



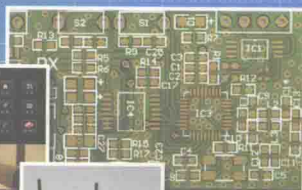
“十二五”职业教育国家规划教材  
经全国职业教育教材审定委员会审定  
全国高等职业教育规划教材·精品与示范系列

# 射频技术

◎于宝明 丁 宁 主编

◎汤 滢 高 燕 副主编 ◎周 波 主审

- 射频通信电路基础
- 高频选频放大器
- 正弦波振荡器
- 锁相环与频率合成器
- 振幅调制、检波与混频
- 频率调制与解调
- 自动搜台调频收音机应用
- 软件无线电技术



- ◆ 深入开展校企合作，结合国家示范专业建设课程改革成果构建课程内容  
根据职业岗位需求，强调原理描述和模块电路分析，突出重点，化难为易  
提供7个实例、13个电路仿真演示和8个实验，强化职业技能训练  
提供免费的电子教学课件、动画及习题参考答案等



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

“十二五”职业教育国家规划教材  
经全国职业教育教材审定委员会审定  
全国高等职业教育规划教材·精品与示范系列

# 射频技术

于宝明 丁宁 主编

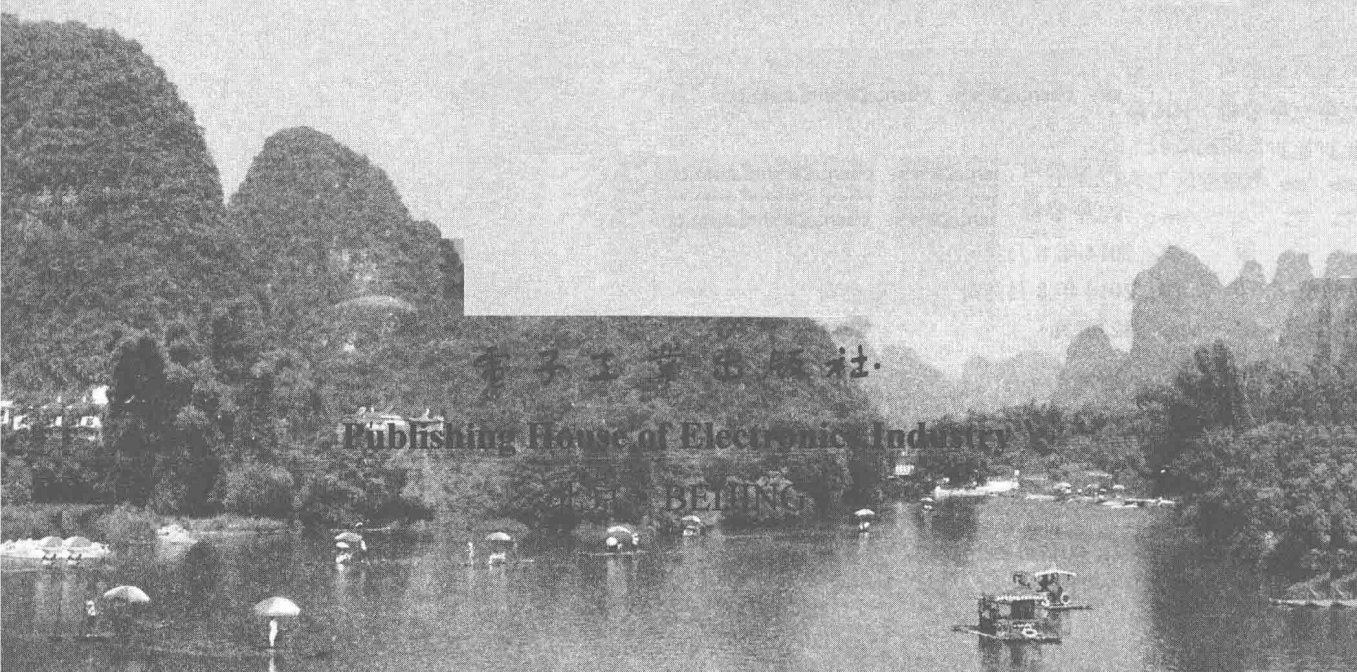
汤滢 高燕 副主编

周波 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronic Industry

BEIJING



## 内 容 简 介

本书按照教育部最新的职业教育教学改革要求,结合国家示范院校专业建设项目成果,在开展多年工学结合课程改革的基础上,由经验丰富的双师型教师与企业技术人员共同编写而成。全书分为6个单元,以射频通信系统为主线逐步讲解通信系统内收发模块电路的相关知识技能,主要包括射频技术的基本知识,高频选频放大器,LC正弦波振荡器、晶体振荡器及其改进电路,锁相环路技术,线性频率变换电路和非线性频率变换电路等。每个单元后设置实用案例电路分析、电路仿真演示、模块电路实验项目等,内容紧扣就业岗位技能需求,通俗易懂,资源丰富,易于安排教学。

本书为高职高专院校相应课程的教材,也可作为应用型本科、成人教育、自学考试、开放大学、中职学校及培训班的教材,以及电子工程技术人员的参考工具书。

本书配有免费的电子教学课件、动画、Multisim 12 仿真演示电路及习题参考答案,详见前言。

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

射频技术 / 于宝明, 丁宁主编. —北京: 电子工业出版社, 2014.8

全国高等职业教育规划教材. 精品与示范系列

ISBN 978-7-121-23841-3

I. ①射… II. ①于… ②丁… III. ①射频电路—高等职业教育—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 159643 号

策划编辑: 陈健德 (E-mail: chenjd@phei.com.cn)

