

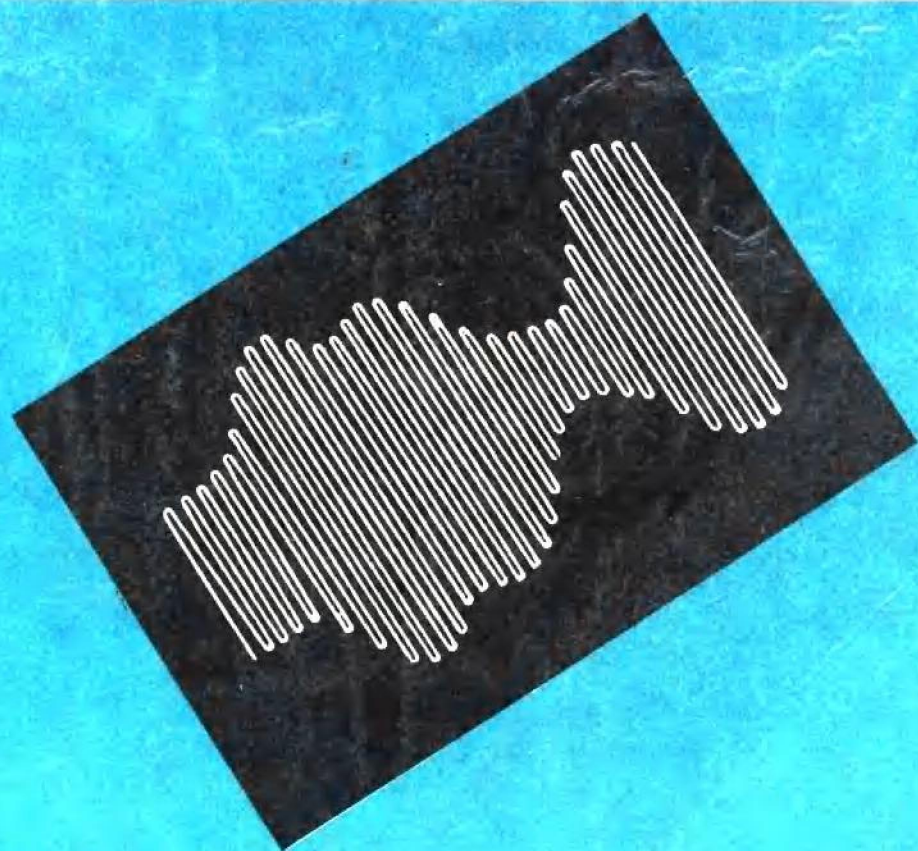
杜武林 主编

高频电路原理 与分析

(第二版)

GAO PIN DIAN LU YUAN LI

YU FEN XI



西安电子科技大学出版社

高等学校教材

高频电路原理与分析

(第二版)

杜武林 李纪澄 曾兴雯 编

西安电子科技大学出版社

1997

(陕) 新登字 010 号

内 容 简 介

本书是《高频电路原理与分析》的修订版。修订后全书共 9 章, 内容包括: 绪论, 高频电路基础, 高频功率放大器, 正弦波振荡器, 频谱的线性搬移电路, 振幅调制, 解调及混频, 频率调制与解调, 锁相环原理及其应用, 典型整机线路举例。

本书的修订仍遵循“控制篇幅、精选内容、突出重点、便于教学”的初版教材编写原则, 突出了高频电路的基本电路、基本原理及其分析。加强了高频电路基础部分的讲述, 删减了部分分立元件电路, 进一步充实了高频集成电路的内容。此外, 还增加了“典型整机线路举例”这一章, 供学生在研究单元电路时联系学习, 以提高识图和分析电路的能力。

本书的读者对象为本科生, 电大、职大和夜大学生, 也可供有关工程技术人员参考。本教材获电子工业部第三届全国普通高等学校工科电子类专业优秀教材奖。

高等学校教材
高频电路原理与分析
(第二版)

杜武林 李纪澄 曾兴雯 编
责任编辑 叶德福

西安电子科技大学出版社出版发行

陕西省富平县印刷厂印刷

新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 22 2/16 插页 3 字数 538 千字

1986 年 12 月第 1 版 1994 年 4 月第 2 版 1997 年 3 月第 6 次印刷 印数 20 501 - 28 500

ISBN 7 - 5606 - 0229 - 0/TN · 0069(课)

定价: 17.80 元

第二版前言

本书是在1986年杜武林、魏玲、张厥盛编写的《高频电路原理与分析》基础上修订再版的。在初版后的这几年时间里，电子技术有了很大进步，教学改革也有了发展，这些都要求本书修订后再版。

