

高等职业教育精品工程规划教材·通信专业

# 通信电子线路

张玲丽 主 编  
宋烈武 主 审



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等职业教育精品工程规划教材

# 通信电子线路

张玲丽 主编

宋烈武 主审

電子工業出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书在内容的编写和安排上突出职业技术教育以应用为目的,以“必需及够用”为度的特点,重点分析典型的应用电路及电路中元器件的作用,并通过电路仿真使读者轻松地学会简单电路的设计、电路调整及电路故障的排除方法。

全书共 5 章,内容包括:基础知识、高频小信号放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制、检波及混频、频率调制与解调、反馈控制电路及 MultiSim 仿真实训、组装对讲机和收音机的综合实训。每章都有适量的思考练习题,将理论学习与实践能力的训练紧密地结合在一起。

本书可作为高等职业院校电子、通信、计算机等专业的教材,也可供从事电子技术类专业的工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

通信电子线路 / 张玲丽主编. —北京: 电子工业出版社, 2012.8

高等职业教育精品工程规划教材

ISBN 978-7-121-16866-6

I. ①通… II. ①张… III. ①通信系统—电子电路—高等职业教育—教材 IV. ①TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 078333 号

策划编辑: 郭乃明

责任编辑: 郝黎明 文字编辑: 裴 杰

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 11.75 字数: 300 千字

印 次: 2012 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 23.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 前 言

本书是为高等职业院校电子信息类及其他相近专业的学生编写的，教材紧密结合高等职业院校学生的知识基础，以理解概念、实现功能为基本要求，剔除复杂的理论分析，加强实用性知识的讲解，将理论与实践紧密结合，突出了学生动手能力及实践能力的培养。本书以无线电发射与接收机的工作原理为主线，精讲无线电发射机及接收机中的单元电路，以讲透原理为宗旨，章节的安排注重由浅入深。本书特色如下：

1. 为学生学习专业课程提供必要的基础支撑，使学生具备运用专业基础理论与方法，分析和解决实际问题的能力。将对学习兴趣的引导放在首位，用通俗易懂的语言让学生掌握课程内容体系。

2. 各章内容既有各自的独立性，又有相互联系的系统性和完整性，同时，考虑到现代通信技术、测量技术和集成电路技术的发展和广泛应用，本书对电路的介绍尽可能地接近实际应用中的情况，增加了集成电路的应用实例，但在基本的电路分析方面仍以分立电路为主。

3. 注意本课程与前后课程的衔接，对前面课程介绍的不够而本课程又用得较多的内容适当予以重复，对后续课程用得较多的内容予以强调。

4. 注重教材的实用性，尽可能从工程实际的角度分析问题。选取了大量的实用电路并对其进行了分析，突出介绍了与学生应用能力有关的应用实例，以此增强学习分析问题和解决问题的能力。

5. 书中每个单元电路都引入了 Multisim 仿真软件，使原本难懂、枯燥的知识变得生动、形象、易于理解，激发了学生对本课程的学习兴趣。

本书由张玲丽担任主编，宋烈武负责主审。全书由张玲丽统稿。第1章由李雪编写，第2、3、4章由张玲丽编写，第5章由曹艳编写，在此表示感谢。在本书的编写过程中从书后所列的参考文献中吸取了宝贵的意见，本书编者谨向参考文献的作者表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

编 者

2012年7月

# 目 录

第 1 章 跨入通信电子线路之门——大框架和准备知识	(1)
1.1 通信系统的基本特性	(1)
1.1.1 通信系统的一般组成	(1)
1.1.2 通信系统的分类	(3)
1.1.3 无线通信系统	(4)
1.1.4 无线电波的传播	(5)
1.2 通信电子线路中的元器件	(8)
1.2.1 高频无源元件	(8)
1.2.2 高频有源元器件	(10)
1.3 通信电子线路中的准备知识	(11)
1.3.1 RLC 的并联谐振回路	(11)
1.3.2 RLC 的串联谐振回路	(15)
1.3.3 负载和信号源内阻对并联谐振回路的影响	(17)
1.3.4 窄带无源阻抗变换网络	(18)
本章习题	(22)
第 2 章 让微弱信号大起来——认识信号放大器	(24)
2.1 高频小信号放大器	(24)
2.1.1 高频小信号放大器的分类	(24)
2.1.2 高频小信号放大器的质量指标	(25)
2.1.3 晶体管高频小信号 $y$ 参数等效电路	(26)
2.1.4 单管单调谐放大器	(27)
2.2 高频功率放大器	(33)
2.2.1 高频功率放大器概述	(33)
2.2.2 丙类高频功率放大器的组成及基本原理	(34)
2.2.3 丙类谐振功率放大器的工作状态	(37)
2.2.4 丙类谐振功率放大器的外部特性	(39)
2.2.5 谐振功率放大器电路的直流馈电线路	(43)
本章实训 1 高频小信号放大电路的仿真	(45)
本章实训 2 高频功率放大器的仿真	(46)
本章习题	(47)
第 3 章 让电信号自由翱翔——认识正弦波振荡器	(49)
3.1 反馈振荡器的工作原理	(49)
3.1.1 振荡器的组成	(50)