责任编辑: 谭丽莎

印 刷: 北京季蜂印刷有限公司

装 订: 北京季蜂印刷有限公司

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: 10.5 字数: 256 千字

版 次: 2014 年 8 月第 1 版

印 次: 2014 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 32.00 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, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。



21 世纪的特点是经济全球化, 随着信息技术的飞速发展, 高职教育迫切需要培养行业生产、管理和一线的高素质技能型人才, 而射频技术是多个行业的专业技术人员必备的岗位技能, 为满足企业日益增长的技能型人才需求, 结合国家示范院校专业建设项目成果, 在开展多年工学结合课程改革的基础上重构了本课程内容。

全书共分为 6 个单元: 单元 1 介绍射频技术的基本知识, 包括射频技术的特点、通信系统及基本概念、信号与频谱、电波传播与天线等; 单元 2 介绍高频选频放大器, 包括高频小信号放大器和高频功率放大器, 以及相关的选频电路和匹配滤波电路等; 单元 3 介绍 LC 正弦波振荡器、晶体振荡器及其改进电路, 包括研究振荡器的起振、平衡条件及振荡条件的判断等; 单元 4 介绍通信技术中广泛使用的锁相环路技术, 包括锁相原理、单元电路及数字频率合成器等; 单元 5 介绍线性频率变换电路, 包括调幅、检波与混频等; 单元 6 介绍非线性频率变换电路, 包括调频与鉴频电路等。

本书由经验丰富的双师型教师集思广益, 与企业技术人员共同编写而成, 其主要特点如下。

### 1. 符合职业需求, 内容通俗易懂

射频技术是一门数学分析烦琐、概念抽象的专业课程, 学生在学习时往往感到难以理解, 按照高职教育要适用、够用、实用的指导思想, 本次编写从分析职业岗位需求入手, 突出课程内容重点, 化难为易、力求简洁, 强调原理框图、物理概念的描述和模块电路分析方法的掌握, 淡化抽象理论讲解和烦琐的数学推导。

### 2. 教学配套齐全, 资源丰富

本课程的理论部分配有教学大纲、授课计划、电子教案、多媒体课件、动画、视频和 Multisim 12 仿真电路; 实验环节有与课程配套的射频电路实验箱、实验电路板和整机零配件等, 教学资源系统完善。

### 3. 突出技能培养, 形象生动

教学更加突出技能训练: 配合电路仿真进行辅助教学; 训练学生能够对通信系统中的主要模块电路, 如小信号谐振放大器、功率放大器、振荡器、混频器、调幅调频电路及其解调电路进行调试和指标测试; 对调频收音机整机电路进行独立设计、焊接、制作和调试, 以加强对系统整体的认识和理解。

### 4. 技术先进, 与时俱进

由于射频通信技术与实际应用结合紧密, 所以有必要及时将专业前沿技术引入教学, 并引入通信技术的新发展动向及新应用, 紧跟专业发展形势。

本课程建议学时为 60 学时, 可根据具体教学环境及需要对内容和课时进行适当调整。

参加本书编写的有: 南京信息职业技术学院的于宝明院长(统编全稿, 主编); 南京信息职业技术学院的丁宁老师(单元 1、2、6, 全部仿真); 南京信息职业技术学院的汤艳老师(单元 3、4、5), 南京信息职业技术学院的高燕、顾斌、周波老师(实验部分); 南京信

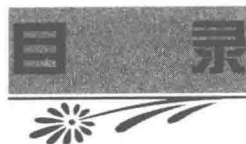
息职业技术学院的高燕老师(附录 A);南京信息职业技术学院的邹传琴老师(附录 B);南京信息职业技术学院的袁迎春老师也为教材的单元 5 和 6 的编写做了部分铺垫工作。本书在编写过程中得到了南京新联电讯仪器有限公司高级工程师刘华强的指导,在此表示感谢!

为了方便教师教学,本书配有免费的电子教学课件、动画、Multisim 12 仿真演示电路和习题参考答案,请有此需要的教师登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)免费注册后进行下载,有问题时请在网站留言或与电子工业出版社联系(E-mail:hxedu@phei.com.cn)。

由于通信电子技术的不断发展和对课程教学改革的不不断改进,其内涵和外延也在不断变化,加上编者水平有限,书中难免存在不足和疏漏之处,希望同行专家和读者能给予批评指正。

