设备的主要技术指标..... 13 | 3.4.1 传输线变压器.....65 |
| 1.3.3 接收设备的主要技术指标..... 15 | 3.4.2 功率合成器和分配器.....69 |
| 本章小结..... 16 | 3.4.3 功率合成电路应用举例.....73 |
| 练习与思考..... 17 | 3.5 倍频器.....76 |
| 第 2 章 小信号放大器 18 | 3.5.1 丙类倍频器的工作原理.....76 |
| 2.1 谐振回路..... 18 | 3.5.2 集成功率放大电路举例.....78 |
| 2.1.1 串联谐振电路..... 18 | 本章小结.....80 |
| 2.1.2 并联谐振电路..... 22 | 练习与思考.....81 |
| 2.1.3 耦合谐振电路..... 25 | 第 4 章 正弦波振荡器 82 |
| 2.2 集中选频调谐网络..... 26 | 4.1 反馈振荡器的工作原理.....83 |
| 2.2.1 石英晶体滤波器..... 27 | 4.1.1 振荡的基本原理.....83 |
| 2.2.2 陶瓷滤波器..... 31 | 4.1.2 振荡的起振和平衡条件.....83 |
| 2.2.3 声表面波滤波器..... 33 | 4.1.3 振荡器的频率稳定性.....85 |
| 2.2.4 螺旋滤波器..... 35 | 4.2 LC 振荡器.....87 |
| 2.3 射频放大器..... 37 | 4.2.1 电容三点式振荡器(考毕兹 电路).....88 |
| 2.3.1 单调谐放大器..... 37 | 4.2.2 电感三点式振荡器(哈特莱 电路).....91 |
| 2.3.2 双调谐放大器..... 40 | 4.2.3 改进型电容三点式振荡器.....92 |
| 2.3.3 多级调谐放大器..... 42 | |
| 2.3.4 场效应管射频放大器..... 46 | |
| 2.3.5 调谐放大器的稳定性..... 47 | |
| 本章小结..... 48 | |
| 练习与思考..... 49 | |

| | | | |
|---------------------------|------------|--------------------------|------------|
| 4.3 集成电路振荡器 | 94 | 6.3 鉴频电路 | 155 |
| 4.3.1 差分对管振荡器 | 94 | 6.3.1 鉴频特性与实现方法 | 155 |
| 4.3.2 运放振荡器 | 96 | 6.3.2 相位鉴频 | 156 |
| 4.4 石英晶体振荡器 | 97 | 6.3.3 比例鉴频 | 156 |
| 4.4.1 石英晶体及其特性 | 97 | 6.3.4 脉冲计数式鉴频 | 157 |
| 4.4.2 晶体振荡器电路 | 98 | 6.4 数字调制与解调 | 158 |
| 4.5 压控振荡器 | 101 | 6.4.1 幅度调制与解调 | 158 |
| 4.5.1 变容管压控振荡器的基本工作 原理 | 101 | 6.4.2 频率调制与解调 | 160 |
| 4.5.2 晶体压控振荡器 | 104 | 6.4.3 相位调制与解调 | 166 |
| 4.5.3 应用实例 | 105 | 本章小结 | 171 |
| 本章小结 | 106 | 练习与思考 | 171 |
| 练习与思考 | 106 | 第7章 自动控制电路 | 173 |
| 第5章 调幅、检波与混频电路 | 110 | 7.1 自动控制电路概述 | 173 |
| 5.1 频谱搬移电路原理 | 110 | 7.1.1 自动增益(电平)控制电路 | 174 |
| 5.1.1 相乘器及其频率变换作用 | 110 | 7.1.2 自动频率控制电路 | 178 |
| 5.1.2 调幅与检波的基本原理 | 111 | 7.2 锁相环路 | 179 |
| 5.2 振幅调制电路 | 115 | 7.2.1 锁相环的基本原理 | 179 |
| 5.2.1 低电平调幅电路 | 115 | 7.2.2 锁相环路的主要特点 | 180 |
| 5.2.2 高电平调幅电路 | 118 | 7.2.3 锁相环路的组成部分 | 181 |
| 5.3 振幅解调(检波)电路 | 120 | 7.2.4 集成锁相环电路 | 184 |
| 5.3.1 二极管包络检波电路 | 121 | 7.2.5 锁相环路的应用 | 185 |
| 5.3.2 同步检波电路 | 124 | 7.3 频率合成电路 | 188 |
| 5.4 混频电路 | 126 | 7.3.1 频率合成器的主要技术指标 | 189 |
| 5.4.1 相乘混频电路 | 127 | 7.3.2 频率直接合成器 | 189 |
| 5.4.2 二极管混频电路 | 128 | 7.3.3 频率间接合成法(锁相环 路法) | 190 |
| 5.4.3 三极管混频电路 | 130 | 7.3.4 直接数字频率合成器 | 193 |
| 5.4.4 混频干扰 | 134 | 7.3.5 集成频率合成器 | 194 |
| 本章小结 | 136 | 本章小结 | 196 |
| 练习与思考 | 137 | 练习与思考 | 197 |
| 第6章 角度调制与解调 | 139 | 第8章 应用电路分析 | 198 |
| 6.1 基本概念 | 139 | 8.1 接收机电路分析 | 200 |
| 6.1.1 瞬时频率和附加相位 | 139 | 8.1.1 超外差接收机 | 200 |
| 6.1.2 调频信号与调相信号 | 140 | 8.1.2 二次变频接收机 | 201 |
| 6.1.3 调角信号的频谱与带宽 | 144 | 8.1.3 零中频接收机 | 202 |
| 6.2 调频电路 | 147 | 8.1.4 宽带零中频接收机 | 203 |
| 6.2.1 调频的方法与基本原理 | 147 | 8.1.5 数字中频接收机 | 203 |
| 6.2.2 直接调频电路 | 148 | 8.1.6 锁相接收机 | 204 |
| 6.2.3 间接调频电路 | 153 | 8.2 发射机电路分析 | 205 |