3.1.2	振荡的平衡条件和起振条件	(51)
3.1.3	振荡的稳定条件	(52)
3.1.4	振荡的建立过程	(53)
3.2	RC 正弦波振荡器	(54)
3.2.1	RC 串并联电路的选频特性	(54)
3.2.2	RC 桥式振荡器	(55)
3.2.3	可自行启动的 RC 振荡电路	(56)
3.3	LC 正弦波振荡器	(58)
3.3.1	三点式振荡器的工作原理	(58)
3.3.2	电感三点式振荡器 (Hartley)	(59)
3.3.3	电容三点式振荡器 (Colpitts)	(59)
3.3.4	改进型电容三点式振荡器	(60)
3.4	晶体振荡器	(62)
3.4.1	石英晶体谐振器	(62)
3.4.2	晶体振荡器电路	(65)
本章实训 1	电感反馈型 LC 正弦波振荡器的仿真	(67)
本章实训 2	电容反馈型 LC 正弦波振荡器的仿真	(69)
本章实训 3	晶体振荡器的仿真	(70)
本章习题		(71)
<b>第 4 章</b>	<b>换个样子传输信号——认识频率变换电路</b>	<b>(74)</b>
4.1	频率变换及模拟乘法器	(74)
4.1.1	非线性电路的分析方法	(74)
4.1.2	二极管电路	(77)
4.2	调幅	(85)
4.2.1	振幅调制信号分析	(86)
4.2.2	振幅调制电路	(93)
4.3	检波	(99)
4.3.1	同步检波电路	(99)
4.3.2	二极管峰值包络检波	(102)
4.4	混频	(108)
4.4.1	混频器原理及电路	(108)
4.4.2	混频器的干扰和非线性失真	(111)
4.5	调频与调相	(114)
4.5.1	概述	(114)
4.5.2	调频信号与调相信号	(115)
4.5.3	调频原理及调频电路	(120)
4.6	鉴频原理及电路	(128)
4.6.1	鉴频概述	(128)

---

4.6.2 鉴频原理 .....	(129)
4.6.3 鉴频电路 .....	(131)
本章实训 1 双边带调制及其同步检波的仿真 .....	(135)
本章实训 2 二极管包络检波电路仿真 .....	(136)
本章实训 3 环形二极管混频电路仿真 .....	(138)
本章实训 4 鉴频器电路的仿真 .....	(139)
本章习题 .....	(140)
<b>第 5 章 让电路自动调整性能——认识反馈控制电路 .....</b>	<b>(143)</b>
5.1 自动增益控制电路 .....	(144)
5.1.1 自动增益控制电路的工作原理 .....	(144)
5.1.2 AGC 的控制方法 .....	(146)
5.2 自动频率控制电路 .....	(147)
5.3 锁相环路 .....	(149)
5.3.1 锁相环路的基本组成 .....	(149)
5.3.2 锁相环路的相位模型 .....	(152)
5.3.3 锁相环路的工作过程 .....	(153)
5.3.4 锁相环路的应用 .....	(156)
本章实训 1 自动增益控制电路 .....	(159)
本章实训 2 锁相环路的应用 .....	(160)
本章习题 .....	(163)
<b>综合实训 对讲式收音机的制作与调试 .....</b>	<b>(165)</b>
实训 1 收音机电路图的识别 .....	(165)
实训 2 芯片资料解读 .....	(168)
实训 3 整机电路的装配 .....	(170)
实训 4 整机电路调试 .....	(173)
<b>附录 A 余弦脉冲分解系数表 .....</b>	<b>(176)</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>(179)</b>

# 第 1 章 跨入通信电子线路之门

## ——大框架和准备知识

人类社会总是离不开信息的传递，在古代，人们通过驿站、飞鸽传书、烽火报警、符号、身体语言、眼神、触碰等方式进行信息传递。到了今天，随着科学水平的飞速发展，相继出现了无线电、固定电话、移动电话、互联网甚至视频电话等各种通信方式。通信技术拉近了人与人之间的距离，提高了经济活动的效率，深刻地改变了人类的生活方式和社会。一般来说，通信是指人与人或人与自然之间通过某种行为或媒介进行的信息交流与传递，从广义上讲则是需要信息的双方或多方在不违背各自意愿的情况下采用各种方法，使用各种媒质，将信息从某方准确安全传送到另一方。