编 者





|                              |      |
|------------------------------|------|
| 单元 1 射频通信电路的基本概念 .....       | (1)  |
| 教学导航 .....                   | (1)  |
| 1.1 射频电路的基本特点 .....          | (2)  |
| 1.2 射频通信系统的组成 .....          | (3)  |
| 1.3 信号与频谱 .....              | (5)  |
| 1.4 波段的划分 .....              | (10) |
| 1.5 电波传播与天线 .....            | (11) |
| 知识梳理与总结 .....                | (13) |
| 思考与练习 1 .....                | (13) |
| 仿真演示 1 方波信号的频谱 .....         | (14) |
| 实验 1 信号的时频特性测量 .....         | (14) |
| 单元 2 高频选频放大器 .....           | (17) |
| 教学导航 .....                   | (17) |
| 2.1 选频与滤波 .....              | (18) |
| 2.1.1 LC 选频电路 .....          | (18) |
| 2.1.2 滤波电路 .....             | (20) |
| 2.2 高频小信号放大器 .....           | (23) |
| 2.2.1 高频小信号放大器的主要技术指标 .....  | (23) |
| 2.2.2 单调谐小信号放大器电路与工作原理 ..... | (24) |
| 2.3 高频功率放大器 .....            | (26) |
| 2.3.1 丙类谐振功率放大器的工作原理 .....   | (27) |
| 2.3.2 输出功率与效率的计算 .....       | (29) |
| 2.3.3 匹配滤波电路 .....           | (30) |
| 案例分析 1 高频小信号放大器 .....        | (33) |
| 案例分析 2 谐振功率放大器 .....         | (34) |
| 知识梳理与总结 .....                | (34) |
| 思考与练习 2 .....                | (35) |
| 仿真演示 2 小信号谐振放大电路 .....       | (36) |
| 仿真演示 3 高频功率放大电路 .....        | (37) |
| 实验 2 高频小信号调谐放大器 .....        | (38) |
| 单元 3 正弦波振荡器 .....            | (41) |
| 教学导航 .....                   | (41) |
| 3.1 反馈型振荡器的基本工作原理 .....      | (42) |

|             |                   |             |
|-------------|-------------------|-------------|
| 3.1.1       | 反馈型正弦波振荡器的振荡条件    | (42)        |
| 3.1.2       | 振荡器的性能指标          | (44)        |
| 3.2         | LC 正弦波振荡器         | (44)        |
| 3.2.1       | 电容三点式振荡器          | (47)        |
| 3.2.2       | 改进电容三点式振荡器        | (48)        |
| 3.3         | 晶体振荡器             | (50)        |
| 案例分析 3      | 电容三点式振荡器          | (55)        |
| 知识梳理与总结     |                   | (56)        |
| 思考与练习 3     |                   | (57)        |
| 仿真演示 4      | 电容三点式振荡器          | (58)        |
| 仿真演示 5      | 石英晶体振荡器           | (59)        |
| 实验 3        | 振荡器特性测试           | (60)        |
| <b>单元 4</b> | <b>锁相环与频率合成器</b>  | <b>(63)</b> |
| 教学导航        |                   | (63)        |
| 4.1         | 反馈控制电路            | (64)        |
| 4.2         | 锁相环路的基本原理和基本特性    | (64)        |
| 4.2.1       | 鉴相器的基本特性          | (65)        |
| 4.2.2       | 环路滤波器的基本特性        | (68)        |
| 4.2.3       | 压控振荡器的基本特性        | (70)        |
| 4.2.4       | 锁相环路的工作原理和基本特性    | (71)        |
| 4.3         | 数字频率合成器           | (72)        |
| 4.3.1       | 直接式频率合成器          | (72)        |
| 4.3.2       | 吞脉冲式频率合成器         | (73)        |
| 4.3.3       | 典型锁相环集成电路         | (74)        |
| 案例分析 4      | 锁相频率合成器           | (79)        |
| 知识梳理与总结     |                   | (80)        |
| 思考与练习 4     |                   | (81)        |
| 仿真演示 6      | 模拟乘法器鉴相器基本特性测试电路  | (81)        |
| 实验 4        | 数字频率合成器电路特性测试     | (83)        |
| <b>单元 5</b> | <b>振幅调制、检波与混频</b> | <b>(86)</b> |
| 教学导航        |                   | (86)        |
| 5.1         | 频率变换的概念           | (87)        |
| 5.1.1       | 频率变换电路的一般模型       | (87)        |
| 5.1.2       | 非线性器件在频谱搬移中的作用    | (87)        |
| 5.2         | 频谱搬移电路的实现原理       | (88)        |
| 5.2.1       | 模拟乘法器实现频谱搬移的原理    | (89)        |
| 5.2.2       | 其他非线性器件实现频谱搬移的原理  | (90)        |
| 5.3         | 振幅调制与解调           | (91)        |
| 5.3.1       | 振幅调制              | (92)        |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 5.3.2 检波电路                | (101) |
| 5.4 混频电路                  | (106) |
| 5.4.1 混频原理                | (106) |
| 5.4.2 混频器的性能指标            | (108) |
| 5.4.3 混频干扰和失真             | (108) |
| 案例分析 5 调幅电路               | (109) |
| 案例分析 6 检波电路               | (110) |
| 案例分析 7 混频电路               | (111) |
| 知识梳理与总结                   | (113) |
| 思考与练习 5                   | (113) |
| 仿真演示 7 模拟乘法器实现 AM 调制      | (114) |
| 仿真演示 8 模拟乘法器实现 DSB 转换     | (115) |
| 仿真演示 9 二极管包络检波电路          | (116) |
| 仿真演示 10 模拟乘法器实现同步检波电路     | (117) |
| 仿真演示 11 模拟乘法器混频电路实现       | (117) |
| 实验 5 模拟乘法器调幅特性测试          | (118) |
| 实验 6 包络检波器特性测试            | (120) |
| 实验 7 混频器电路特性测试            | (122) |
| <b>单元 6 频率调制与解调</b>       | (124) |
| 教学导航                      | (124) |
| 6.1 调频波的产生                | (125) |
| 6.2 调频电路的实现               | (129) |
| 6.2.1 对调频电路的要求            | (130) |
| 6.2.2 变容二极管直接调频电路         | (130) |
| 6.3 调频波的解调                | (132) |
| 6.3.1 鉴频器的主要性能指标          | (132) |
| 6.3.2 鉴频方法与电路             | (133) |
| 案例分析 8 调频对讲机              | (137) |
| 知识梳理与总结                   | (138) |
| 思考与练习 6                   | (138) |
| 仿真演示 12 变容二极管直接调频电路       | (139) |
| 仿真演示 13 锁相环路鉴频电路          | (140) |
| 实验 8 鉴频器基本特性测试            | (141) |
| <b>附录 A 自动搜台调频收音机应用实例</b> | (144) |
| <b>附录 B 软件无线电技术简介</b>     | (151) |
| <b>参考文献</b>               | (157) |

