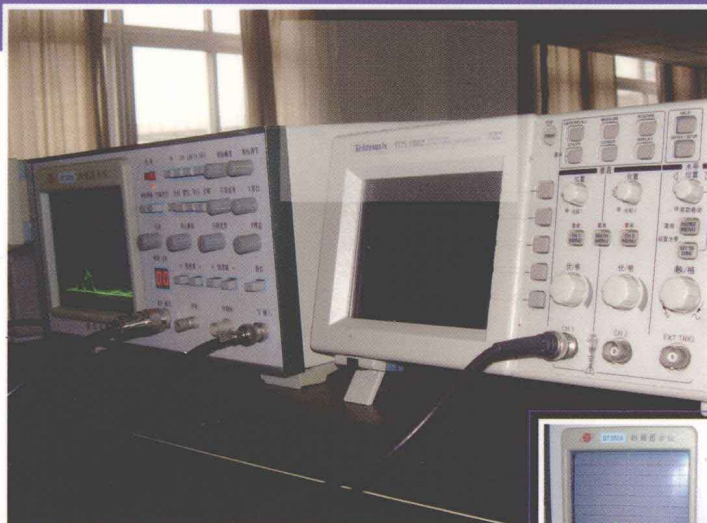




高等学校应用型特色规划教材

高频电子线路

黄勇 李晓茹 邹传云 主编
魏东梅 副主编



免费赠送电子课件

- ◎ 注重实际需要，以系统功能为纲，优选基础内容，兼顾现代发展，注重概念连贯，便于组织教学。
- ◎ 以无线通信系统各单元电路的“功能”为基点构筑各章节内容，上下衔接保持内在思路的流畅，有利于教学。

清华大学出版社

高等学校应用型特色规划教材

高频电子线路

邹传云 主 编

黄 勇 李晓茹 魏东梅 副主编

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书详细介绍了构成高频无线通信系统的各功能电路的基本原理和分析方法。全书共分9章,包括系统基础知识,小信号选频放大电路,高频功率放大电路,正弦波振荡电路,振幅调制、解调与混频电路,角度调制与解调电路,反馈控制电路,高频电路的分布参数分析,高频电路的集成与EDA。每章都通过问题和主要知识要点引导和启发学生思考,以问题驱动教学。全书内容深入浅出,理论联系实际。

本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程、电子信息对抗、物联网等专业的本科生教材或教学参考书,也可供相关专业的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/邹传云主编;黄勇,李晓茹,魏东梅副主编. —北京:清华大学出版社,2012.7
(高等学校应用型特色规划教材)

ISBN 978-7-302-28197-9

I. ①高… II. ①邹… ②黄… ③李… ④魏… III. ①高频—电子电路—高等学校—教材
IV. ①TN710.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第030149号

责任编辑:李春明 郑期彤

封面设计:杨玉兰

责任校对:周剑云

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62791865

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:15.75 字 数:378千字

版 次:2012年7月第1版 印 次:2012年7月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:32.00元

产品编号:039264-01

前 言

高频电子线路是本科电子信息类专业重要的技术基础课，是一门理论性、工程性与实践性很强的课程，它内容丰富，应用广泛，相关新技术、新器件发展迅速。结合应用型本科人才培养的实际情况，本书注重实际需要，进一步理清高频电子线路最基本的内容，兼顾现代发展，内容组织上注重内在概念和分析思路的连贯性，可为学生的后续学习打好基础，达到培养应用型学生的目的。

本书的选材与组织遵循“系统功能为纲，优选基础内容，兼顾现代发展，注重概念连贯，便于组织教学”的原则，以无线通信系统各单元电路的“功能”为基点构筑各章节内容，精选基础内容适应有限学时，上下衔接保持内在思路的流畅，从而利于教学。本书从通信功能电路的输入信号频谱与输出信号频谱的变换关系出发，在理论上讲清楚各个通信功能电路的基本原理和实现电路的基本方法。本书内容以模拟通信功能电路为主，对数字信号的调制与解调电路也有适当的叙述。考虑到目前各高校高频电子线路(或通信电路、非线性电路、射频电路)课时有限(48~64学时)，本书强调基础，书中第1~7章是同类教材公认的基础内容，采用集总参数的分析方法。但随着移动通信和网络的迅猛发展和普及，大部分无线通信系统的工作频率为千兆赫量级，我国传统高频电子线路的内容就不充分了，因此有必要将分布参数的分析方法引入到高频电子线路教材中。特别是对后续不选修微波技术等课程的同学，如果完全没有分布参数电路的概念，就将很难深入理解现代无线通信电路。

全书共分9章，具体如下。

第1章系统基础知识，主要介绍电磁波频段的划分与应用、无线通信系统的组成、高频电路中的元器件特征与非线性描述方法、系统性能指标(包括增益、噪声系数、1dB压缩点、三阶互调截点、灵敏度和动态范围)。

第2章小信号选频放大电路，主要介绍LC谐振与阻抗变换电路、小信号谐振放大器、集中选频放大器。

第3章高频功率放大电路，主要介绍丙(C)类谐振功率放大器的工作原理和动态特性分析、高效(D、E类)功率放大器概念、谐振功率放大器馈电和匹配电路、集成高频功率放大电路。