在各种通信方式中，电通信方式能使信息几乎在任意的通信距离上实现快速、准确、可靠的传递，因此获得了迅猛发展，以至于日常所说的通信几乎变成电通信的代名词。

本章主要介绍通信系统的组成，并为学生后面章节的学习提供必要的知识准备。

### 1.1 通信系统的基本特性

#### 1.1.1 通信系统的一般组成

本课程以通信（Communication）系统为主要对象，研究构成发送设备、接收设备的各单元电路、典型线路的工作原理。

广义上说，一切将信息从发送者传送到接收者的过程，均为通信的过程。实现这种信息传送过程的系统即为通信系统，通信系统组成框图如图 1-1 所示。

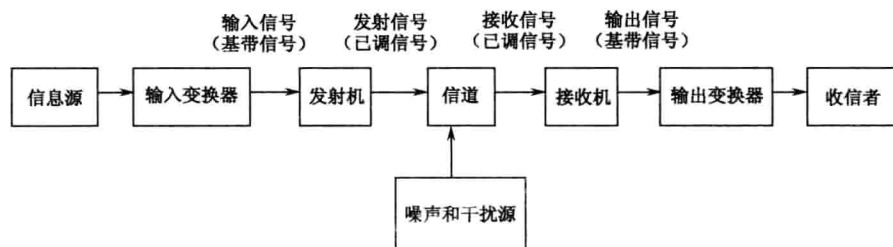


图 1-1 通信系统组成框图

#### 1. 信源、信宿

信源是信息的产生者，而信宿是信息的接收者，它们可以是人，也可以是机器终端。在通信系统中，信源和信宿通常是相互的。而信息的形式可以是音乐、语言、文字、图像等。



## 2. 输入变换器

输入变换器的主要任务是将信源提供的原始信息变换为电信号。当输入信息本身就是电信号时，输入变换器则可省略。该信号一般由零频附近的直流分量和低频信号组成，称为基带信号（Baseband）或携有信息的电信号，它可以是模拟信号，也可以是数字信号。如传声器（俗称话筒）、拾音器、电键、摄像机等。这里强调一下信号、信息，信号是信息的表现形式，是运载与传递信息的载体与工具，而信息是信号的具体内容，它蕴藏在信号之中。

## 3. 输出变换器

输出变换器的作用是将接收设备输出的电信号变换成原始信息提供给信宿。

## 4. 发送设备

发送设备的主要作用是调制和放大。调制是将基带信号变换成适合在信道中传输的频带信号（Passband Signal），具体方法是用基带信号去控制信息载体（载波）的某一参数，使该参数随着基带信号的变化而变化，可见，调制可将基带信号携带在载波的某一参数上。放大是指对信号的电压或功率进行放大、滤波等处理。

## 5. 接收设备

接收设备的任务是将通过通信信道传送到接收端的信号进行处理，恢复出与发送端相一致的基带信号，这种将接收信号恢复成基带信号的处理过程称为解调。解调是调制的逆过程。

## 6. 信道

信道是连接收发两端的信号通道，也称传输媒介。信道可分为两大类：有线信道和无线信道。不同的信号适合在不同的信道中传输。

## 7. 噪声和干扰

噪声和干扰是信道中噪声及分散在通信系统中其他各处噪声的集中表示。

本课程主要学习和研究通信系统中发送设备和接收设备。刚才已经介绍了发送设备和接收设备的主要作用：调制、解调和放大。由于信道的衰减，信号通过“长途跋涉”到达接收端后非常微弱（微伏数量级），必须经放大后才能解调，同时，由于信道中存在许多干扰，因此接收设备除具备很强的放大能力外，还必须具有很强的抑制干扰的能力，只有这样才能从众多干扰的包围中选择出有用信号。

为什么要调制？主要原因如下：

（1）缩短天线尺寸。自然界直接存在的信号大多是基带信号（未经调制的信号），频率很低，如人耳能听到的声音的频率范围大约在  $300\sim 3400\text{Hz}$ ，通常把这一频率范围称为音频范围。声波在空气中传播很慢，约为  $340\text{m/s}$ ，且衰减很快，不能传播很远。交变的电磁场可以利用天线向天空辐射，但要做到有效的辐射，天线的尺寸应和电磁波的波长相配，依据  $c = \lambda f$ ，音频的波长在  $10^5\sim 10^6\text{m}$ ，要制造尺寸相当的天线显然是不可能的。因此不能直接将音频信号辐射到空中。

将音频信号“装载”到更高的频率上，然后由天线辐射出去，是一个可以实现的设想。因为高频的波长在10~100m间，天线尺寸可以做得比较小。

(2) 实现多路复用。现实生活中，为了提高公路的利用率，采用多车道，车流在各自车道上平行运行，互不影响。同样的道理，为了提高信道的利用率，可通过调制将多路信号分别携带在不同的载波上（相当于将多辆汽车放在同一条公路的不同车道上），然后在同一个信道中传输，这样，一条信道可同时传输多路信号，提高了信道利用率。