# 单元1 射频通信电路的 基本概念

射频属于高频频率范围。相对于低频信号而言，其分析处理方法更加复杂。射频技术广泛应用于无线电广播、雷达及电视等通信系统中。因此，信息传输和信息处理是射频技术研究的一项主要内容。本单元通过学习无线电信号发射和接收的框图，从而了解射频无线通信技术的基本概念和组成结构。

## 教学导航

|        |         |                                                        |
|--------|---------|--------------------------------------------------------|
| 教<br>学 | 知识重点    | 1. 射频电路的特点<br>2. 通信系统收发框图<br>3. 周期性信号的傅里叶级数变换分析法       |
|        | 知识难点    | 1. 调制、混频的概念<br>2. 傅里叶级数分析                              |
|        | 推荐教学方式  | 1. 结合通信系统实例进行系统框图的讲解<br>2. 结合仿真演示信号的频谱                 |
|        | 建议学时    | 6 学时                                                   |
|        | 推荐学习方法  | 1. 以系统框图为主线，了解通信系统收发内部各部分完成的功能<br>2. 借助实验仪器学习常用信号的频谱分析 |
|        | 必须掌握的技能 | 数字存储示波器、DDS 函数信号发生器及扫频仪仪器的使用                           |



## 1.1 射频电路的基本特点

射频 (Radio Frequency, RF), 表示可以辐射到空间的电磁波频率, 它是高频交变电磁波的简称。

射频电路中使用的元器件与低频电路中使用的元器件的频率特性是不同的。射频电路中的无源线性元件——电阻器、电容器和电感器的特性较为复杂, 主要原因是在高频条件下, 电路的特性与在低频条件下不同, 因此需要利用射频电路理论去理解射频电路的工作原理。在高频条件下, 分布电容和分布电感对电路的影响很大。分布电感存在于导线之间的连接中, 分布电容存在于电路的导体之间及组件和地之间。在低频电路中, 这些分布参数对电路的性能影响很小, 但随着频率的增加, 分布参数的影响越来越大。在早期的 VHF 频段电视接收机中的高频头及通信接收机的前端电路中, 分布电容的影响都非常大, 以至于不再需要另外添加电容器。

下面通过一个例子来说明不同频率下分布电容和分布电感对电路的影响。

**实例 1.1** 分布电容  $C=10\text{ pF}$ , 计算  $1\text{ kHz}$ 、 $1\text{ MHz}$ 、 $1\text{ GHz}$  时分布电容的容抗  $X_C$ 。

**解:** 根据容抗计算公式可知

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} \quad (1-1-1)$$

三种频率下的容抗分别为  $15.9\text{ M}\Omega$ 、 $15.9\text{ k}\Omega$ 、 $15.9\text{ }\Omega$ 。

对于  $10\text{ pF}$  的分布电容, 从计算结果发现: 当频率低时, 分布电容的阻抗很高, 并联效应可以忽略不计; 但当频率高达  $1\text{ GHz}$  时, 分布电容的容抗值已经与高频电路中常用的  $50\text{ }\Omega$  阻抗匹配相近, 从而会改变电抗特性, 因此必须考虑分布电容的并联影响。同理, 对于分布电感也是一样, 因此在射频电路和组件中随着频率的增高, 分布电容和分布电感的影响越来越大, 在设计时要很好地解决这方面问题, 才能设计出性能优良的电路。而对于更高频率的信号, 还要通过传输线理论来分析问题, 由于传输线理论讨论的基本都是微波频段, 所以这里不再详细介绍。

在低频电路设计中, 所研究的电子器件虽然是非线性器件, 但在一定条件下可看成线性器件。因此, 放大器可以近似看成线性放大器, 其输出信号与输入信号的频率相同。但射频电路的许多电路, 如调幅、检波、混频、调频反鉴频等电路都属于频率变换电路, 输出会有新的频率产生。因此, 电路中必须采用非线性器件, 如工作在非线性工作区的二极管、三极管、场效应管及模拟乘法器等。这些非线性器件给电路的分析带来了烦琐的数学计算, 在工程上往往根据实际情况对器件的数学模型和电路的工作条件进行合理的近似, 以便简化分析计算。

此外, 在射频条件下电路存在趋肤效应<sup>①</sup>。与直流不同的是, 在直流条件下, 电流在整

<sup>①</sup> 趋肤效应: 高频电流在导线中产生的磁场在导线的中心区域感应最大的电动势, 由于感应的电动势在闭合电路中产生感应电流, 所以在导线中心的感应电流最大; 因为感应电流总是在减小原来电流的方向, 它迫使电流只限于靠近导线外表面处, 这样导线内部实际上没有任何电流, 电流集中在邻近导线外表的一薄层, 结果使得它的电阻增加。导线电阻的增加使得它的损耗功率也增加, 这一现象就称为趋肤效应。