| | | | |
|--|------------|--------------------------|-----|
| 8.2.1 普通调幅发射机····· | 205 | 9.3.5 思考题····· | 233 |
| 8.2.2 平衡调幅发射机····· | 206 | 9.4 实训 4: 检波电路····· | 233 |
| 8.2.3 间接调制发射机····· | 206 | 9.4.1 实训目的····· | 233 |
| 8.2.4 直接调制发射机····· | 207 | 9.4.2 实训仪器设备····· | 233 |
| 8.2.5 PLL 调制发射机····· | 208 | 9.4.3 电路组成····· | 233 |
| 8.3 手机电路分析····· | 210 | 9.4.4 实训内容与步骤····· | 234 |
| 8.3.1 双频手机的电路组成····· | 210 | 9.4.5 思考题····· | 236 |
| 8.3.2 GSM 手机射频部分的电路 结构····· | 211 | 9.5 实训 5: 三极管混频电路····· | 236 |
| 8.3.3 MOTOROLA L2000 手机射频 电路分析····· | 213 | 9.5.1 实训目的····· | 236 |
| 本章小结····· | 224 | 9.5.2 实训仪器设备····· | 236 |
| 练习与思考····· | 225 | 9.5.3 电路组成····· | 236 |
| 第 9 章 通信电路实训····· | 226 | 9.5.4 实训内容与步骤····· | 237 |
| 9.1 实训 1: 射频放大电路····· | 226 | 9.5.5 思考题····· | 238 |
| 9.1.1 实训目的····· | 226 | 9.6 实训 6: 变容二极管调频电路····· | 239 |
| 9.1.2 实训仪器设备····· | 226 | 9.6.1 实训目的····· | 239 |
| 9.1.3 电路组成····· | 227 | 9.6.2 实训仪器设备····· | 239 |
| 9.1.4 实训内容与步骤····· | 227 | 9.6.3 电路组成····· | 239 |
| 9.1.5 思考题····· | 228 | 9.6.4 实训内容与步骤····· | 239 |
| 9.2 实训 2: 功率放大电路····· | 228 | 9.6.5 思考题····· | 241 |
| 9.2.1 实训目的····· | 228 | 9.7 实训 7: 比例鉴频电路····· | 241 |
| 9.2.2 实训仪器设备····· | 228 | 9.7.1 实训目的····· | 241 |
| 9.2.3 电路组成····· | 229 | 9.7.2 实训仪器设备····· | 241 |
| 9.2.4 实训内容与步骤····· | 229 | 9.7.3 电路组成····· | 241 |
| 9.2.5 思考题····· | 230 | 9.7.4 实训内容与步骤····· | 242 |
| 9.3 实训 3: 振荡电路····· | 230 | 9.7.5 思考题····· | 243 |
| 9.3.1 实训目的····· | 230 | 9.8 实训 8: 锁相环电路····· | 244 |
| 9.3.2 实训仪器设备····· | 230 | 9.8.1 实验目的····· | 244 |
| 9.3.3 电路组成····· | 231 | 9.8.2 实训仪器设备····· | 244 |
| 9.3.4 实训内容与步骤····· | 231 | 9.8.3 电路组成····· | 244 |
| | | 9.8.4 实训内容与步骤····· | 245 |
| | | 9.8.5 思考题····· | 246 |