(3) 随着信息化的程度的不断提高，频带资源越来越紧张，高频无线电电磁波可以提供更大的通信容量。

(4) 通过调制可有效地克服信道缺陷，提高信号的抗干扰能力。

## 1.1.2 通信系统的分类

通信的目的是传递消息，按照不同的分法，通信可分成许多类别，下面介绍几种较常用的分类方法。

### 1. 按传输介质分

按消息由一地向另一地传递时传输介质的不同，通信可分为两大类：一类称为有线通信，另一类称为无线通信。有线通信是指传输介质为架空明线、电缆、光缆、波导等形式的通信，其特点是介质能看得见、摸得着。无线通信是指传输消息的介质为看不见、摸不着的介质（如电磁波）的一种通信形式。通常，有线通信可进一步再分类，如明线通信、电缆通信、光缆通信等。无线通信常见的形式有微波通信、短波通信、移动通信、卫星通信、散射通信和激光通信等，其形式较多。

### 2. 按信道中所传信号的特征分

在无线通信中的信号（也是本课程需要处理的信号）主要有三种：信息信号、高频载波及已调信号。

信息信号就是表示信息的电信号，通常把各种信息信号归结为两类：一类是连续信息，即信息状态是连续变化的，这就是通常所说的模拟信号，如语音信号、图像信号等；一类是离散信号，即信息的状态是可数的或离散型的，这就是通常所说的数字信号，如电报信号、数据信号等。

信号的表示方法通常有三种：电压或电流的时间函数表示法、波形表示法以及频谱表示法。对前两种方法大家比较熟悉。对于较简单的信号如正弦波、方波、三角波等，可用前两种方法很方便地表示出来。但对于较复杂的信号，如语音信号、图像信号，由于其复杂性、随机性，很难用表达式或波形来表示，此时可用频谱法来表示。一个确定的信号可以看成是由许多不同频率的单一正弦信号组成的；周期性的信号利用傅里叶级数可以分解成许多离散的频率分量，各频率分量成谐频关系；非周期性的信号利用傅里叶变换可以分解成连续谱，信号为连续谱的积分。通过对信号的频谱进行分析可以知道信号的特性：信号的频率分布、带宽等。例如对于语音信号，由于其随机性，我们较难用表达式或波形来表示，但通过对其频谱分析可知，语音信号的频率范围是0.1kHz。

信号按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号，可以把通信系统分为模拟通信系统与数字通信系统。

### 3. 按工作频段分

按通信设备的工作频率不同，通信系统可分为长波通信、中波通信、短波通信、微波通信等。

### 4. 按调制方式分

前面已经指出，根据是否采用调制，可将通信系统分为基带传输和频带（调制）传输。基带传输是将没有经过调制的信号直接传送，如音频市内电话；频带传输是对各种信号调制后再送到信道中传输的总称。

### 5. 按业务的不同分

按通信业务分，通信系统可分为话务通信和非话务通信。电话业务在电信领域中一直占主导地位，它属于人与人之间的通信。近年来，非话务通信发展迅速，它主要包括数据传输、计算机通信、电子信箱、电报、传真、可视图文及会议电视、图像通信等，另外，从广义的角度来看，广播、电视、雷达、导航、遥控、遥测等也应列入通信的范畴，因为它们都满足通信的定义。由于广播、电视、雷达、导航等的不断发展，目前它们已从通信中派生出来，形成了独立的学科。

### 6. 按通信者是否运动分

通信还可按收发信者是否运动分为移动通信和固定通信。移动通信是指通信双方至少有一方在运动中进行信息交换。另外，通信还有其他一些分类方法，如按多地址方式可分为频分多址通信、时分多址通信、码分多址通信等；按用户类型可分为公用通信和专用通信以及按通信对象的位置分为地面通信、低空通信、深空通信、水下通信等。

## 1.1.3 无线通信系统

不同类型的无线电通信，其设备组成、复杂程度是很不相同的，现以一典型的调幅发射机和超外差式接收机框图为例说明无线电通信系统的一些概念，系统组成如图 1-2 所示。

在如图 1-2 所示的发射机中，话筒的作用是将语音信号转化成电信号；音频放大器的作用是对低频的电信号作一个过滤和放大；音频功率放大器是将上一级输出的信号继续放大到足够的功率；高频振荡器的作用是产生高频信号；倍频器的作用是将振荡器产生的信号频率  $f_{osc}$  提高  $n$  倍，以作为后面调制所需要的高频载波；中间放大级的作用是将载波放大到合适的程度；调制器的主要作用是用语音信号去控制载波信号的幅度的变化，形成已调信号，以便于发射。