个导体中流动；而在高频条件下，电流在导体表面流动。其结果是高频的交流电阻要大于直流电阻。在高频电路中的另一个问题是电磁辐射效应：随着频率的增加，当波长可与电路尺寸相比拟时，电路会变为一个辐射体，这时，在电路之间、电路和外部环境之间会产生各种耦合效应，因而引出许多干扰问题，而这些问题在低频条件下往往是无关紧要的。

## 1.2 射频通信系统的组成

通信系统是利用无线电波在空间的传播来完成信息传输的，其基本组成框图如图 1.2.1 所示。系统中包括信源、发送设备、信道、干扰源、接收设备与信宿。各部分的作用如下。

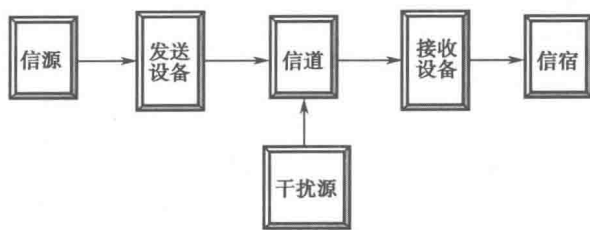


图 1.2.1 通信系统的基本组成框图

(1) 信源：产生消息的来源，它可以把各种消息转换成原始电信号，又称为基带信号。信源可分为模拟信源和数字信源两种。

(2) 发送设备：将信源产生的消息信号变换成适合在信道中传输的信号使信源和信道匹配。发送设备的变换方式是多种多样的，调制是最常见的变换方式。对于数字通信系统，发送设备常常又包括编码器与调制器。

(3) 信道：信道是指传输信号的物理媒质。在无线信道中，信道可以是大气（自由空间）；在有线信道中，信道可以是明线、电缆或光纤。

(4) 干扰源：干扰源是通信系统中各种设备及信道中所固有的，干扰的来源是多样的，它可分为内部干扰和外部干扰。外部干扰往往是从信道引入的，因此，为了分析方便，可把干扰源视为各处干扰的集中表现而抽象加入信道中。

(5) 接收设备：其功能是完成发送设备的反变换，即进行解调、译码及解码等。它的任务是从带有干扰的接收信号中正确恢复出相应的原始基带信号来。

(6) 信宿：信宿是传输信息的归宿点，其作用是将复原的原始信号转换成相应的消息。

按照传送的信号类型分类，通信系统有模拟通信和数字通信两种，也可分为语音通信、图像通信、数据通信和多媒体通信等。

各种不同类型的通信系统，其系统组成和设备的复杂程度都有很大的不同。但是组成设备的基本电路及其原理都是相同的，遵从同样的规律。本书将以模拟通信为重点来研究这些基本电路，并且推广应用到其他类型的通信系统。

通信系统的发射主要是以空间电磁波为载体经天线把信号辐射出去，但一般来说，所要发射的信号频率都比较低，如人的声音信号频率一般在 300 Hz 到 3 400 Hz 之间，根据电磁波理论，要想把声音信号有效辐射出去，天线尺寸需和信号的波长相比拟，这样就需要几十公里长的天线，这显然是做不到的。因此，一般的发射机都采用了调制的方式将所



要传输的调制信号加载到运送调制信号的高频载波信号上，从而使天线的尺寸和载波的波长成正比，这样只要增加载波的频率就可以使用较短的天线传输调制信号了。根据加载到载波上的信息类型，调制的方式可以分为调幅（AM）、调频（FM）及调相（PM）。用需要传输的基带信号去控制高频载波信号  $u_c = U_m(\omega t + \theta_0)$  的某一参数——振幅、角频率或相位，使其随基带信号的变化而变化，这一过程称为调制。通俗地说，就是用高频振荡信号作为运载工具，将携带信息的低频信号“装载”到高频振荡信号上。模拟通信的调制信号为连续波信号。

下面通过最容易理解的调幅信号来说明发射机的发射过程。

如图 1.2.2 所示是一个典型的无线电调幅发射机的组成框图，调幅信号是由调制信号和载波信号通过调幅器合成的。图中的载波信号由频率稳定度高的高频振荡器所产生，并通过高频放大器（一般高频放大器由多级谐振放大器组成）放大信号。

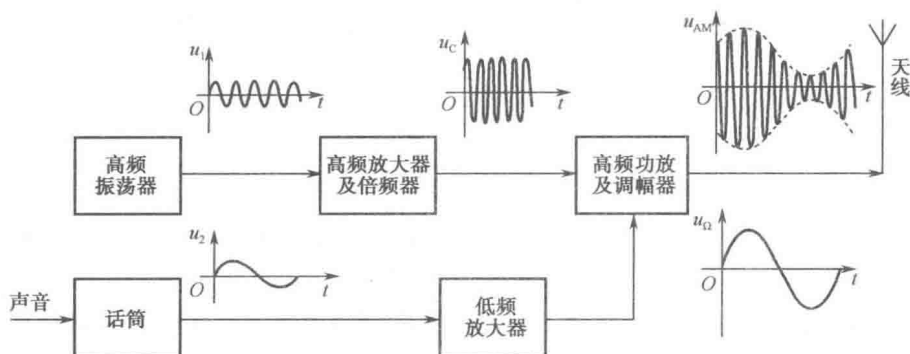


图 1.2.2 无线电调幅发射机的组成框图

由于有时高频振荡频率不够高，所以还需要通过倍频器提高载波频率，得到频率和幅度足够大的载波信号。而调制信号由话筒输入，经低频放大器放大后输出。这两路信号进行调幅处理后再通过功率放大器放大到足够大的功率，最后由天线发射出去。