第4章正弦波振荡电路，主要介绍反馈型自激振荡的工作原理、LC正弦波振荡器、晶体振荡器。

第5章振幅调制、解调与混频电路，主要介绍振幅调制的基本原理、振幅调制与检波电路、混频原理与电路。

第6章角度调制与解调电路，主要介绍调角信号的基本特性、调频与鉴频电路、抗噪电路、数字调制与解调、集成调频发射与接收芯片。

第7章反馈控制电路，主要介绍自动增益控制(AGC)电路、自动频率控制(AFC)电路、锁相环路(PLL)、集成锁相环与应用。

第8章高频电路的分布参数分析，主要介绍传输线原理与工作参数、Smith圆图与阻抗匹配、双端口网络的 S 参数。

第9章高频电路的集成与EDA技术简介，主要介绍高频电路的集成技术与电子设计自动化的概念和发展趋势。

本书由邹传云任主编。具体分工如下：邹传云编写第1、2章并负责大纲制定及全书的审稿和统稿，魏东梅编写第3、4章，李晓茹编写第5、6章，黄勇编定7~9章。

由于时间仓促及作者水平有限，书中难免存在错误及疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 系统基础知识..... 1	第 3 章 高频功率放大电路 60
1.1 无线通信系统概述..... 1	3.1 丙(C)类谐振功率放大器的工作 原理 61
1.1.1 电磁波频段的划分与应用 2	3.1.1 电路组成及工作原理 61
1.1.2 无线通信系统的基本组成 5	3.1.2 集电极余弦电流脉冲的分解 ... 63
1.2 高频电路中的元器件与分析模型 7	3.1.3 输出功率与效率 64
1.2.1 高频无源元件 7	3.1.4 丙(C)类倍频器 65
1.2.2 高频有源器件 9	3.2 谐振功率放大器的动态特性分析 66
1.3 系统性能指标 13	3.2.1 谐振功率放大器的动态特性 ... 66
1.3.1 增益 14	3.2.2 谐振功率放大器的负载特性 与三种工作状态 68
1.3.2 噪声和噪声系数 16	3.2.3 谐振功率放大器的调制特性 ... 70
1.3.3 非线性失真 21	3.2.4 谐振功率放大器的放大特性 ... 72
1.3.4 灵敏度与动态范围 26	3.2.5 谐振功率放大器的调谐特性 ... 72
本章小结 28	3.3 谐振功率放大器电路 73
思考与练习 28	3.3.1 直流馈电电路 74
第 2 章 小信号选频放大电路 32	3.3.2 滤波匹配网络 76
2.1 LC 谐振与阻抗变换电路 32	3.3.3 谐振功率放大器电路举例 80
2.1.1 阻抗的串、并联变换 32	3.4 D、E 类功率放大器概念 81
2.1.2 串、并联谐振回路的基本 特性 34	3.4.1 D 类功率放大器 81
2.1.3 回路的部分接入与阻抗变换 ... 39	3.4.2 E 类功率放大器 82
2.2 小信号谐振放大器 42	3.5 集成射频功率放大器及其应用简介 ... 83
2.2.1 晶体管的 Y 参数等效电路 42	本章小结 85
2.2.2 单调谐回路谐振放大器 44	思考与练习 85
2.2.3 多级单调谐回路谐振放大器 ... 48	第 4 章 正弦波振荡电路 88
2.2.4 调谐放大器的稳定性 49	4.1 反馈振荡器的振荡条件分析 88
2.3 集中选频放大器 51	4.1.1 反馈振荡器振荡的基本原理 ... 88
2.3.1 集中选频滤波器 52	4.1.2 振荡器的起振条件和 平衡条件 89
2.3.2 小信号选频放大器举例 55	4.1.3 振荡平衡的稳定条件 90
本章小结 56	4.1.4 反馈振荡器的判断 91
思考与练习 58	4.1.5 频率稳定度 93



4.2 LC 三点式正弦波振荡器.....	94
4.2.1 三点式振荡器的电路组成 法则	94
4.2.2 电容三点式振荡器.....	96
4.2.3 电感三点式振荡器.....	97
4.2.4 改进型电容三点式振荡器.....	99
4.2.5 集成 LC 正弦波振荡器.....	102
4.3 石英晶体振荡器.....	104
4.3.1 石英谐振器及其特性.....	104
4.3.2 串联型石英晶体振荡器.....	106
4.3.3 并联型石英晶体振荡器.....	107
4.3.4 泛音晶体振荡器.....	108
本章小结	110
思考与练习	110

第 5 章 振幅调制、解调与混频 电路..... 113

5.1 振幅调制的基本原理.....	113
5.1.1 普通调幅波	114
5.1.2 双边带调幅信号.....	117
5.1.3 单边带调幅信号.....	118
5.2 振幅调制电路	118
5.2.1 非线性电路的线性时变 分析法	119
5.2.2 低电平调幅电路.....	121
5.2.3 高电平调幅电路.....	124
5.3 振幅检波电路	126
5.3.1 振幅解调的基本原理.....	126
5.3.2 二极管包络检波电路.....	127
5.3.3 同步检波电路.....	132
5.4 混频原理与电路.....	135
5.4.1 混频电路	135
5.4.2 混频干扰	140
5.4.3 混频器的性能指标.....	142
5.5 实用电路举例	143
本章小结	145
思考与练习	145