图 1-3 所示的接收机为常用的超外差式接收机框图。

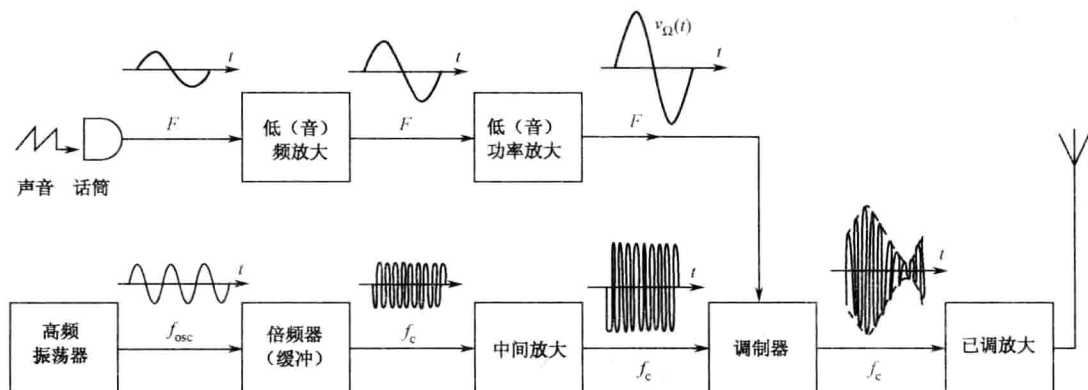


图 1-2 调幅发射机框图

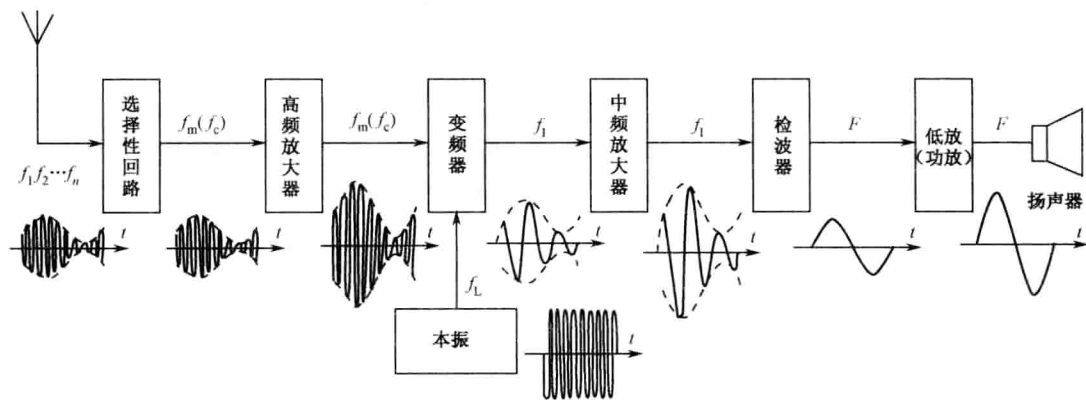


图 1-3 超外差式接收机框图

图 1-3 中所示的选择性回路是要从天线接收的信号中选取所需要的有用信号，滤去无用频率分量；高频功率放大器的作用是对上一级选择出来的有用信号进一步选频和放大，其只对有用信号放大，对无用信号进行抑制；变频器的作用是对放大器输出的信号与本地振荡器输出的本振信号进行频率相减，得到频率相对较低的中频信号（如超外差收音机中频一般为 465kHz），便于后续电路进一步的放大；中频放大器是一中心频率固定的频带（带通）放大器，作用为放大信号并进一步滤除无用频率信号；检波器的作用是从已调信号中恢复出消息信号，这一过程也称解调；解调后的信号通过低频放大器送给用户。超外差式接收机中的放大和频率选择主要是由中心频率固定的中频放大器完成的，通过改变本地振荡器的中心频率就可以收到不同的电台。

### 1.1.4 无线电波的传播

任何载有信息的无线电波均占有一定的信号频带，载波频率越高，可以利用的总频带（即波段）就越宽，因而在同一波段可以实现许多不同对象间信息的传输，并且频带较宽的信息信号只能在很高的频率上才能传输，如电视图像信号的频带宽度约为 6MHz，它只适宜在几十兆赫以上的频率上传输。这说明了无线电波的不同频段，其用途是不同的。