通过发射机的介绍基本知道了调制信号是怎么传输出去的，但经过调制的信号是不能被直接接收的，必须从高频已调波信号中“取出”调制信号，这个过程称为解调。

前面已经知道调制的方式有三种，同样解调的方式也有对应的三种。其中调幅波的解调称为振幅检波，简称检波；调频波的解调称为频率检波，简称鉴频；调相波的解调称为相位检波，简称鉴相。下面还是以调幅波为例来说明通信广播中超外差接收机的工作原理。

超外差接收机的组成框图如图 1.2.3 所示，调幅波由天线接收，这时信号通过空间的衰减已经比较微弱了，因此在第一级加入了高频放大器对调幅信号进行一定程度的放大，并且为了避免其他频率的信号干扰，该放大器常由一级或多级具有选频特性的小信号谐振放大器组成。

载波的频率越高，对解调的器件要求也越高，而且为了获得高性能指标，器件的成本也越高，这样就不能保证获得良好的性能，而超外差接收机通过混频器将加载在高频载波上的调制信号进行频谱搬移（搬移至中频信号上），从而降低了解调难度，并获得了较好的性能指标（如果一次混频不能达到满意的效果，还可以进行二次混频，将调制信号搬移至



## 单元 1 射频通信电路的基本概念

频率更低的信号上)。设载波频率为  $f_c$ ，本地振荡频率为  $f_0$ ，则通过混频器后会产生载波频率为  $f=f_c-f_0$  的调幅信号，也称中频信号。

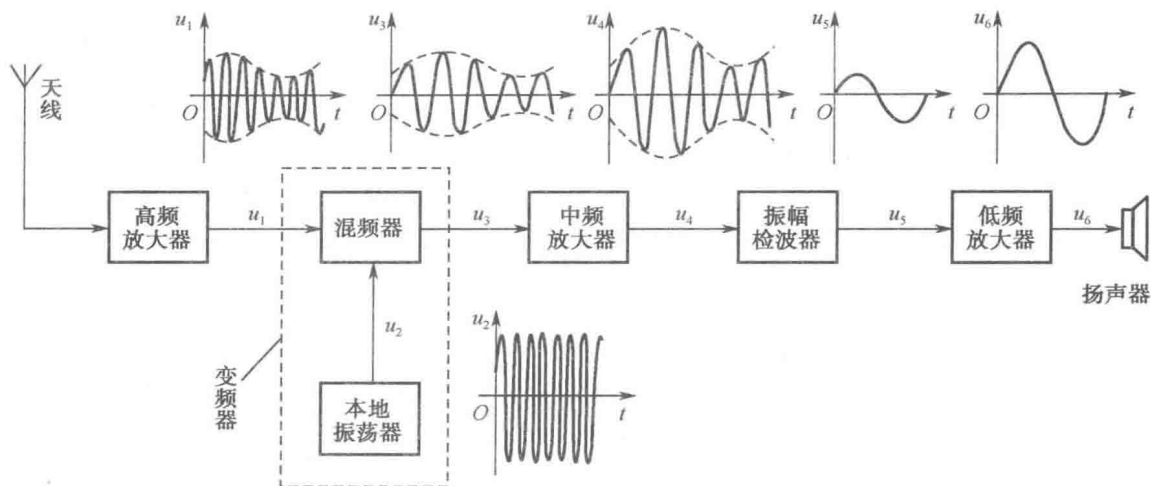


图 1.2.3 超外差接收机的组成框图

中频信号再经中频放大器放大后送到振幅检波器。振幅检波器主要是将调幅信号的外围包络的幅度变化信号给取出来，这个信号就是调制信号，调制信号最后再经低频放大器输入扬声器，完成接收音频信号的过程。

## 1.3 信号与频谱

调幅、调频和调相三种调制方式的调制信号都是连续信号。射频通信中常见的连续信号如图 1.3.1 所示。

### 1. 正弦波信号（如图 1.3.1 (a) 所示）

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_0) = U_m \sin(2\pi f t + \varphi_0)$$

正弦信号是最常用的信号之一，常用作标准信号源、系统与设备的标准测试信号或信息传输的载体。

### 2. 矩形波信号（如图 1.3.1 (b) 所示）

$$u(t) = \begin{cases} U_m & t_0 + nT \leq t < t_1 + nT, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \\ -U_m & t_1 + nT \leq t < t_2 + nT, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases}$$