第1章

通信的基本概念

【本章内容提要】 本章主要介绍无线电波的基本概念、传播特性及其调制方式，对无线电通信系统的基本组成进行了全面地说明，详细介绍了发射设备和接收设备的工作原理。

【本章学习重点与要求】 本章重点掌握无线电发射设备和接收设备的基本工作原理，熟悉电路构成框图，了解框图中各单元电路的主要功能和技术要求，掌握电磁波的基本传播方式和特点。

1.1 通信系统的概念

在人们的生活和工作中，离不开信息的交流与传递。通信使得人们能够克服时间和空间的障碍，准确而有效地交换和传递信息。信息常以某种方式依附于物质载体，借以实现存储、交换、处理变换和传输。传递或交换信息过程中所需的一切技术设备的总和称为通信系统。它主要由终端设备和传输系统组成。实际应用中的通信系统多种多样，它们在具体的结构和功能上各不相同，为了便于分析，可以抽象成如图 1-1 所示的模型，其基本组成包括信源、发送设备、信道、噪声源、接收设备和信宿等部分。

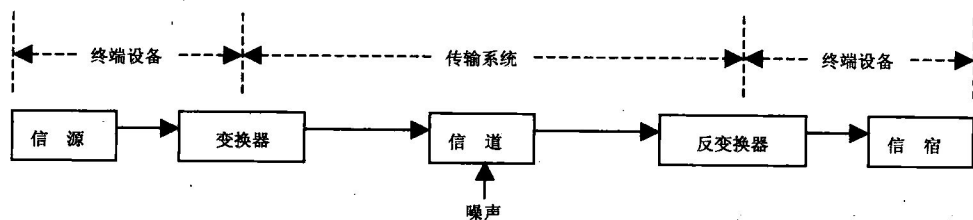


图 1-1 通信系统的基本模型



1.1.1 终端设备

终端设备是通信系统的“源头”和“终点”，除信源和信宿之外，还包括了一部分变换器和反变换器。其主要功能有二：一是发送端将发送的信息转变成适合信道上传输的信号，接收端则从信道上接收信号，并将其恢复成能被利用的信息；二是能产生和识别系统内所需的信令信号或规则，以便相互联系和应答。通信的基本形式是在信源与信宿之间建立一个传输或转移的信息通道，实现信息的传输。

1. 信源和信宿

信源是指产生各种信息（如语音、文字、图像及数据等）的信息源，它可以是发出信息的人或机器（如电话机、计算机等）。不同的信息源构成不同形式的通信系统。

信宿是信息传输的终点，也就是信息的接收者。

2. 变换器

变换器的作用是将信息源发出的信息按一定的要求进行变换，成为适合在信道中传输的信号。对应不同的信源和不同的通信系统，变换器有不同的组成和变换功能。例如在数字电话通信系统中，变换器包括送话器和模数变换器等，模数变换器的作用是将送话器输出的模拟话音信号经过模数变换、编码及时分复用处理后，变换成适合在数字信道中传输的信号。

变换器可以通过终端设备（如调制解调器）或边缘交换节点来实现。

反变换器的工作过程是变换器的逆工作过程。主要功能包括信号的解码、解调、放大、均衡和解密等。

1.1.2 传输系统

现代通信系统中常见的传输系统有：无线电传输系统、数字微波系统、卫星传输系统和光纤传输系统等。

传输信道简称信道。信道是信息传输介质和中间设备的总称。不同的信源形式所对应的变换处理方式不同，与之对应的信道形式也会不同。通常的情况下，信道的划分有两种方式：按传输介质的不同可分为无线信道和有线信道；按传输信号形式的不同可分为模拟信道和数字信道。

1. 无线传输信道

无线传输信道中信息主要是通过自由空间进行传输的，但必须通过发射机系统、发射天线系统、接收天线系统和接收机系统才能使携带信息的信号正常传输，从而组成一条无线传输信道。

长波信道：所使用的频率在 300kHz 以下，波长在 1 000m 以上。

中波信道：所使用的频段为 0.3 ~ 3MHz，波长为 100 ~ 1 000m。

短波信道：所使用的频段为 3 ~ 30MHz，波长为 10 ~ 100m，也称为高频（HF）信道。

超短波信道：所使用频率范围通常认为是 30 ~ 3 000MHz。更细一些划分，其中 30 ~ 300MHz



称为甚高频 (VHF), 300 ~ 3 000MHz 称为特高频 (UHF)。

微波信道: 所使用频率在 3 000MHz 以上, 通常就泛称为微波, 它在现代通信系统中占有重要地位。

卫星信道: 卫星信道是指利用人造地球卫星作为中继站转发无线电信号, 在多个地球站之间进行通信的信息传输信道。

散射信道: 在现代通信系统的微波通信方式中, 还常用散射信道。散射信道利用对流层和电离层的不均匀性或流星余迹, 对于一定仰角的电磁波射束在上层空间中, 有一部分电磁波能量可回到地面而被接收到的散射现象, 构成散射信道。