修订时的指导思想是在遵循原版教材“控制篇幅、精选内容、突出重点、便于教学”等编写原则的基础上，根据新的情况和教学经验，进一步精选分立元件电路的内容，充实集成电路的内容，力求反映电子技术的进步，有利于提高教学水平和加强理论联系实际。修订再版时，对以下几方面作了较大的改动。

1. 全书的结构作了调整。根据长期的教学经验，将高频电路中的共同性基础内容，主要是高频线性电路集中在第二章讲述。其内容有高频电路中的有源器件和无源网络（振荡电路、高频变压器和传输线变压器、石英晶体谐振器、陶瓷滤波器和声表面波滤波器），电子噪声等。修订后使这些共同的基础性内容有所加强。

2. 考虑到振幅调制和解调、混频等，从频率变换原理上讲是共同的，而只是具体电路的实现和性能指标要求上有所不同。为此，将原书第五、六章内容作了调整。第五章讨论共同的频谱线性搬移的变换原理，第六章讨论有关电路。这样做，避免了原书的部分内容重复，同时也加强了非线性变换的概念。

3. 考虑到集成电路的迅速发展，在高频功放、振荡、混频、各种调制和解调等高频非线性电路各章中，保留了研究集成电路和分立元件电路都必需的各种高频电路原理和分析的基础内容，较多地删去和精选了分立元件的实际电路，较多地增加了各部分集成电路的内容。

4. 为了加强理论联系实际，本书增加了典型整机线路介绍（第九章），列举了两种典型通信机的整机框图和部分单元组成电路。这部分内容不在课堂上讲授，可作为参考材料，在学习第三～七章时，指导学生联系整机的实际电路进行分析，以提高实际识图和分析电路的能力。

修订后的本书仍是西安电子科技大学信息工程系各专业的“高频电子线路”课程教材。

本书作为本科班教材时，建议各章教学时数（第九章不安排专门的教学时数）为：

章次	1	2	3	4	5	6	7	8
学时数	2	12	10	12	6	10	14	8

共计74学时，并应配有约20学时的实验课。

《高频电路原理与分析》（第二版）仍由杜武林主编。杜武林、李纪澄、曾兴雯负责以下各章的修订和编写，各章的分工如下：杜武林（第一、二、九章）、李纪澄（第三、四、七章）、曾兴雯（第五、六章）；第八章仍是张厥盛同志编写的。

限于作者水平，本书中不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

编者

1994年1月

第一版前言

本书是西北电讯工程学院信息工程系通信专业的“高频电子线路”课程的教材。在确定教材的内容和深度时，也考虑了无线电技术类专业的需要，因此本书也可作为有关专业的“高频电子线路”、“通信电子线路”、“非线性电路”等课程的教材。在舍去某些章节后，本书也可作为无线电技术专业的大专班、夜大学的教材。

本书主要研究各种无线电设备和系统中高频电路的原理、线路和分析方法。随着教学改革进行和科学技术的迅速发展，“高频电子线路”课程的地位和作用也在不断变化，要求内容不断更新。为此，在编写本教材时，力求达到控制教材篇幅、精选内容、突出重点、便于教学的目的。

在精选内容方面，根据1976年我们编写《无线电通信设备》教材的经验和长期教学实践的体会，本书以典型高频电路为主，着重阐述它们的基本工作原理和基本分析方法，达到掌握和巩固基本概念和提高自行研究分析类似电路的能力。对于一些不常用的电路、纯理论性的推导过程，以及一些具体设计步骤之类的内容作了较多的删减。为了在一个学期内以80学时实施完本课程，本书根据高频电路的内在联系，合并了有关章节，控制了教材的篇幅。根据振幅调制和频率调制两种基本调制方式，将调制和解调合并为两章；考虑到电子噪声和高频小信号放大器的有机联系，也合并为一章。作为本书主要内容的非线性电路分析方法，在振幅调制与解调一章中加以讨论。考虑到在现代无线电设备中，锁相环作为一个多功能部件用得越来越多，已经成为一个基本的高频单元电路，将锁相环原理及其应用单独成一章。由于振荡回路和传输线变压器在高频电路中用得很多，作为补充知识在第二章附录中介绍。在编写过程中，力求反映集成电路在高频电路中的应用，特别是在低电平电路中的应用。在研究各单元电路时，既考虑了以分立元件为主，也适当结合它们在集成电路中的应用。而对于集成模拟相乘器、集成调频解调器和集成锁相环等内容都作了较充分的介绍。对于一些技术较新、有发展前途的非基本电路，如传输线变压器、高效功放、功率合成、集中选频放大器等都作了必要的介绍。在着重讲述单元电路的同时，也尽可能地介绍一些有关整机知识。