另外，不同的高频波段通常有最适宜的传播方式，而且和光波一样，无线电波也具有直射、反射、折射等现象。图 1-4 给出了无线电波在空间的传播方式。

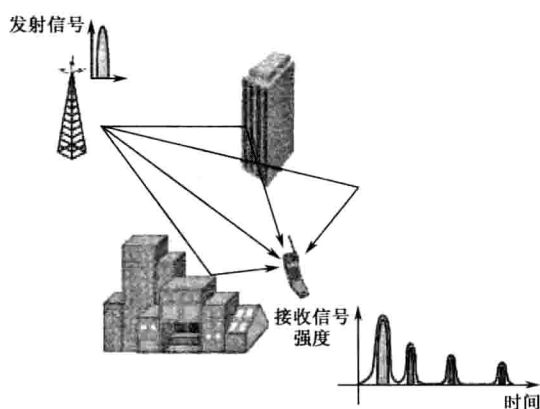


图 1-4 无线电波在空间的传播方式

无线电波的传播方式主要有地波传播、电离层反射传播（天波）、视线传播（空间波）、对流层散射传播等。图 1-5 给出了这几种传播途径的示意图。

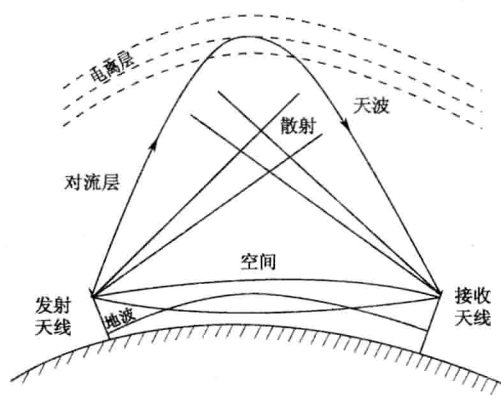


图 1-5 电波的传播途径

## 1. 地波

沿地球表面附近的空传播的无线电波称为地波。适用于波长 $\lambda=200\text{m}$ 以上的中、长波。地面上有高低不平的山坡和房屋等障碍物，根据波的衍射特性，当波长大于或相当于障碍物的尺寸时，波才能明显地绕到障碍物的后面。地面上的障碍物一般不太大，长波可以很好地绕过它们。中波和中短波也能较好地绕过，短波和微波由于波长过短，绕过障碍物的本领就很差了。

地球是个良导体，地球表面会因地波的传播引起感应电流，因而地波在传播过程中有能量损失。频率越高，损失的能量越多。所以无论从衍射的角度看还是从能量损失的角度看，长波、中波和中短波沿地球表面可以传播较远的距离，而短波和微波则不能。

地波的传播比较稳定，不受昼夜变化的影响，而且能够沿着弯曲的地球表面达到地平线以外的地方，所以长波、中波和中短波用来进行无线电广播。

由于地波在传播过程中要不断损失能量，而且频率越高（波长越短）损失越大，因此中波和中短波的传播距离不大，一般在几百千米范围内，收音机在这两个波段一般只能收听到本地或邻近省市的电台。长波沿地面传播的距离要远得多，但发射长波的设备庞大，造价高，所以长波很少用于无线电广播，多用于超远程无线电通信和导航等。

## 2. 天波

依靠电离层的反射来传播的无线电波称为天波。什么是电离层呢？地球被厚厚的大气层包围着，在地面上空五十千米到几百千米的范围内，大气中一部分气体分子由于受到太阳光的照射而丢失电子，即发生电离，产生带正电的离子和自由电子，这层大气就称为电离层。

电离层对于不同波长的电磁波表现出不同的特性。实验证明，波长短于 10m 的微波能穿过电离层，波长超过 3000km 的长波，几乎会被电离层全部吸收。对于中波、中短波、短波，波长越短，电离层对它吸收得越少而反射得越多。因此，短波最适宜以天波的形式传播，它可以被电离层反射到几千千米以外。但是，电离层是不稳定的，白天受阳光照射时电离程度高，夜晚电离程度低。因此夜间它对中波和中短波的吸收减弱，这时中波和中短波也能以天波的形式传播。收音机在夜晚能够收听到许多远地的中波或中短波电台，就是这个缘故。

## 3. 空间波

微波和超短波既不能以地波的形式传播，又不能依靠电离层的反射以天波的形式传播。它们跟可见光一样，是沿直线传播的。这种沿直线传播的电磁波称为空间波或视波。

地球表面是球形的，微波沿直线传播，为了增大传播距离，发射天线和接收天线都建得很高，但也只能达到几十千米。在进行远距离通信时，要设立中继站。由某地发射出去的微波，被中继站接收，进行放大，再传向下一站。这就像接力赛跑一样，一站传一站，把电信号传到远方。直线传播方式受大气的干扰小，能量损耗少，所以收到的信号较强而且比较稳定。电视、雷达采用的都是微波。

## 4. 对流层散射传播

在离地球表面 20km 左右的地方，空气密度高，所有的大气现象（如风、雨、雷等）都是在这—区域产生的，该区域称为对流层，利用对流层对电磁波的散射可以完成信号的传输。对流层散射传播时电磁波传输的距离大大超过视线传播，已成为超短波以至微波波段远距离传输的有力手段。