第 6 章 角度调制与解调电路..... 148

6.1 调角信号的基本特性.....	148
6.1.1 调角波的表达式.....	149
6.1.2 调角波信号的频谱和带宽	151
6.2 调频电路.....	154
6.2.1 调频的主要性能指标	154
6.2.2 直接调频电路.....	154
6.2.3 间接调频电路.....	159
6.2.4 扩展最大频偏的方法.....	162
6.3 鉴频电路.....	162
6.3.1 鉴频的主要性能指标.....	162
6.3.2 斜率鉴频器.....	163
6.3.3 相位鉴频器.....	167
6.4 调频制的抗噪电路.....	169
6.4.1 预加重与去加重电路.....	169
6.4.2 限幅器.....	170
6.4.3 静噪电路.....	171
6.5 数字调制与解调.....	172
6.5.1 概述.....	172
6.5.2 频移键控调制与解调.....	172
6.5.3 相移键控调制与解调.....	175
6.6 集成调频发射与接收芯片举例	176
6.6.1 MC2833 集成调频发射机.....	177
6.6.2 MC3362 集成调频接收机.....	178
本章小结	178
思考与练习.....	179

第 7 章 反馈控制电路

7.1 自动增益控制电路.....	181
7.1.1 自动增益控制电路的作用	181
7.1.2 自动增益控制电路的类型	182
7.2 自动频率控制电路.....	184
7.2.1 工作原理.....	184
7.2.2 应用举例.....	184
7.3 锁相环路.....	186
7.3.1 锁相环路的基本组成.....	186
7.3.2 锁相环路的相位模型和基 本方程.....	187

7.3.3 锁相环路的捕捉与跟踪.....	192
7.4 集成锁相环与应用.....	193
7.4.1 集成锁相环	193
7.4.2 锁相环的应用.....	195
本章小结	200
思考与练习	200
第 8 章 高频电路的分布参数分析	202
8.1 传输线	202
8.1.1 传输线方程和特性阻抗.....	203
8.1.2 传输线的工作参量.....	207
8.1.3 均匀无损耗传输线的 工作状态	209
8.2 Smith 圆图与阻抗匹配	212
8.2.1 Smith 阻抗圆图	212
8.2.2 传输线的阻抗匹配.....	218
8.3 双端口网络的 S 参数.....	224
8.3.1 S 参数定义	224

8.3.2 S 参数与其他参数的关系	227
本章小结	230
思考与练习.....	230
第 9 章 高频电路的集成与 EDA 技术简介	230
9.1 高频电路的集成技术	230
9.1.1 高频集成技术与挑战	230
9.1.2 高频集成电路的发展与趋势	232
9.2 高频电路的 EDA 技术简介	233
9.2.1 教学用的 EWB	234
9.2.2 商用的 EDA 软件介绍.....	240
本章小结	241
思考与练习.....	241
参考文献	242

第 1 章 系统基础知识

本章导读

- 无线电频段是如何划分的？无线通信为何要用高频电磁波？
- 高频电子线路有什么特点？
- 无线通信系统究竟包括哪些电路？它们都有什么功用？
- 表征高频电路(系统)性能的参数有哪些？

知识要点

- 不同频段电波的传播特点。
- 高频发射机和接收机的组成结构图。
- 各功能电路(小信号放大电路、高频功率放大电路、正弦波振荡电路、调制和解调电路、倍频电路、混频电路)在系统中的作用。
- 增益、噪声系数、1dB 压缩点、三阶互调截点的计算和意义。

1.1 无线通信系统概述

1864 年，苏格兰科学家麦克斯韦(J.C.Maxwell, 1831—1879 年)在伦敦英国皇家学会发表的论文中首次提出了电场和磁场通过其所在的空间中交连耦合会导致波传播的设想，1873 年他出版了电磁场理论的经典巨著《论电和磁》，提出一组关于电和磁共同遵守的数学方程，即麦克斯韦方程，论证空间存在电磁波并以光速传播。1887 年，德国科学家赫兹(H.R.Hertz, 1857—1894 年)用火花隙激励一个环状天线，用另一个带隙的环状天线接收，证实了麦克斯韦关于电磁波存在的预言。1897 年，意大利发明家马可尼(G.Marconi, 1874—1937 年)在英国申请无线电报专利，建立无线电报公司。1901 年 12 月 12 日，马可尼在加拿大纽芬兰岛(Newfoundland)收到从英国康沃尔(Cornwall)发出的无线电报信号，跨越大西洋的 3200km 距离的无线通信试验成功。无线电报的发明开始了无线电通信的时代，并逐步涉及陆地、海洋、航空、航天等固定和移动无线通信领域，从 1920 年的无线电广播、1930 年的电视传输，直到 1980 年的移动电话和 1990 年的全球定位系统及当今的移动通信和无线局域网，无线通信市场还在飞速发展，移动通信手机、有线电视调制解调器以及射频标签的电信产品迅速地渗入我们的生活，变成大众不可缺少的工具。高频电子线路的发展推动了无线通信技术的发展，是当代无线通信的基础，是无线通信设备的重要组成部分。



1.1.1 电磁波频段的划分与应用

波长与频率是电磁波的两个重要参数。在自由空间中, 波长与频率存在以下关系:

$$\lambda = c/f$$

式中, c 为光速(真空中的值为 $3 \times 10^8 \text{m/s}$), λ 和 f 分别为电磁波的波长(单位是米, m)和频率(单位是赫[兹], Hz)。

为了便于分析和应用, 人们对电磁波按频率或波长进行分段, 分别称为频段或波段。表 1.1 列出了电磁波频(波)段的划分, 表中的划分是相对而言的, 相邻频段间无绝对的分界线。