“高频电子线路”是一门工程性和实践性很强的课程，教材仅为学好课程提供必要的基础，有许多理论知识和实际技能，如实际线路的组成、测量方法和仪器、实际动手能力等，还必须在实践中学习和提高。为此，在实施本课程时，应配有二十学时左右的实验课。

采用本书作本科班教材时，建议各章的学时数为：绪论2学时（复习有关振荡回路和介绍传输线变压器知识，可在绪论课结束后进行，约需4学时），高频功放10学时，振荡器12学时，噪声和小信号放大8学时，调幅和解调12学时，调频与解调14学时，锁相环10学时。

本书由杜武林、魏玲、张厥盛三人共同编写。第一至四章由杜武林执笔；第五至七章由魏玲执笔；第八章由张厥盛执笔。由杜武林负责全书的组织和定稿工作。李纪澄主审了

本书。高频教研组的全体同志参加了教材编写计划的讨论和传阅了初稿，并提出了许多宝贵意见。申洪勤、黄书川同志对部分修改稿提出了许多有益意见，在此一并表示谢意。

限于作者水平，本书定会有许多不妥甚至错误之处，恳请本书读者给我们以这方面的反馈信息。

编者

1986年1月

常用符号表

A	耦合因子	Q	品质因数
B	电纳; 信号带宽; 系统带宽	Q_0	无载品质因数
B_n	等效噪声带宽	Q_L	有载品质因数
$B_{0.7}$	3 dB 带宽	R, r	电阻
b	电纳; 四端网络和滤波器衰减	S	放大器稳定系数; 理想转移特性斜率; 信号功率
C	电容	S_c	临界线斜率
V	晶体管	$S(\omega)$	功率谱密度
E	电源电压; 交流电势振幅	s	复频率
e	电动势	T	周期; 振荡器环路增益;
F	调制频率; 反馈系数	T_n	噪声温度
$F(s)$	滤波器传递函数	T	变压器符号
f	频率	U	直流电压; 电压振幅
G	电导; 增益(dB 表示)	u	电压瞬时值
g	电导	X, x	电抗
g_0	变频跨导	Y, y	导纳
g_m	跨导	Y_f	正向转移导纳
$H(j\omega)$	传输函数复值	Z, z	阻抗
I	直流电流; 电流振幅	a	传输线相移常数; 共基电流放大系数
i	电流瞬时值	a_c	电容温度系数
K	电压放大倍数(放大量); 锁相环环路增益	a_L	电感温度系数
$K(t)$	开关函数	a_f	频率温度系数
K_d	波段系数; 检波器传输系数	β	共发电流放大系数
K_p	功率放大倍数	γ	变容管电容指数
$K_{0.1}$	矩形系数	ζ	阻尼系数
k	波茨曼常数; 耦合系数	η	效率
k_c	临界耦合系数	θ	信号起始相角; 电流脉冲通角
k_f	振荡器反馈系数值	$\dot{\theta}$	瞬时角频率
L	电感	θ_s	瞬时相差
M	互感	λ	波长
m	调幅度(振幅调制度)	ξ	电压利用系数; 广义失谐
m_f	调频指数	ρ	回路特性阻抗
m_p	调相指数	τ	时常数; 时移
N	变压器线圈匝数; 噪声功率	φ	幅角; 信号相位
N_f	噪声系数	ω	角频率
n	变压器线圈匝比	Ω	调制角频率
P	功率		
p	接入系数; 运算符		