2. 有线传输信道

在有线传输信道中, 电磁波是沿有形介质传播的, 有形介质通常是构成直接信息流通的通路, 适合于基带传输或频带传输。传输语音信号的电话网、传输数据信号的计算机网和传输视频信号的有线电视网是最常见的有线信道。

平衡电缆: 也称双绞线, 每对信号传输线间的距离比明线小, 而且包扎在绝缘体内。

同轴电缆: 用来构建容量较大的有线信道。常用的有两种: 一种是外径为 4.4mm 的细同轴电缆; 另一种是外径为 9.5mm 的粗同轴电缆。

光纤信道: 光纤信道是以光波为载波, 以光导纤维 (光纤) 为传输介质进行通信的通信信道。

有线信道中, 除了具有各种导引线外, 要完成长距离的信息传输, 还必须包括再增音和均衡处理。

1.2 无线电基本概念

自无线电发明以来, 信息传输就一直是它的首要任务。无线电通信的历史可以追溯到 20 世纪初, 1896 年马可尼成功实现了无线电报通信, 开创了无线电通信的先河。随着电子管、晶体管的发明和应用, 促进了通信设备的飞速发展, 实现了把微弱的电信号进行放大, 从而把电信号传送到更为遥远的地方。人类跨入 21 世纪, 已开始从工业化社会向信息社会过渡。通信技术是信息化社会的基础, 尤其是移动通信已经成为现代通信中发展最为迅速的一种通信手段。要使通信的一方或双方在移动中实现通信, 需要采用无线电通信方式。

1.2.1 无线电波的传播

学习物理时我们知道, 凡有交变电流的导线周围, 有变化的磁场存在, 变化的磁场引起变化的电场, 变化的电场又在它周围更远的地方引起变化的磁场。磁场、电场不断地互相交替产生, 向四周空间传播 (辐射) 的电磁场, 叫做电磁波。电磁波的辐射能力与导线的长短和形状有关。用来辐射电磁波的金属导线称为天线。当两导线的距离很近、电流方向相反时, 两导线所产生的感应电动势几乎可以抵消, 因而辐射很微弱; 如果将两导线张开, 当两导线的电流方向相同, 两导线所产生的感应电动势方向相同, 因而辐射较强。当导线的长度远小于波长时, 导线的电流很小, 辐射很微弱; 当导线的长度增大到可与波长相比拟时, 导线上的电流就大大增加, 因而就能形成较强的辐射。





一般来说,无线电波是指频率在 3 000GHz 以下的,可以不通过导线、人工波导等载体在自由空间(包括空气和真空)传播的电磁波。无线电波的传输介质主要有地表、对流层、电离层等,传输介质电特性对不同频段的无线电波的传播有着不同的影响。

1. 地波传播

地波传播是指电磁波沿地球表面的绕射传播。其特点是信号较为稳定,但衰减随着频率的升高、传播距离的增加而迅速增大。地波传播通常用于近距离长波广播、中波调幅广播和电力载波通信,一般不用作远距离通信。

2. 天波传播

天波传播是指电磁波经电离层反射的传播。其特点是传输损耗小、能以较小的功率实现远距离通信或靠地波难以实现的极短距离通信,但信号不够稳定,衰落和干扰严重。

3. 空间波传播

空间波传播是指电磁波在大气层的底层传播。其发射与接收天线必须在视距范围内(约 50km,但可通过增加天线高度来增大通信距离),常用于频率在 30MHz 以上的调频广播、电视信号发射、超短波通信和移动通信、微波通信。在一些特殊情况下,通过一系列的绕射、折射、反射和散射,其传播距离也能超过视距。

4. 对流层散射传播

对流层距地面约 10km,内部既存在规则的片状或层状气流,又存在类似水流中旋涡的不规则不均匀气流。电波通过时会产生反射、折射和散射等,使一部分能量(相当弱)传播到接收端。只有超短波能利用对流层进行远距离散射传播,适用于微波中继难以实现的地区,但因其传播损耗很大需采用大功率发信机、高灵敏度接收机和高增益天线。