表 1.1 电磁波频(波)段的划分

频段名称	频率范围	波段名称	波长范围
极低频(Extra Low Frequency, ELF)	3~30Hz	极长波	100~10mm
超低频(Super Low Frequency, SLF)	30~300Hz	超长波	10~1mm
特低频(Ultra Low Frequency, ULF)	300~3000Hz	特长波	1~0.1mm
甚低频(Very Low Frequency, VLF)	3~30kHz	甚长波	0.1mm~10km
低频(Low Frequency, LF)	30~300kHz	长波	10~1km
中频(Middle Frequency, MF)	300~3000kHz	中波	1~0.1km
高频(High Frequency, HF)	3~30MHz	短波	0.1km~10m
甚高频(Very High Frequency, VHF)	30~300MHz	超短波	10~1m
特高频(Ultra High Frequency, UHF)	300~3000MHz	分米波	1~0.1m
超高频(Super High Frequency, SHF)	3~30GHz	厘米波	0.1m~10mm
极高频(Extra High Frequency, EHF)	30GHz~0.3THz	毫米波	10~1mm
太赫兹(Tera-hertz)	0.3~30THz	亚毫米波	1mm~10μm

单位前缀: T=10¹²; G=10⁹; M=10⁶; k=10³; m=10⁻³; μ=10⁻⁶; n=10⁻⁹; p=10⁻¹²

频率在 300MHz~3000GHz 范围内的电磁波又称为微波(Microwave), 微波的波长范围为 1m~0.1mm, 它包括四个波段: 分米波、厘米波、毫米波、亚毫米波。在雷达和微波技术中, 常对微波波段中的一部分做更细的划分, 并用不同的拉丁字母表示它们如表 1.2 所示。

表 1.2 微波波段的划分

波段代号	频率/GHz	波长范围/cm	标称波长/cm
P	0.23~1	130~30	80
L	1~2	30~15	22
S	2~4	15~7.5	10
C	4~8	7.5~3.75	5
X	8~12	3.75~2.5	3
Ku	12~18	2.5~1.67	2

续表

波段代号	频率/GHz	波长范围/cm	标称波长/cm
K	18~27	1.67~1.11	1.25
Ka	27~40	1.11~0.75	0.80
U	40~60	0.75~0.5	0.60
V	60~80	0.5~0.375	0.40
W	80~100	0.375~0.3	0.30

根据现代电磁场理论, 整个电磁波谱包括电波、红外线、可见光、紫外线、X射线、 γ 射线等, 如图 1.1 所示。

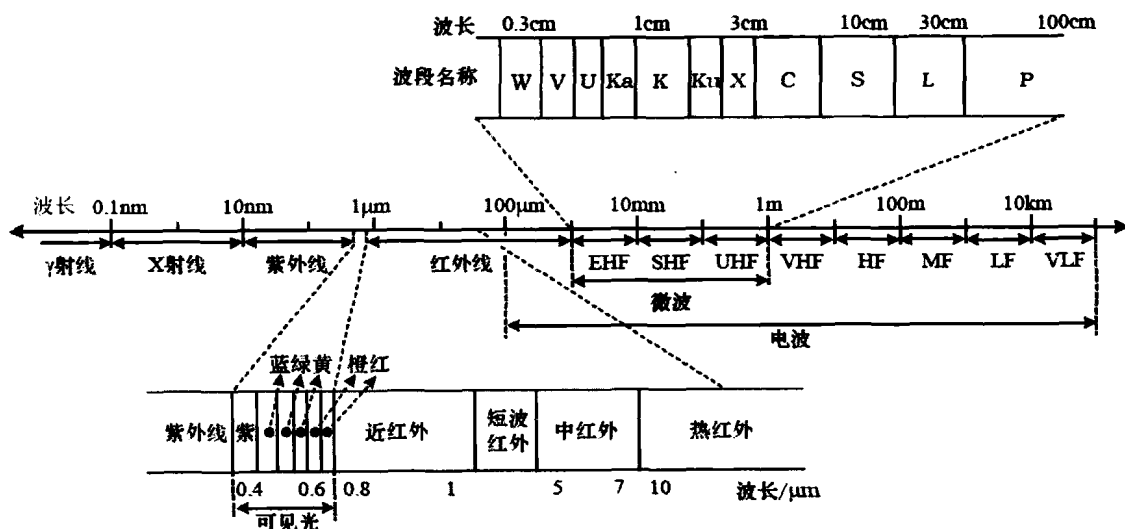


图 1.1 电磁波谱

由于地球表面及空间层的环境条件不同, 因此发射的无线电波因其频率或波长不同, 传播特性也不同。传播特性指的是无线电波的传播方式、传播距离、传播特点等。电磁波在地面上远距离传播的方式有直射、绕射、折射和反射。

1. 直射传播

由于地球表面是一个曲面, 直射传播的电波所能到达的距离只能在视距范围以内。如果天线不高, 传播距离就不远, 发射和接收天线越高, 能够进行通信的距离也越远。一般超短波和微波在电离层中反射很小, 它们的绕射能力也不强, 所以通常是靠直线传播。当然, 直射传播方式可以通过架高天线、中继或卫星等方式来扩大传输距离。

2. 绕射传播

电波沿地面传播(绕射)时能量会被吸收(由集肤效应引起), 通常是波长越长(或频率越低), 被吸收的能量越少, 损耗就越小, 因此, 中、低频(或中、长波)信号可以以地波的方式绕射传播很远, 并且比较稳定。