目 录

<p>第一章 绪论 1</p> <p> 第一节 概述 1</p> <p> 第二节 信号、调制和频谱 2</p> <p> 第三节 无线电设备系统的组成 7</p> <p> 一、无线电通信设备 7</p> <p> 二、彩色电视接收机 8</p> <p> 参考文献 11</p> <p> 思考题与习题 11</p> <p>第二章 高频电路基础 12</p> <p> 第一节 高频电路中的有源器件和无源网络 12</p> <p> 一、高频电路中的有源器件 12</p> <p> 二、高频振荡电路 13</p> <p> 三、高频变频器和传输线变压器 22</p> <p> 四、石英晶体谐振器 30</p> <p> 五、陶瓷滤波器 33</p> <p> 六、声表面波滤波器 33</p> <p> 第二节 高频小信号放大器 35</p> <p> 一、概述 35</p> <p> 二、高频调谐放大器 36</p> <p> 三、多级调谐放大器 46</p> <p> 四、高频集成放大器 48</p> <p> 第三节 电子噪声 49</p> <p> 一、电子噪声的来源与特性 50</p> <p> 二、晶体管放大器中的噪声 55</p> <p> 三、噪声系数和噪声温度 56</p> <p> 四、噪声系数的计算 58</p> <p> 五、噪声系数的测量 62</p> <p> 附录 各种组态 Y 参数变换关系 64</p> <p> 参考文献 64</p> <p> 思考题与习题 64</p> <p>第三章 高频功率放大器 68</p> <p> 第一节 概述 68</p> <p> 第二节 高频功率放大器的原理与特性 68</p> <p> 一、工作原理 68</p> <p> 二、高频功率放大器的近似分析 72</p> <p> 三、高频功放的外部特性 78</p> <p> 第三节 高频功放的高频特性 81</p>	<p> 一、少数载流子的渡越时间效应 82</p> <p> 二、非线性电抗效应 83</p> <p> 三、发射极引线电感的影响 83</p> <p> 四、饱和压降的影响 83</p> <p> 第四节 高频功率放大器的实际线路 84</p> <p> 一、直流馈电线路 84</p> <p> 二、高频功放的输出线路 86</p> <p> 三、推挽连接线路 91</p> <p> 第五节 高效功放、功率合成与射频模块放大器 93</p> <p> 一、D类高频功率放大器 93</p> <p> 二、功率合成器 96</p> <p> 三、射频模块放大器 99</p> <p> 第六节 晶体管倍频器 102</p> <p> 附录 余弦脉冲分解系数表 104</p> <p> 参考文献 106</p> <p> 思考题与习题 106</p> <p>第四章 正弦波振荡器 110</p> <p> 第一节 反馈振荡器的原理 110</p> <p> 一、反馈振荡器的原理分析 110</p> <p> 二、反馈振荡器线路的组成 111</p> <p> 三、线路分析举例——互感反馈振荡器 112</p> <p> 第二节 振荡条件的分析 113</p> <p> 一、振幅平衡条件 113</p> <p> 二、相位平衡条件 114</p> <p> 三、稳定条件 115</p> <p> 第三节 振荡器的线路 116</p> <p> 一、构成振荡器线路的原则 116</p> <p> 二、电容反馈振荡器 117</p> <p> 三、电感反馈振荡器 119</p> <p> 四、两种改进型的电容反馈振荡器 120</p> <p> 五、场效应管振荡器 122</p> <p> 六、压控振荡器 124</p> <p> 七、E1648 单片集成振荡器 125</p> <p> 第四节 振荡器的频率稳定 127</p> <p> 一、频率稳定的意义和表征 127</p> <p> 二、振荡器的稳频原理 128</p>
--	---

三、振荡器的稳频措施	130	二、混频电路	218
第五节 LC 振荡器的设计考虑	132	第四节 混频器的干扰	226
一、振荡器电路选择	133	一、信号与本振的自身组合干扰	226
二、晶体管选择	133	二、外来干扰与本振的组合干扰	228
三、起始工作点和工作状态的选择	133	三、交叉调制干扰(交调干扰)	230
四、振荡回路和反馈电路的元件选择	133	四、互调干扰	231
第六节 晶体振荡器	134	五、包络失真和阻塞干扰	232
一、石英晶体谐振器简述	135	六、倒易混频	232
二、晶体振荡器电路	136	参考文献	233
三、高稳定晶体振荡器	142	思考题与习题	233
第七节 振荡器中的几种现象	144	第七章 频率调制与解调	241
一、间歇振荡	144	第一节 调频信号的分析	242
二、频率拖曳现象	145	一、调频信号的分析与特点	242
三、振荡器的占据现象	146	二、调相与调频	248
四、寄生振荡	148	第二节 调频信号的产生	250
参考文献	150	一、直接调频法	250
思考题与习题	151	二、间接调频法(阿姆斯特朗法)	251
第五章 频谱的线性搬移电路	155	第三节 变容二极管直接调频	252
第一节 非线性电路的分析方法	155	一、变容二极管	252
一、非线性函数的级数展开分析法	156	二、变容二极管直接调频性能分析	253
二、线性时变电路分析法	158	三、变容管调频器的实际电路—— C_j 部分	
第二节 二极管电路	160	接入回路的变容管调频器线路	255
一、单二极管电路	160	第四节 其它直接调频器电路	256
二、二极管平衡电路	162	一、晶体振荡器直接调频	256
三、二极管环形电路	165	二、电抗管直接调频	257
第三节 差分对电路	169	第五节 间接调频	
一、单差分对电路	169	——从调相器获得 FM 信号	260
二、双差分对电路	172	一、概述	260
第四节 其它频谱线性搬移电路	175	二、改变回路参数的移相电路	260
一、晶体三极管频谱线性搬移电路	175	第六节 调频信号的解调概述	261
二、场效应管频谱线性搬移电路	177	一、概述	261
参考文献	178	二、对鉴频器的要求	262
思考题与习题	178	三、相位检波器(鉴相器)	262
第六章 振幅调制、解调及混频	181	第七节 振幅鉴频器	266
第一节 振幅调制	181	一、失谐回路振幅鉴频器	266
一、振幅调制信号分析	181	二、差分峰值振幅鉴频器	267
二、振幅调制电路	188	第八节 互感耦合回路相位鉴频器	268
第二节 振幅信号的解调	200	一、电路及基本原理	268
一、振幅解调的方法	200	二、工作原理	269
二、二极管峰值包络检波器	202	第九节 比例鉴频器	271
三、同步检波	211	一、电路	271
第三节 混频	214	二、工作原理	272
一、混频的概述	214	三、自限幅原理	273