5. 外球层传播

外球层(外层空间)传播是指电磁波由地面发出或返回,经低空大气层和电离层而到达地球外层空间的传播方式。外球层距地面约 900 ~ 1 200km。外球层传播主要用于宇宙探测、卫星通信等。

1.2.2 无线电波的频段划分

空间无线电波所占用的频率统称为无线电频谱。它是一种特殊的自然资源,是无线电技术发展的基础和前提条件,也是现代社会赖以生存的基本要素之一。

根据国际电信联盟(ITU)制定的《无线电规则》,无线电波划分为不同频段,每个频段用于一个或多个具有相似特性的业务,如表 1-1 所示。

表 1-1

无线电波的频段划分

| 频段名称 | 频段范围 | 波长名称 | 波长范围(m) | 应用领域 |
|----------|----------|------|------------------|------|
| 极低频(ELF) | 3 ~ 30Hz | 极长波 | $10^8 \sim 10^7$ | |

续表

| 频段名称 | 频段范围 | 波长名称 | 波长范围 (m) | 应用领域 | |
|-----------|----------------|------|------------------|------------------------|------------|
| 超低频 (SLF) | 30 ~ 300Hz | 超长波 | $10^7 \sim 10^6$ | 海底通信、电报 | |
| 特低频 (ULF) | 300 ~ 3 000Hz | 特长波 | $10^6 \sim 10^5$ | 数据通信、电话 | |
| 甚低频 (VLF) | 3 ~ 30kHz | 甚长波 | $10^5 \sim 10^4$ | 导航、载波电报和电话、频率标准 | |
| 低频 (LF) | 30 ~ 300kHz | 长波 | $10^4 \sim 10^3$ | 导航、电力通信、地下通信 | |
| 中频 (MF) | 300 ~ 3 000kHz | 中波 | $10^3 \sim 10^2$ | 广播、业务、移动通信 | |
| 高频 (HF) | 3 ~ 30MHz | 短波 | $10^2 \sim 10$ | 广播、军用、国际通信 | |
| 甚高频 (VHF) | 30 ~ 300MHz | 米波 | 10 ~ 1 | 电视、调频广播、模拟移动通信 | |
| 特高频 (UHF) | 300 ~ 3 000MHz | 微波 | 分米波 | $1 \sim 10^{-1}$ | 电视、雷达、移动通信 |
| 超高频 (SHF) | 3 ~ 30GHz | | 厘米波 | $10^{-1} \sim 10^{-2}$ | 卫星通信、微波通信 |
| 极高频 (EHF) | 30 ~ 300GHz | | 毫米波 | $10^{-2} \sim 10^{-3}$ | 射电天文、科学研究 |
| 至高频 | 300 ~ 3 000GHz | | 丝米波 | $10^{-3} \sim 10^{-4}$ | |

1.2.3 无线电波的传播特性

无线电波在传播过程中会产生能量损耗，接收机的接收功率随距离增加而减小的现象被认为是路径损耗。多数移动通信系统工作在城区，发射机和接收机之间无直接视距路径，但因高层建筑的影响产生能量损耗，称为绕射损耗。此外，由于不同物体的多路径反射，经过不同长度路径的电波相互作用引起的能量损耗称为多径损耗，同时随着发射机和接收机之间距离的不断增加会引起电波强度的衰减。如果接收天线在大于几十米或几百米距离上移动的话，使接收信号中的场强变化被称为阴影效应。

1. 多径传播

无线电波传播的机理是多种多样的，发射机天线发出的无线电波，通过不同的路径到达接收机，称为多径传播，如图 1-2 所示。

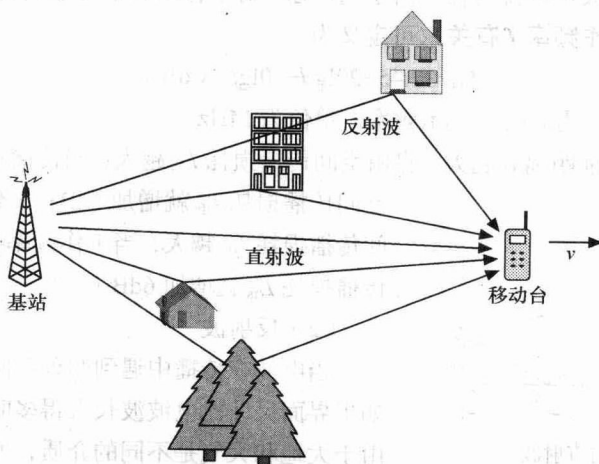


图 1-2 电波的多径传播

直射是指电磁波从发射天线发出,经大气或某一介质直接到达接收天线的现象。然而,电磁波不可能在无限大的空间自由传播,在传播过程中往往会遇到性质不同的各种障碍物,从而产生反射、折射、绕射和吸收现象,使之被衰减、放慢或使传播路径和相位发生改变。