3. 折射和反射传播

地球表面有一层具有一定厚度的大气层，由于受到太阳和星际空间的照射，大气层上部的气体将发生电离而产生自由电子和离子，这一部分大气层称为电离层。当无线电波照射到电离层时，电波传播方向将发生变化，造成电磁波在电离层中的折射和反射，被折射和反射到地面的电波称为天空波，也叫天波。电离层对通过的电波也有吸收作用，频率越高的信号，电离层吸收能力越弱，或者说电波的穿透能力越强。因此，频率太高的电波会穿过电离层而到达外层空间。而长波、中波在电离层中受到较强的吸收，基本上不能依靠电离层的反射来传播。然而，对于短波信号，电离层有较强的反射，入射角越大，越易反射。由于电离层离地面较高，一次反射的跳距可达 4000km，因此，短波通信是一种价格低廉的远距离通信方式。由于电离层的状态随着时间(年、季、月、天、小时甚至更小单位)而变化，因此，利用电离层进行的短波通信并不稳定。需要指出，电波的反射传播不只存在于电离层中，由于电波在不同性质的介质的交界处都会发生反射，因此，当电波遇到比波长大得多的物体时将产生反射，也就是说，反射也发生于地球表面、建筑物表面等许多地方。在物体的边缘也存在电波绕射，在陆地移动通信中，由反射、绕射引起的多径传播会造成接收信号的衰落。

由上可见，长波信号以地波绕射为主；中波和短波信号可以以地波和天波两种方式传播，不过，前者以地波传播为主，后者以天波(反射与折射)为主；超短波以上频段的电波大多以直射方式传播。不同频段电波的传播方式和能力不同，因而它们的应用范围也不同。表 1.3 给出了常见用途的电波频段。各种频率的电磁波都是不可再生的重要资源，它们的使用受国家控制，任何个人、公司和行业只有获得政府的许可(牌照)才能使用分配的频段。

表 1.3 常见用途的电波频率

中波广播	535~1605kHz
短波广播	5.9~26.1MHz
调频广播	88~108MHz
业余无线电	50~54, 144~148, 216~220, 222~225, 420~450 MHz
电视广播	54~72, 76~88, 174~216, 470~608MHz
遥控	72~73, 75.2~76, 218~219MHz
移动通信	900MHz; 1.8, 1.9, 2GHz
无线局域网	2.4~2.5 GHz, 5~6 GHz
卫星直播电视	12.2~12.7, 24.75~25.05, 25.05~25.25 GHz
全球定位系统(Global Positioning Systems, GPS)	1215~1240, 1350~1400, 1559~1610 MHz

无线电频率资源具有四个特性：有限性、非耗竭性、排他性和易受污染性。由于无线电频率资源的上述特性，国际社会和任何国家都必须对它进行科学规划、严格管理。

按照现有的法规，无线电管理的内容主要包括以下几个方面。

- (1) 无线电台设置和使用管理。
- (2) 频率管理。

(3) 无线电设备的研制、生产、销售和进口管理。

(4) 非无线电波的无线电辐射管理。

不同频段电波信号的产生、放大和接收的方法不同,因而它们的分析方法也不同。本书主要分析高频电波信号的产生、放大和接收的电路,因此称为“高频电子线路”。需要指出:这里的“高频”是一个相对的概念,表 1.1 中的“高频”指的是短波波段,其频率范围为 $3\sim 30\text{MHz}$,这只是“高频”的狭义解释。而广义的“高频”指的是射频(Radio Frequency, RF),它是指适合无线电发射和传播的频率,其频率范围非常宽。只要电路尺寸比工作波长小得多,仍可用集总参数来分析实现,都可认为属于“高频”范围。就目前的集成电路尺寸来讲,“高频”的上限频率可达微波频段(如 5GHz)。当电路尺寸大于工作波长或相当时,应采用分布参数的方法来分析实现。本书的第 1~7 章讨论可用集中参数描述的高频电路,而分布参数分析法在第 8 章有简要的论述。