第十节 正交鉴频器	274	三、对输入正弦信号的响应	312
一、电路组成	274	四、稳定性问题	315
二、正交鉴频器解调 FM 信号的分析	274	五、非线性跟踪	316
三、集成电路正交鉴频器	275	第三节 捕获特性	318
第十一节 调频发射机和调频接收机 的组成	278	一、捕获过程	318
一、调频发射机的组成	278	二、捕获带与捕获时间	321
二、调频接收机的组成	279	第四节 集成锁相环路及其应用	322
第十二节 调频制中的噪声、门限效应 和特殊电路	280	一、集成化环路部件	322
一、调频制中的噪声	280	二、单片集成锁相环路	326
二、调频信号解调的门限效应	282	三、集成锁相环路的应用	327
三、预加重电路与去加重电路	284	参考文献	329
四、静噪电路	285	思考题与习题	329
参考文献	287	第九章 典型整机线路介绍	331
附录 贝塞尔函数的数值表	288	第一节 短波 100 瓦收发信机	331
思考题与习题	290	一、电台的主要性能指标	331
第八章 锁相环原理及其应用	295	二、发信机的组成和工作原理	332
第一节 基本原理	296	三、短波 100 瓦收发信机中的 部分电路	335
一、相位关系的描述	296	第二节 KG107 UHF 通信机	335
二、环路组成	297	一、电台的主要性能指标	336
三、环路模型与动态方程	301	二、收发信机的组成和工作原理	336
四、一阶环路的捕获、锁定与失锁	302	三、KG107 电台部分电路	337
第二节 跟踪特性	307	思考题与习题	338
一、线性相位模型与传递函数	307	本书部分习题答案	340
二、对输入暂态信号的时间响应 ——暂态误差与稳态误差	310		

第一章 绪 论

第一节 概 述

本书主要讨论用于各种电子系统和电子设备中的高频电子线路。无线电技术，或者更广义地说无线电电子学已广泛用于国民经济、国防建设、日常生活的各个领域。它们的一个共同特点就是利用高频信号来传递消息。例如，我们所熟悉的广播、电视、无线电通信，无一不是如此。因此，尽管它们在所传递消息的形式、工作方式以及设备体制组成等方面有很大不同，但设备中产生、接收、检测高频信号的基本电路大都是相同的。本书将主要结合无线电通信这一方式讨论其中的高频电路的线路组成、工作原理和分析。这有利于明确学习基本电路的目的性，加强有关设备和系统的概念。同时，对于其它无线电技术，也有典型意义。

这里使用的“高频”这一术语，广义来说就是适于无线电传播的无线电频率，通常又称“射频”。各种无线电技术，大多都要利用无线电传播。无线电传播一般都要用高频信号，主要原因有二：一个是高频适于天线辐射，从而在空中产生无线电波；另一个是高频具有宽阔的频段，能容纳许多互不干扰的频道，也能传播某些宽频带的消息信号。

与信号频率 f 对应的一个参数是波长 λ ，它表示作为空间无线电波相邻两对应点(如同一相位的波腹)的空间距离。在自由空间，波长与频率的关系为

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1-1)$$

式中， c 为自由空间的光速($c=3 \times 10^8$ m/s)； λ 的单位为 m。我们知道，无线电波正是以光速传播的。根据天线理论，只有当天线的尺寸(对于线天线就是长度，面天线就是边缘长度)大到可以与波长 λ 相比较时，天线才能有效地辐射电磁波。由于天线尺寸的实际限制，无线电频率的下限约为几十千赫至几百千赫，上限频率则可以达几千兆赫至几万兆赫，甚至更高。