反射是指当电波传播遇到比波长大得多的物体而返回的现象,反射发生于地球表面、建筑物和墙壁表面等。

折射是指电磁波在介质分界面传播方向偏折而进入另一种介质传播,或在同类介质中由于介质本身的不均匀性,使传播方向改变的现象。

电磁波在传播过程中,由于低层大气并非均匀介质,它的温度、湿度以及气压都会随时间和空间而发生变化,因此会产生折射和吸收现象。

绕射是指电磁波在传播过程中绕过障碍物到达接收点的现象。

当无线电波的频率 $f > 30\text{MHz}$ 时,典型的传播路径如图 1-3 所示。沿路径①从发射天线直接到达接收天线的电磁波称之为直射波,它是 VHF 和 UHF 频段的主要传播方式;沿路径②的电磁波经过地面反射到达接收机的电波称之为地面反射波;沿路径③的电磁波沿地球表面传播的电波,称之为地表面波,由于地表面波的损耗随频率升高而急剧增大,传播距离迅速减小,因此,在 VHF 和 UHF 频段的地表面波的传播可以忽略不计。

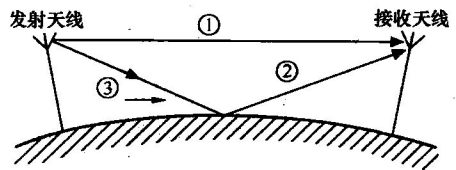


图 1-3 传播路径



在蜂窝移动通信系统中,电磁波遇到各种障碍物时会产生反射和散射现象,会对直射波造成干涉,即产生多径衰落现象。影响电波传播的 3 种基本传播机制是反射波、绕射波和散射波。

(1) 直射波

直射波传播可按自由空间传播来考虑。指天线周围为无限大真空时的电磁波传播,它是理想传播条件。电磁波在自由空间传播时,其能量既不会被障碍物所吸收,也不会产生反射或散射。实际情况下,传播路径上没有障碍物阻挡,到达接收天线的地面反射信号场强也可以忽略不计,在这样的情况下,电磁波可以视为在自由空间传播。对于移动通信系统而言,自由空间传播损耗 L_{fs} 与传播距离 d 和工作频率 f 有关,可定义为

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \lg d + 20 \lg f \quad (\text{dB})$$

式中, d 表示距离,单位为 km; f 表示频率,单位为 MHz。

由上式可得出,传播距离 d 越大,自由空间传播损耗 L_{fs} 越大,当传播距离 d 加大一倍,自由空间传播损耗 L_{fs} 就增加 6dB;工作频率 f 越高,自由空间传播损耗 L_{fs} 越大,当工作频率 f 提高一倍,自由空间传播损耗 L_{fs} 就增加 6dB。

(2) 反射波

当电波在传播中遇到两种不同介质的光滑界面时,如果界面尺寸比电波波长大得多时,就会产生镜面反射。由于大地和大气是不同的介质,所以入射波会在界面上

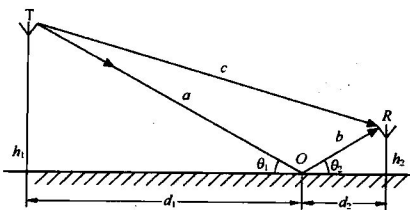


图 1-4 反射波与直射波

产生反射。反射发生于地球表面、建筑物和墙壁表面等,如图 1-4 所示。



(3) 绕射波

当接收机和发射机之间的无线路径被尖利的边缘阻挡时发生绕射。由阻挡表面产生的二次波散布于空间,甚至存在于阻挡体的背面。绕射使得无线电信号绕地球曲线表面传播,能够传播到阻挡物后面。

(4) 散射波

在 VHF、UHF 频段的移动信道中,电波传播除了上述的直射波和地面反射波之外,还需要考虑传播路径中各种障碍物所引起的散射波。散射波产生于粗糙表面、小物体或其他不规则物体。在实际移动通信环境中,接收信号比单独绕射和反射的信号要强。这是因为当电波遇到粗糙表面时,反射能量由于散布于所有方向,这就给接收机提供了额外的能量。如图 1-5 所示, h_b 为基站天线高度(一般为 30m), h_m 为移动台天线高度。直射波的传播距离为 d ,地面反射波的传播距离为 d_1 ,散射波的传播距离为 d_2 。移动台接收信号的场强由上述 3 种电波的矢量合成。