1.1.2 无线通信系统的基本组成

无线通信系统是指采用电磁波作为载体通过空中传递信息的系统,无线电通信的类型很多,可以根据频率范围、传输方法、用途等来分类。

(1) 按照工作频段或传输方式分类,主要有中波通信、短波通信、超短波通信、微波通信和卫星通信等。

(2) 按照通信方式分类,主要有(全)双工、半双工和单工方式。

(3) 按照调制方式分类,主要有调幅、调频、调相以及混合调制等。

(4) 按照传送消息的类型分类,主要有模拟通信和数字通信,也可以分为话音通信、图像通信、数据通信和多媒体通信等。

通信系统的核心部分是发送设备和接收设备。不同的无线通信系统的发送设备和接收设备的组成不完全相同,但基本结构还是有相似之处,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。图 1.2 所示为模拟无线通信系统(如模拟无线对讲机)的基本组成。图中虚线以上部分为发送设备(发信机),虚线以下部分为接收设备(收信机),天线及天线开关为收发共用设备,虚线框是可选电路。信道为自由空间。话筒和扬声器属于通信的输入、输出变换器(声-电与电-声转换)。输入变换器将要传递的声音消息变换为电信号,称为基带信号。为了适应信道对要传输信号的要求,就必须将已获取的基带信号再做变换,这就是发送变换设备的功用。发送设备将基带信号对来自载波振荡器的高频信号进行调制等处理,将频率变换到规定频段的无线信道上,产生高频已调信号,最后再经功率放大器放大,使其具有足够的发射功率,作为射频信号发送到空间,实现信号的有效传输。接收设备的第一级是高频放大器。由于发送设备发出的信号经过长距离的传播,能量受到很大的损失,当到达接收设备时,信号是很微弱的,同时还受到传输过程中来自各方面的干扰和噪声,因而需要经过高频放大器的放大,在此过程中,高频放大器的窄带特性同时滤除一部分带外的噪声和干扰。高频放大器输出的是高频已调信号,经过混频器,与本地振荡器提供的信号混频,产生中频信号。中频信号经中频放大器放大,送到解调器,恢复原基带信号,再经低频放大器放大后驱动扬声器产生声信号。

本书将以模拟通信为重点来研究这些基本电路,认识其规律。这些电路和规律完全可



以推广应用到其他类型的通信系统。对于无线通信系统，一般都要将要传输的基带信号调制到高频(射频)，原因是高频适于天线辐射和无线传播。由天线理论可知，只有当天线的尺寸大于四分之一信号波长时，天线的辐射效率才会较高，从而以较小的信号功率传播较远的距离，接收天线也才能有效地接收信号。基带信号一般是较低频率的信号，波长较长。例如，音频信号一般仅在 15kHz 以内，对应波长为 20km 以上，要制造出相应的巨大天线是不现实的。另外，即使这样巨大的天线能够制造出来，由于各个发射台发射的均为同一频段的基带信号，在信道中会互相重叠、干扰，因此接收设备无法从中选择出所要接收的有用信号。采用调制方式以后，由于传送的是高频已调波信号，故所需天线尺寸便可大大缩小。另外，不同的发射台可以采用不同频率的高频振荡信号作为载波，这样在频谱上就可以互相区分开了。所谓调制，就是用调制信号去控制高频载波的参数，使载波信号的某一个或几个参数(振幅、频率或相位)按照调制信号的规律变化。根据载波受调制参数的不同，调制分为三种基本方式，它们是振幅调制(调幅)、频率调制(调频)、相位调制(调相)，分别用 AM、FM、PM 表示，还可以有组合调制方式。

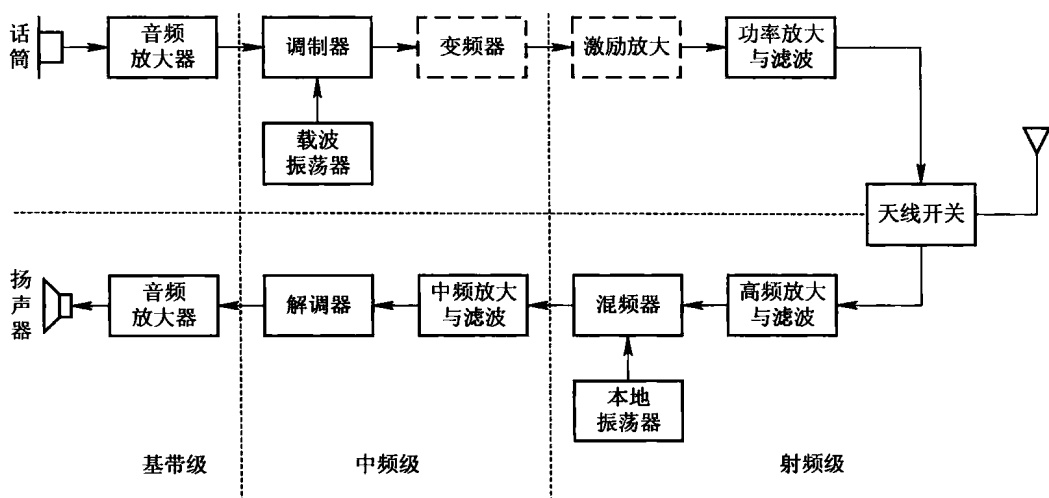


图 1.2 模拟无线通信系统的基本组成

由上面的例子可以总结出无线通信系统电路的基本组成，由工作频率的高低可分为射频级、中频级和基带级三级电路，射频级和中频级属于本书高频电路的研究范畴，它们的基本功能电路应该包括：滤波器、放大器、高频振荡器、混频或变频器、调制与解调器。

上面的功能电路就是本书后续各章要介绍和分析的内容，国际习惯用图 1.3 中的符号表示它们，其中图 1.3(a)~(d)分别表示低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器(陷波器)；图 1.3(e)表示放大器；图 1.3(f)表示混频或变频器(也表示乘法器)；图 1.3(g)表示振荡器；图 1.3(h)表示双工器(天线开关)；图 1.3(i)表示天线。

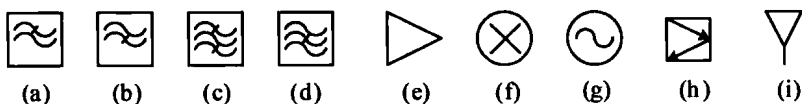


图 1.3 常用的通信功能电路符号

图 1.4 是用图 1.3 中的符号表示的典型数字无线通信系统(如移动手机)的基本组成。该系统中基带信号是数字信号,中频和射频级电路中的信号仍是模拟的,这两级电路的工作原理与图 1.2 的一样。图 1.2 和图 1.4 中的接收设备结构称为超外差接收机,它的主要特点就是由频率较低且固定的中频放大器来完成对接收信号的选择和放大;它的优点是接收的性能可以做得更好,当信号频率改变时,只要相应地改变本地振荡信号频率即可实现对不同高频信号的接收。