通常把矩形波信号在一个周期内的正向值持续时间所占的比例称为占空比，用  $D_{on}$  表示：

$$D_{on} = \frac{t_1 - t_0}{T} \times 100\%$$

若占空比为 50%，则称该矩形波为方波。

矩形波信号常用作开关信号、时间（时序）控制信号等，在数字系统和设备中有着较为广泛的应用。



### 3. 锯齿波信号 (如图 1.3.1 (c) 所示)

通常把锯齿波信号在一个周期内的上升持续时间所占的比例称为占空比, 用  $D_{up}$  表示:

$$D_{up} = \frac{t_5 - t_3}{T} \times 100\%$$

若占空比为 50%, 即锯齿波的上升沿与下降沿对称, 则称该锯齿波为三角波。

### 4. 取样信号 (如图 1.3.1 (d) 所示)

$$\text{Sa}(t) = \frac{\sin t}{t}$$

取样函数是一个容易处理的信号, 在通信中是一个重要函数。

### 5. 语音信号

语音信号为随机信号, 在长时间的语音信号中有相当多的无信号区间, 即所谓的语音寂静区间。语音信号包含很多频率, 其频率集中在 300~3 400 Hz。

无线电信号的特点是具有时域和频域特性。对于一个无线电信号, 可以将它表示为电压或电流的时间函数, 通常用时域波形或数学表达式来描述 (如图 1.3.1 (e) 所示)。信号也可以表示为不同频率分量信号的线性组合, 称之为频域, 表示通信系统输入的任一信号 (如语音信号、图像信号等) 若满足一定条件, 都可根据傅里叶定理将其展开为不同频率分量的组合。用频域分析法分析复杂信号较为方便。

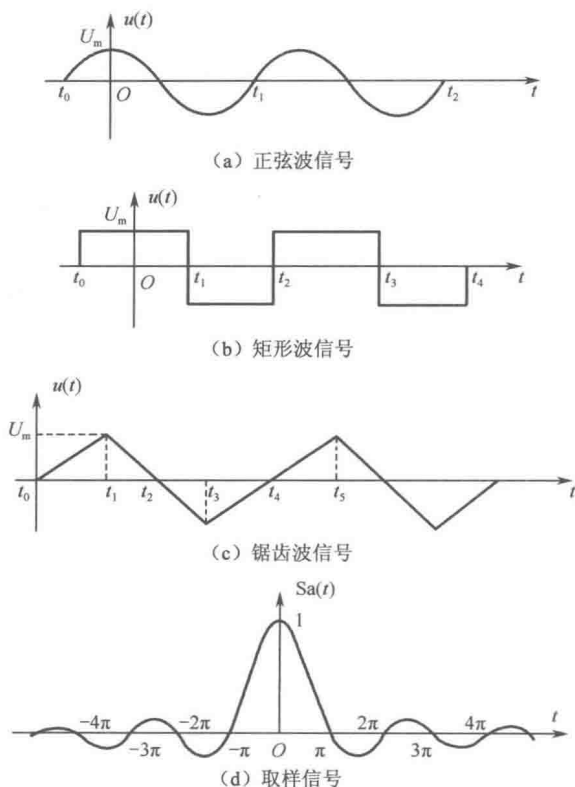


图 1.3.1 信号



(e) 语音信号

图 1.3.1 信号 (续)

这里只讨论周期信号的傅里叶级数展开。任一周期信号若满足狄里赫利<sup>①</sup>条件，可将其展开为

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t), n=1, 2, \dots \quad (1-3-1)$$

式中：

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos n\omega_1 t dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \sin n\omega_1 t dt \end{aligned} \quad (1-3-2)$$

$\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$  为基波或一次谐波频率， $2\omega_1, 3\omega_1, \dots$  依次为二次谐波、三次谐波……

也可将其展开为三角函数的另一种形式：

$$\begin{aligned} x(t) &= a_0 + A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \cos(2\omega_1 t + \varphi_2) + A_3 \cos(3\omega_1 t + \varphi_3) + \dots \\ &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n) \end{aligned} \quad (1-3-3)$$

可以证明：

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \varphi_n = \arctan \frac{-b_n}{a_n} \quad (1-3-4)$$

**实例 1.2** 有一个方波信号如图 1.3.2 所示，求其傅里叶级数展开式。

解：

$$a_0 = 0$$

$$a_n = 0$$

<sup>①</sup> 狄里赫利条件：

- (1) 函数在任意有限区间内连续，或只有有限个第一类间断点（当  $t$  从左或右趋于这个间断点时，函数有有限的左极限和右极限）；
- (2) 在一个周期内，函数有有限个极大值或极小值。

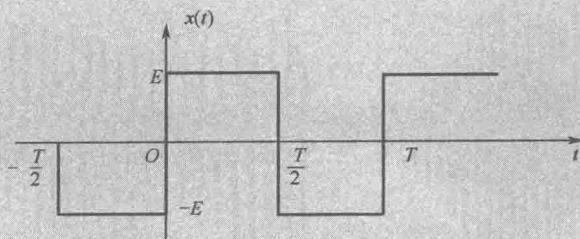


图 1.3.2 方波信号

$$\begin{aligned}
 b_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \sin n\omega_1 t dt \\
 &= \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} E \cdot \sin n\omega_1 t dt \\
 &= \frac{4E}{T} \left( \frac{-\cos n\omega_1 t}{n\omega_1} \right) \bigg|_0^{\frac{T}{2}} \\
 &= \begin{cases} \frac{4E}{n\pi}, & (n=1, 3, 5, \dots) \\ 0, & (n=2, 4, 6, \dots) \end{cases}
 \end{aligned}$$

$$x(t) = \frac{4E}{\pi} \left( \sin \omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t + \dots \right)$$