现在，可以用同步通信卫星传送微波。由于同步通信卫星静止在赤道上空 36000km 的高空，用它来做中继站，可以使无线电信号跨越大陆和海洋。

表 1-1 列出了通信中使用的频段、常用传输媒质及主要用途。

工作频率和工作波长可互换，其关系为

$$\lambda = c / f$$

式中， $\lambda$  为工作波长 (m)； $f$  为工作频率 (Hz)； $c = 3 \times 10^8$  m/s 为电波在自由空间中的传播速度。

表 1-1 通信频段、常用传输介质及主要用途

频段名称	频率范围	波段名称	波长	主要传播方式	用途
甚低频 VLF	3Hz~30kHz	超长波 VLW	$10^8\sim 10^4\text{m}$	地波	音频、电话、数据终端、长距离导航、时标
低频 LF	30~300kHz	长波 LW	$10^4\sim 10^3\text{m}$	地波	导航、信标、电力线通信
中频 MF	300kHz~3MHz	中波 MW	$10^3\sim 10^2\text{m}$	地波、天波	调幅广播、移动陆地通信、业余无线电
高频 HF	3~30MHz	短波 SW	$10^2\sim 10\text{m}$	地波、天波	移动无线电话、短波广播、定点军用通信、业余无线电
甚高频 VHF	30~300MHz	超短波/米波 VSW	10~1m	视线波、对流层散射	电视、调频广播、空中管制、车辆通信、导航、集群通信、无线寻呼
特高频 UHF	300MHz~3GHz	微波/分米波 USW	100~10cm	视线波、对流层散射	电视、空间遥测、雷达导航、点对点通信、移动通信
超高频 SHF	3~30GHz	微波/厘米波	10~1cm	视线波	微波接力、卫星和空间通信、雷达
极高频 EHF	30~300GHz	微波/毫米波	10~1mm	视线波	雷达、微波接力、射电天文学
红外、可见光、紫外	$10^5\sim 10^7\text{GHz}$		$3\times 10^{-4}\sim 3\times 10^{-6}\text{cm}$	光纤/激光/空间传播	光通信

## 1.2 通信电子线路中的元器件

### 1.2.1 高频无源元件

#### 1. 高频电阻

一个实际的电阻器，在低频使用时主要表现为电阻特性，但在高频使用时不仅表现出电阻特性，而且还表现出电抗特性，电阻器的电抗特性反映的就是其高频特性。

电阻器的高频等效电路如图 1-6 所示，其中， $C_R$  为电阻器分布电容， $L_R$  为电阻器引线电感， $R$  为电阻。在低频时，由于信号频率比较低，分布电容和引线电感的作用都可忽略，电阻器为纯电阻  $R$ ，但在高频时，由于分布电容和引线电感的影响增大，不能再忽略，所以，电阻器在高频时不仅呈现出电阻特性，而且呈现出电抗特性。分布电容和引线电感越小，电阻器越接近纯电阻特性，其高频特性越好。

电阻器高频特性的好坏与电阻体的材料、封装形式及尺寸大小有密切关系。一般来说，金属膜电阻比碳膜电阻的高频特性好，而碳膜电阻比线绕电阻的高频特性好；表面贴装(SMD)电阻比引线电阻的高频特性好，小尺寸的电阻比大尺寸的电阻高频特性好。频率越高，电阻器的电抗特性表现越明显。在实际应用中，应尽量减小电阻器电抗特性的影响。

## 2. 高频电容

电容器的高频等效电路如图 1-7 所示。其中,电阻  $R_C$  表示极板间绝缘电阻,它是由于两极板间绝缘介质的非理想所致,  $L_C$  为引线电感。在低频时,极板间绝缘电阻  $R_C$  可视为开路,电感  $L_C$  可视为短路,但高频时,它们的影响不能再忽略。由于在高频电路中常常使用片状电容和表面贴装技术,所以电感  $L_C$  可以忽略不计。

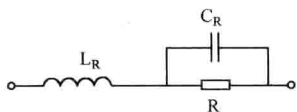


图 1-6 电阻器的高频等效电路

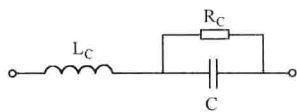


图 1-7 电容器的高频等效电路

## 3. 高频电感

高频电感主要用作谐振元件、滤波元件和阻隔元件(称为高频扼流圈)。电感器由导线绕制而成,又称电感线圈。电感是空心的或是有骨架的,也可以绕制成单层或多层。绕制高频电感的导线有一定的直流电阻,骨架也会引起额外的损耗,它们的影响用  $R_L$  表示。电感线圈的高频等效电路如图 1-8 所示。