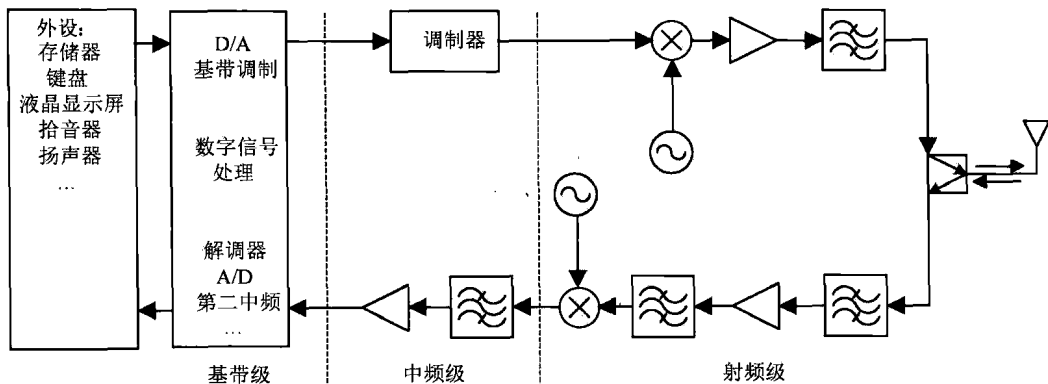


图 1.4 典型数字无线通信系统的基本组成

1.2 高频电路中的元器件与分析模型

由 1.1.2 节的介绍可知,各种无线电设备主要由一些处理高频信号的功能电路(如高频放大器、振荡器、调制与解调器等)组成。但从原理上讲,这些电路可由各种有源器件、无源元件构成。无源元件主要是电阻(器)、电容(器)和电感(器),它们都属于线性元件,在高频电路中通常起滤波、阻抗匹配、旁路、耦合、去耦、移相等作用。有源器件主要是半导体二极管、三极管和集成电路,它们本质上都属于非线性器件,在高频电路中完成信号的放大、非线性变换等功能。高频电路中使用的元器件与低频电路中使用的元器件在物理原理上基本相同,但要注意它们在高频下使用时的高频特性,在分析时采用与工作条件(信号频率和幅度)适应的模型。

1.2.1 高频无源元件

在高频段,实际电阻器、电容器和电感器不是低频时被认为的“纯”元件,它们在高频下工作时会表现出与其标称不同的特性,频率越高差别越大,这是由于实际器件存在杂散寄生的不良电容、电感和电阻。在任何高频电路设计、仿真和布线时都必须考虑到这些不良因素。图 1.5 给出了电阻器、电容器和电感器的高频等效模型和阻抗绝对值的频率响应曲线,图中实线是实际等效模型的曲线,虚线是标称的理想“纯”元件的曲线。

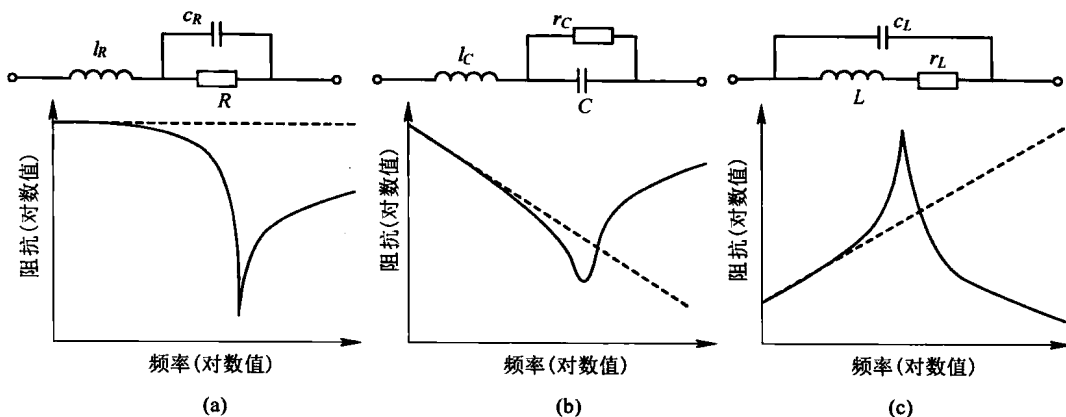


图 1.5 电阻器、电容器和电感器的高频等效模型和阻抗绝对值的频率响应曲线

1. 电阻

电阻器(简称电阻)是电子设备中应用十分广泛的元件。电阻利用自身消耗电能特性,在电路中起降压、分压、限流、向各种电子元件提供必要的工作条件(电压或电流)等作用。电阻可以分为碳质电阻、线绕电阻、金属膜电阻、薄膜片状电阻等几种类型,其中薄膜片状电阻属于表面安装器件(SMD),尺寸可以做得很小,常用于射频与微波电路中。