2. 信号衰落

无线通信中用户间靠无线电波来传送信息。当前,无线通信的频率范围在甚高频(VHF, 30~300MHz)和特高频(UHF, 300~3 000MHz)之间。这个频段的特点是:传播距离在视距范围内,通常为几十千米;天线短,抗干扰能力强;且以地表面波、电离层反射波、直射波和散射波等方式传播,受地形地物影响很大,导致其传输特性变化十分剧烈。以上原因使移动台接收到的电波一般是直射波和随时变化的绕射波、反射波、散射波的叠加,这样就造成所接收信号的电场强度起伏不定,最大可相差 20~30dB。这种现象称为衰落。这种衰落是由多径引起的,所以称为多径衰落。多径衰落信号的振幅服从瑞利分布,所以多径衰落又称为瑞利衰落。多径衰落使信号电平起伏不定,严重时将影响通话质量。

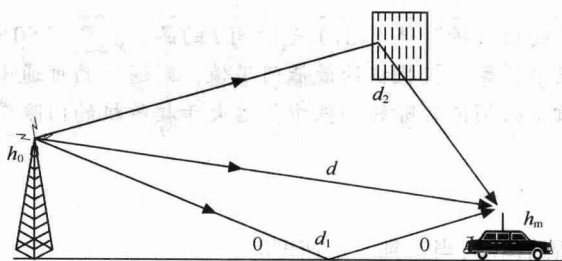


图 1-5 移动信道的传播路径

在移动通信过程中,由于散射体很多,所以接收点所接收到的信号场强是随机起伏变化的,根据场强特性曲线的起伏变化情况,信号衰落又有快慢之分。场强特性曲线的瞬时值呈快速起伏变化的衰落称快衰落;场强特性曲线的中值呈慢速起伏变化的衰落称慢衰落。典型信号衰落特性如图 1-6 所示。

在图中,横坐标是时间或距离($d=vt$, v 为移动速度),纵坐标是相对信号电平(以 dB 计),变化范围约为 30~40dB。图中虚线表示的是信号局部中值,其含义是在局部时间中,信号电平大于或小于该中值的时间各为 50%。由于移动台的不断运动,电波传播路径上的地形、地物是不断变化的,因而局部中值也是变化的。这种变化造成了信号衰落。

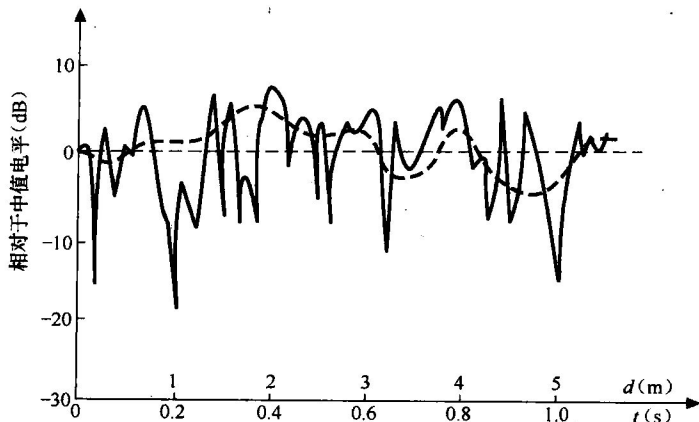


图 1-6 典型信号衰落特性

慢衰落也称长期衰落。由于电波传播路径上遇到建筑物、树林等障碍物阻挡，在阻挡物的后面形成的电磁波阴影区。阴影区的信号电场强度较弱，当移动台在穿过阴影区时，就会造成接收信号电场强度中值的缓慢变化，出现阴影效应。阴影效应引起的衰落一般服从正态分布，故有时又称其为正态（高斯）衰落。陆地移动信道的主要特征是多径传播。传播过程中同样会遇到很多建筑物、树木以及起伏的地形，引起能量的吸收和穿透以及电波的反射、散射及绕射等，这样，使移动信道充满了干扰。

快衰落也称短期衰落。主要因移动台附近的散射体（地形、地物和移动体等）所引起的多径传播信号在接收点相叠加，造成接收信号快速起伏。

与多径传播引起的快衰落不同，电磁波传播慢衰落主要由阴影效应和大气折射所引起。



重要提示 移动台接收的信号场强值 (dB) 是时间 t 的函数。具有 50% 概率的场强值称为场强中值。若场强中值等于接收机的最低门限值，则通信的可通率为 50%。因此，为了保证正常的通信，必须使实际的场强中值远大于接收机的门限值。