众所周知，任何载有消息的无线电波都占有一定的信号频带。射频频率越高，可利用的总频带(或称波段)就越宽，因此利用高频可以在同一波段中实现许多不同对象间的消息传输。此外，某些频带很宽的消息(如电视图像、多路话音、雷达信号等)只能在很高的频率上才能传输。比如，电视图像信号的频带宽度约为 6 MHz，它只适宜于在几十兆赫以上的频率上传播。

决定各种无线电技术使用波段的另一主要因素，是无线电波的传播方式。不同的高频波段通常有最适宜的传播方式，而传播方式不同又决定了传播距离和传播性能(如传播的衰减大小，信号的稳定性等)。无线电波传播主要方式有：视距传播、地波传播、电离层传播(天波传播)、对流层散射传播等。图 1-1 是这几种传播方式的示意图。

表 1-1 列出了无线电波的波段划分、主要传播方式和用途。表中关于传播方式和用途的划分都是相对而言的。通常将频率高于 1 000 MHz、波长短于 3 cm 的范围统称为微波。

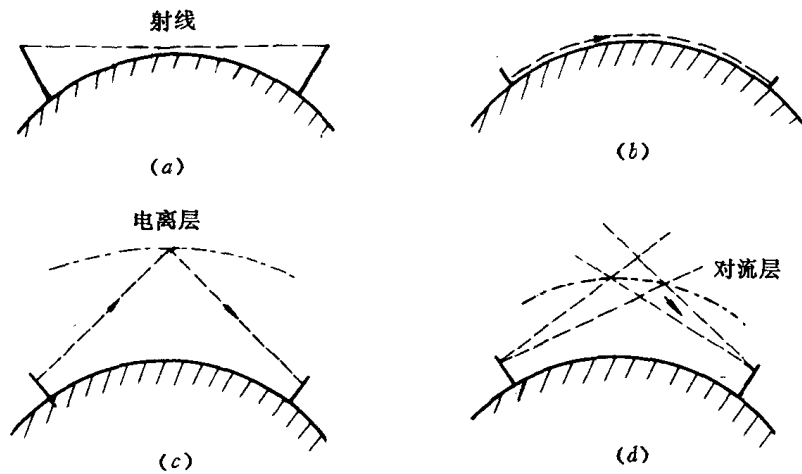


图 1-1 无线电波的几种主要传播方式

(a) 视距传播；(b) 地波传播；(c) 电离层传播；(d) 对流层散射传播

狭义的“高频”通常指低于微波频率的范围。本书内容只限于狭义的高频范围，这是因为在微波波段，无论使用的有源器件和线路结构都与高频波段很不相同。当然，在本书中所讨论的一些高频电路的基本原理，对微波范围也是适用的。

表 1-1 无线电波的波段划分

波段名称	波长范围	频率范围	主要传播方式和用途
长波波段	1 000~10 000 m	30~300 kHz	地波；远距离通信
中波波段	100~1 000 m	300 ~3 000 kHz	地波、天波；广播、通信、导航
短波波段	10~100 m	3~30 MHz (高频—HF)	天波、地波；广播、通信
超短波波段	1~10 m	30~300 MHz (甚高频—VHF)	视距传播、对流层散射；通信、电视广播、调频广播、雷达
分米波波段	10~100 cm	300~3 000 MHz (超高频—UHF)	视线传播、对流层散射；通信、中继通信、卫星通信、雷达、电视广播
厘米波波段	1~10 cm	3 000~30 000 MHz (极高频—SHF)	视线传播；中继通信、卫星通信、雷达

第二节 信号、调制和频谱

在高频电路中，我们要处理的是一些信号。我们遇到的信号主要有三种：消息信号、高频载波信号和已调信号。

消息信号就是表现消息的电信号，如话音、数据、电报、图像信号等就是常见的消息

信号。话音信号与图像信号是随时间连续变化的信号，是一种模拟信号。数据和电报信号是一种取离散值的时间信号，是一种数字信号。图 1-2 就是模拟信号和数字信号的波形。图 1-2(b) 中的 E 和零代表着数字的 1 和 0，是二进制数字。