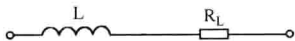


图 1-8 电感线圈的高频等效电路

由图 1-8 可见,电感器不仅具有电感特性,而且具有电阻特性,电阻  $R_L$  的阻值因趋肤效应随频率的升高而增大。趋肤效应是指随着频率的升高,流过导线的交流电流集中在导线表面的现象。当频率很高时,导线中心部位几乎完全没有电流流过,导线的有效截面积大大减少,阻值增大。 $R_L$  越大,电感的高频特性越差。

为了表示电感线圈的损耗,引入电感线圈的品质因数  $Q_L$ ,它定义为电感线圈的感抗与其直流电阻  $R$  的比值,即

$$Q_L = \frac{\omega L}{R}$$

$Q_L$  值越高,表明电感器越接近纯电感,电感的损耗越小。电感线圈的  $Q_L$  常在几十到一二百之间。

若工作频率很高,电感线圈内匝与匝之间及各匝与地之间的分布电容的作用就十分明显,等效电路应考虑电感两端总的分布电容,它与电感并联。为了使电路小型化,减少连线及由此引入的电磁干扰,避免寄生参数的影响,高频电感可采用表面贴装形式,也可将电感集成在电路板上,制成集成电感。

## 4. 传输线

通信电路中的传输线,泛指传输电信号的导线。它可以是对称的平行导线,或是扭在一起的双绞线,也可以是同轴电缆。

当在一对导线上施加电压时,导线中有电流流过,则一对导线间会产生电场而储存电能,



导线的周围产生磁场而储存磁能。从这个意义上理解，一对导线既呈现电容性质，又呈现电感性质。电流流经导线时发热消耗能量，使得其呈现串联电阻性质。两根导线之间有漏电时，则相当一并联电导，故均匀传输线的高频等效电路如图 1-9 所示。

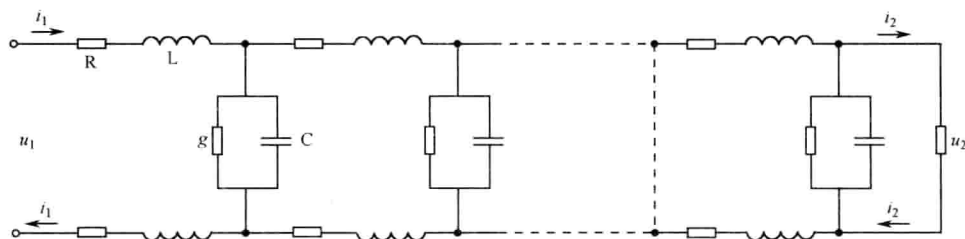


图 1-9 均匀传输线的高频等效电路

用  $R$  和  $L$  代表导线单位长度的电阻和电感，而以  $g$  和  $C$  代表其单位长度的漏电导和电容。因为传输线的参数是均匀地沿其长度方向分布的，故称其为分布参数电路。严格地讲，任何电路都具有上述性质。在一定工作频率下，电感、电容、串联电阻和并联电导四个参数中，某些参数在电路中所起的作用相对来说很小，可将其略去，只考虑起主要参数的作用。

## 1.2.2 高频有源元器件

高频有源元器件主要有晶体二极管、晶体三极管、场效应管和集成电路。用于高频电路的有源器件与用于低频或其他电子线路的有源器件没有本质区别，只是工作在高频时，对器件的某些特性要求更高。随着半导体和集成电路技术的高速发展，能满足高频应用要求的有源器件越来越多，也出现了一些专用的半导体器件。

### 1. 晶体二极管

晶体二极管在高频电路中常用于检波、调制、解调及混频等非线性电路中。高频电路中常用的二极管主要有点接触式二极管和表面势垒二极管（又称肖特基二极管），两者都是利用多数载流子导电的机理，它们的极间电容小、工作频率高，常用的点接触式二极管（如 2AP 系列）工作频率高达  $100\sim 200\text{MHz}$ ，而表面势垒二极管工作频率可高达微波范围。

在高频调谐电路中广泛使用变容二极管（2CC 系列），如电子调谐电路、压控振荡器、直接调频电路等。变容二极管的特点是其电容大小随其两端所加的偏置电压变化，变容二极管工作于反偏状态，基本上不消耗能量，噪声小，效率高。

还有一种由 P 型、N 型和本征（I）半导体构成的 PIN 二极管，它具有较强的正向电荷储存能力，其高频等效电阻受正方向直流电流的控制，常用做电可调电阻，在高频及微波电路中还可做电控开关、限幅器、电调衰减器或电调移相等。

### 2. 晶体三极管与场效应管

在高频电路中仍然使用双极晶体管和场效应管，只是在高频应用时要求更高，晶体管的外形结构与低频管也有所不同。