一个实际的电阻,在低频下使用时主要表现为电阻特性,但在高频下使用时不仅表现有电阻特性的一面,还表现有电抗特性的一面。电阻的电抗特性反映的就是其高频特性。电阻的高频等效电路如图 1.5(a)所示,其中, c_R 为分布电容(电阻中电荷分离效应产生的电容和引线间的寄生电容), l_R 为引线电感, R 为电阻的标称值。与标称电阻相比,引线电阻常常被忽略。图 1.5(a)还给出了该等效电路阻抗绝对值的频率响应曲线(实线),虚线是理想电阻的响应。可以看出,当频率很低时,电阻阻抗的绝对值等于电阻的标称值;阻抗的绝对值随着频率的增加逐渐减小,具有电容效应;当频率等于电阻的自谐振频率(Self Resonant Frequency, SRF)时,阻抗的绝对值达到最小值;当频率大于自谐振频率时,阻抗的绝对值随着频率的增加逐渐增加,具有电感效应。

2. 电容

简单地讲,由介质隔开的两导体即构成电容器(简称电容)。电容是储存电荷的容器。电容在电子线路中的作用一般概括为通交流、隔直流。电容通常起滤波、旁路、耦合、去耦、移相等作用。理想状态下,两导体间的介质中没有电流流动。然而在高频下,实际介质存在损耗,其内部会有传导电流,所以电容的阻抗由等效介质损耗电阻 r_C 与标称电容 C 并联再与引线电感 l_C 串联组成,如图 1.5(b)所示。该图还给出了电容的阻抗绝对值与频率的关系,理想电容的阻抗如图中虚线所示。

由图 1.5(b)可以看出,当频率较低时,阻抗的绝对值接近理想电容,随着频率的增加逐渐减小;当频率等于电容的自谐振频率时,阻抗的绝对值达到最小值(这一特性可用于电源滤波,即选择电源滤波电容时使滤波电容的自谐振频率尽量等于或接近电路的工作频率,这样滤波电容在工作频率上近似短路,可以得到很好的滤波效果);当频率大于自谐振频率

时, 阻抗的绝对值随着频率的增加逐渐增加, 表现为电感性而不是电容性。

3. 电感

在高频电路中经常使用的电感器(简称电感)是线圈结构, 电感对直流电流短路, 对突变的电流呈高阻态。电感主要用作谐振元件、滤波元件、匹配网络元件和阻隔元件(又称高频扼流圈)等。它是用导线在圆柱体上绕制而成的, 其等效电路如图 1.5(c)所示。图中, 电容 c_L 为等效线圈匝与匝之间的分布电容(它应与电感并联), r_L 为等效电感线圈电阻, L 为电感的标称值。该电路阻抗的绝对值与频率的关系也表示在图中。

由图 1.5(c)可以看出, 当频率较低时, 阻抗的绝对值接近理想电感, 随着频率的增加逐渐增加; 高频电感器也具有自谐振频率, 当频率等于自谐振频率时, 阻抗的绝对值达到最大值(这一特性可用于电源滤波, 即选择电源扼流圈时应使扼流圈的自谐振频率尽量等于或接近电路的工作频率, 这样电源扼流圈在工作频率上近似开路, 可以很好地抑制交流信号进入电源端); 当频率大于自谐振频率时, 阻抗的绝对值随着频率的增加逐渐减小, 具有电容效应。

由上可见, 由于实际器件存在杂散寄生的不良电阻、电容、电感, 因此实际电容、电感和电阻具有自谐振频率, 当工作频率大于自谐振频率时, 它们表现出与标称完全不同的性质。设计高频电路时一般要选取自谐振频率比工作频率足够大, 使器件保持标称的性质。器件的尺寸越小, 它们的自谐振频率越大。目前, 在高频电路中使用的片状器件的尺寸已做得非常小, 可以有效地减少引线电感和分布电容的影响, 使用频率可以高达 15GHz。本书后面章节的分析将忽略实际电容、电感和电阻的引线电感和分布电容, 一般电容的等效并联电阻很大, 本书也不考虑它的影响。但电感的等效损耗串联电阻不能省略, 高频工作时, 电感线圈电流有强的集肤效应(频率越高越强), 从结果来看, 相当于减小了导体的有效面积, 从而增加了电阻值, 频率越高电阻越大; 此外, 由线圈磁场附近金属物内感应所生的涡流损失, 磁路线圈在磁介质内的磁滞损失, 由于电磁辐射所引起的能量损失等, 都会使高频电感的损耗(等效电阻)大大增加。在以后的分析中, 电感线圈的等效电路可以表示为电感 L 和电阻 r_L 串联, 一般 r_L 的值随工作频率升高而增加。但在实际中, 通常不是直接用等效电阻 r_L , 而是引入线圈的品质因数来表示电感的损耗性能, 品质因数定义为无功功率与有功功率之比。设流过电感线圈的电流为 I , 则得到电感品质因数 Q 为

$$Q = \frac{\text{无功功率}}{\text{有功功率}} = \frac{I^2 \omega L}{I^2 r_L} = \frac{\omega L}{r_L} = \frac{X_L}{r_L} \quad (1.1)$$

Q 是感抗 X_L 与损耗电阻 r_L 的比值, Q 值越高损耗越小, Q 值一般远大于 1, 通常在几十到 200 范围内。

1.2.2 高频有源器件

从原理上看, 用于高频电路的各种有源器件与用于低频或其他电子线路的器件没有什么根本不同。它们是各种半导体二极管、三极管以及半导体集成电路。这些器件的物理机制和工作原理在先修课程(模拟电子线路)中已详细讨论过, 只是由于工作在高频范围, 对器件的某些性能要求更高。此外, 许多高频功能电路(如调制、解调及混频等电路)是依赖