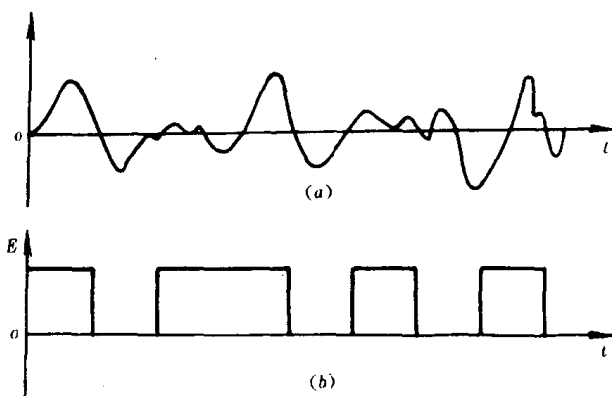


图 1-2 模拟信号与数字信号的波形

(a) 模拟信号；(b) 数字信号

表示一个信号，通常可用三种方法：将它表示为电压、电流的时间函数；直接画出它的波形；频谱分析法。对于较简单的信号（如正弦波、周期性方波等），用前两种方法表示是很方便的。对于较复杂的信号，比如话音信号、图像信号，由于它的复杂性和随机性，难以用表示式和波形直接描述。频谱分析法是基于这样一个事实，一个确定的时间信号 $f(t)$ ，总可以分解为许多不同频率的单一正弦信号。周期性的时间信号可以用傅利叶级数分解为许多个离散的频率分量（各分量间成谐波关系）；非周期的时间信号可以用傅氏变换方法分解为连续谱，信号为连续谱的积分。通过对这些分量的研究就可以了解信号的许多特性，如信号的频率分布，信号的带宽等。在研究和设计某些电子线路时，常常需要了解信号的这些特性。频谱分析法还有一个好处，就是它可以用仪器对信号（甚至是随机信号）进行测量分析。频谱分析仪就是其中最有用的一种仪器。

设周期性时间信号为 $f(t)$ ，当 $f(t)$ 是连续函数，或只有有限个间断点（在周期内）时，它可以展开为傅氏级数

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t) \quad (1-2)$$

或

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\Omega t} \quad (1-3)$$

式中， $\Omega = 2\pi/T$ ， T 为信号周期，且有：

$$\left. \begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos n\Omega t dt & (n = 0, 1, 2, \dots) \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin n\Omega t dt & (n = 1, 2, \dots) \\ c_n &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\Omega t} dt & (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

公式(1-3)是周期信号的指数展开式， c_n 是复数。这里 n 可取正、负值，这表示展开式中还有“负”频率分量。当然，这只是由于分析方便而引入的，这样得到的频谱称为双边谱。而公式(1-2)得到的是单边谱。

图 1-3 是一周期性方波的波形与对应的单边谱与双边谱。此波形除了直流($I/2$)以外，是一奇函数，因此余弦项的系数 a_n 都为零。它的展开式为

$$i = I \left[\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sin \Omega_1 t + \frac{2}{3\pi} \sin 3\Omega_1 t + \frac{2}{5\pi} \sin 5\Omega_1 t + \dots \right] \quad (1-5)$$