3. 多普勒频移效应

由于移动用户在不断的运动，当达到一定速度时，如超音速飞机，固定点接收到的载波频率将随运动速度 v 的不同，产生不同的频移，称这种现象为多普勒效应。多普勒效应使接收点的信号场强振幅、相位随时间、地点而不断地变化，如图 1-7 所示。

多普勒频移与移动物体的运动速度 v 、接收信号载波的波长 λ 、电波到达的入射角 θ 有关，即

$$f_d = (v/\lambda)\cos\theta$$

运动方向面向地面接收站， f_d 为正值；反之， f_d 为负值。并且，工作频率越高，频移越大，对信号传输的影响越大。在高速移动通信系统中，多普勒频移可影响 300Hz 左右的语音，产生地面接收附加调频噪声，出现失真。

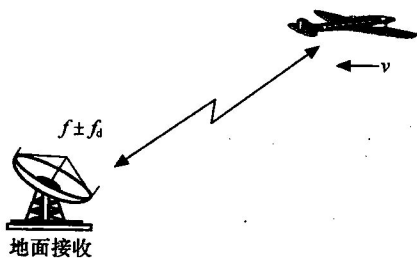


图 1-7 多普勒效应



重要提示

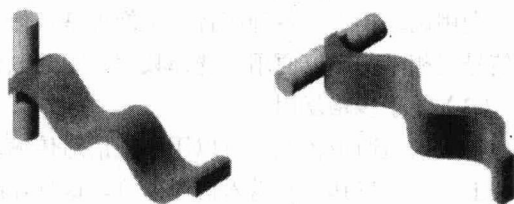
为防止多普勒效应对通信系统的影响,通常在地面设备的接收机需要采用“锁相技术”,加入自动频率跟踪系统,即接收机在捕捉到高速移动物体发来的载频信号之后,当发来的载频信号随速度 v 变化时,地面接收机本振信号频率跟着变,这样就可以不使信号丢失;另外,还可以利用其窄带性能,把淹没在噪声中的微弱信号提取出来。移动通信设备都毫无例外地采用锁相技术。

4. 极化现象

无线电波在空间传播时,其电场矢量和磁场矢量的振幅总是维持特定方向并按一定的规律而变化,这种现象称为无线电波的极化。无线电波的电场方向称为电波的极化方向。其中电场、磁场跟无线电波的传播方向是相互垂直的。

极化是描述电磁场强矢量空间指向的一个辐射特性,当没有特别说明时,通常以电场矢量的空间指向作为电磁波的极化方向,而且是指在该天线的最大辐射方向上的电场矢量来说的。电场矢量和传播方向构成的平面叫极化平面。

电场矢量在空间的取向在任何时间都保持不变的电磁波叫直线极化波。有时以地面作参考,将电场矢量方向与地面平行的波叫水平极化波,与地面垂直的波叫垂直极化波,如图 1-8 所示。由于水平极化波和入射面垂直,故又称正交极化波;垂直极化波的电场矢量与入射平面平行,称之为平行极化波;电场矢量还可以在空间以旋转的方式传播,如果在传播一个波长时电场矢量旋转了 360° ,而且场强的大小恒定,则这种极化称之为圆极化。



(a) 垂直极化波

(b) 水平极化波

图 1-8 电磁波的极化方向

无线电广播采用垂直极化波(电场方向垂直地面);电视采用水平极化波(电场方向与地面平行);卫星通信采用平面圆极化波(电场振幅不随时间变化,方向以等角速度旋转)。

1.2.4 无线电波的调制与解调

电磁波的频率很高,传播速度与光速一样,可达 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$,具有较强的辐射力和较长的传播距离,但人耳却听不到。

人耳能听到的振动频率是 $20 \text{ Hz} \sim 20 \text{ kHz}$,称之为声频,声音的传播速度为 340 m/s ,受环境影响较大,衰减很快,所以不能传送到很远的地方。这种未经调制的信号就是基带信号。基带信号既可以是模拟信号,也可以是数字信号。

基带信号只能通过架空明线、电缆等有线信道直接传输,不可能在无线信道中直接传输。即使可以在有线信道传输,但一对线路只能传送一路信号,这样不能充分利用信道资源。为使基带信号能够像在无线信道那样的频带信道传输,或使有线信道上同时传输多路基带信号,就需要采用各种调制技术。

在调制过程中,将声音通过话筒转换成电信号,装载到具有强辐射力、波长短、频率很高的电磁振荡波上,然后借助天线发射出去。经这样装载的声音就可以传播得很远。