从  $x(t)$  的展开式可以看出方波包含 1、3、5、…奇次谐波。可以将这些频率分量用频谱图表示出来，这里只绘出幅频图，如图 1.3.3 所示。

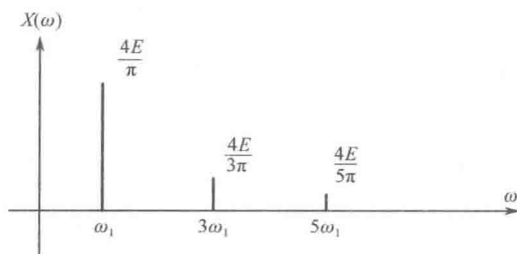


图 1.3.3 方波信号

[演示] 方波信号包含无限多奇次谐波分量，因此，无限多奇次谐波可以合成方波。



方波信号原理演示

(1) 谐波分量面板如图 1.3.4 所示。

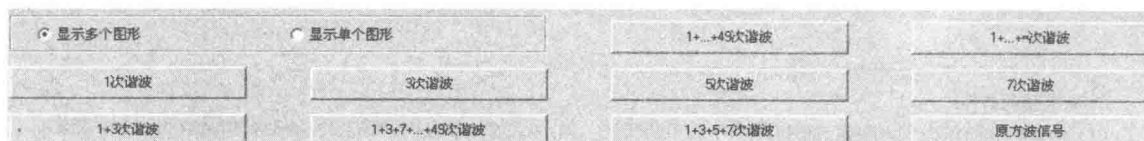


图 1.3.4 谐波分量面板



(2) 单击“1 次谐波”，显示波形的仿真图，如图 1.3.5 所示。

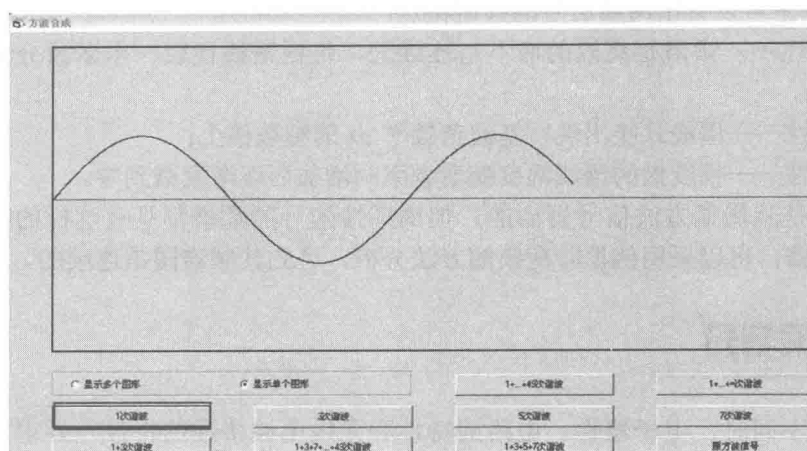


图 1.3.5 1 次谐波分量

(3) 单击“3 次谐波”，显示波形的仿真图，如图 1.3.6 所示。

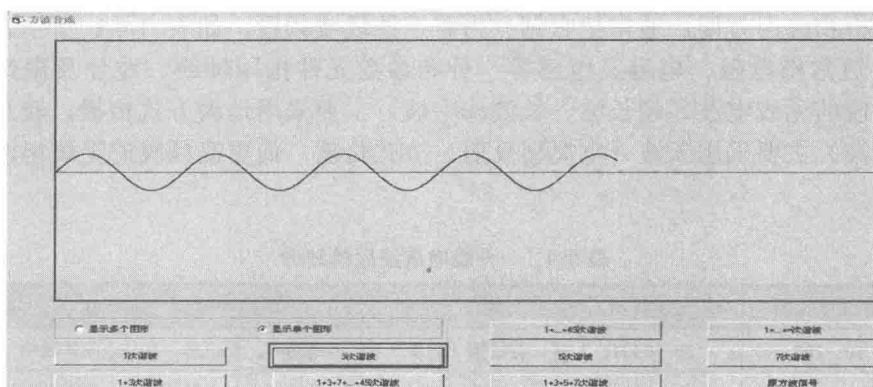


图 1.3.6 3 次谐波分量

(4) 以此类推，单击“ $n$  次谐波”，显示合成波形的仿真图，如图 1.3.7 所示。

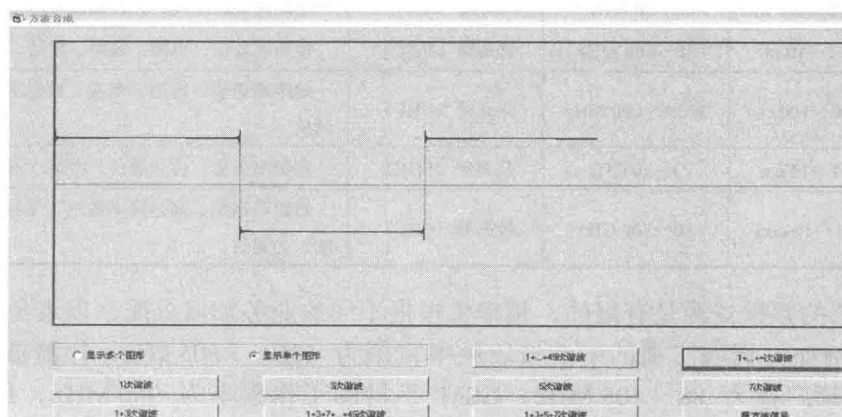


图 1.3.7  $n$  次谐波分量