式中, $\Omega_1 = 2\pi/T$ 。

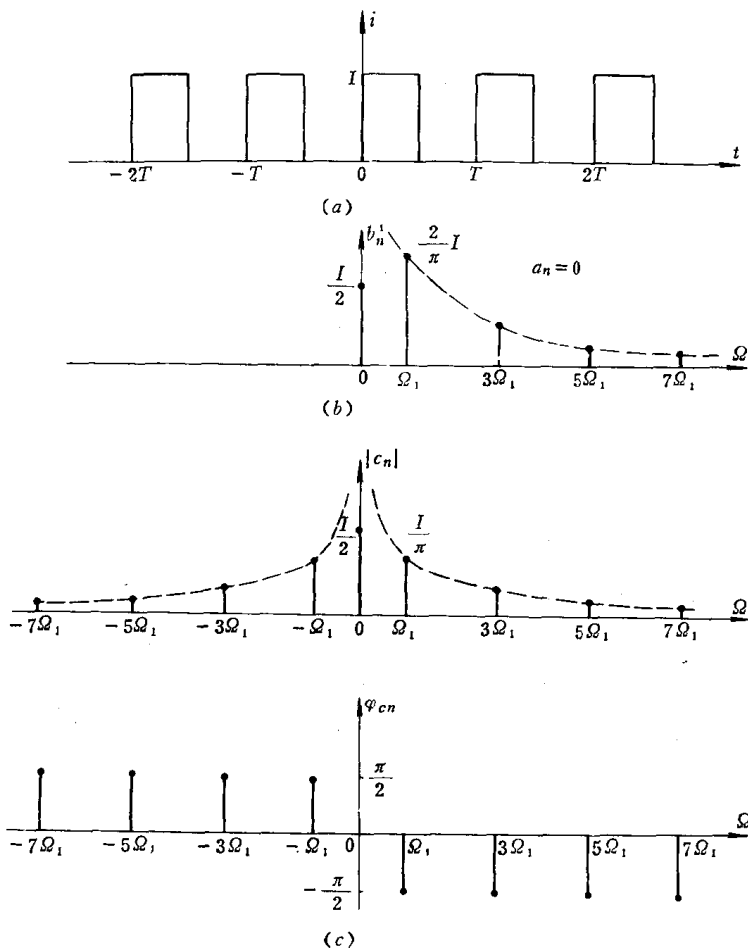


图 1-3 周期性方波信号的波形与频谱

(a) 方波信号波形; (b) 单边谱; (c) 双边谱

对于非周期时间信号 $f(t)$, 它的傅氏变换为 $F(\Omega)$, 是 Ω 的连续函数, 量纲为 A/Hz 或 V/Hz ,

$$F(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\Omega t} dt \quad (1-6)$$

信号 $f(t)$ 则可以表示为谱密度 $F(\Omega)$ 的积分和, 即

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\Omega)e^{j\Omega t} d\Omega \quad (1-7)$$

$f(t)$ 是 $F(\Omega)$ 的反变换。公式(1-6)表示的是双边谱。非周期信号可以看作是周期 T 为无穷大的信号。由公式(1-4)可知, 当 T 趋于无穷大时, 频率分量趋于无限小; 同时, 分量由离散变为连续。引用极限的概念, 这些分量可以用连续分布的谱密度表示。由信号分析课程可知, 如果引用冲击函数 $\delta(\Omega)$ 的概念, 即使周期性信号, 也可以用谱密度表示, 从而可以将两者统一起来。但是为了方便, 在本书中, 我们仍将用频谱分量和频谱密度分别描述周

期信号与非周期信号的频域特性。

人耳可闻的声音信号的频率范围约从 20 Hz 到十多千赫。话音的频率范围大致从 100 Hz 到 6 kHz, 其主要能量集中在 0.3 ~ 3.4 kHz, 通常只需传送此频率范围的信号, 就能保证通话所需的可懂度和自然度。话音信号是非周期性的随机信号。图 1-4 是话音信号的频谱分布示意图, 由于是连续时间信号, 谱是连成一片的。



图 1-4 话音信号的频谱分布图

高频载波信号是指尚未受消息调制的单一频率 (ω_c) 正弦波信号, 它可以表示为

$$u = U \cos(\omega_c t + \varphi) \quad (1-8)$$

式中, U 为正弦信号的振幅; $\omega_c = 2\pi f_c$ 为载波角频率, f_c 为载波频率; φ 为初始相位。

要通过载波传送消息, 就必须使载波信号的某一参数——振幅、频率或相位, 随消息信号改变, 这一过程称为调制。

从原理上看, 通过分别控制高频信号的振幅、频率、相位, 就可以实现三种基本调制: 振幅调制(调幅)、频率调制(调频)、相位调制(调相), 并常用 AM、FM、PM 表示。

当用电报信号或数字消息信号进行调制时, 通常又称为键控。此时, 载波的振幅、频率、相位在有限几个值之间变化(移动)。故数字信号的调制又分别称为振幅键控(ASK)、频率键控或称频移键控(FSK)、相位键控(PSK)。

除了以上的基本调制外, 还可以实现某些组合调制。在某些通信系统, 比如微波中继通信、卫星通信和移动通信中, 也会用到以脉冲信号为中间信号的二重调制。即首先用消息信号对脉冲进行调制, 如常用的脉码调制(PCM), 然后用此受调脉冲信号对载波进行调制或键控。

本书的五、六、七章将讨论高频范围内的几种常用调制。

调制的另外一个功用就是能实现信道的复用。比如中继通信和卫星通信中多路电话的传送, 就是经调制实现的。立体声广播和电视广播也是利用组合调制, 实现多种消息的传送(如双声道话音、电视中的图像、伴音、同步信号等)。

受消息调制的高频信号称为已调波信号。现以最简单的常规振幅调制(AM)为例, 说明已调信号的特点。中、短波广播和传统的单路无线电通信就是用这种调制。先看单一音频信号的振幅调制。设音频信号为 $u_\Omega = U_\Omega \cos \Omega t$, 则振幅受调制的已调信号为

$$u(t) = U_c (1 + m \cos \Omega t) \cos(\omega_c t + \varphi) \quad (1-9)$$

式中, m 与 U_Ω 成正比, $m = kU_\Omega/U_c$, 称为调幅度。比较公式(1-8)和(1-9)可见, 已调信号的特点就是载波的振幅 $U_c(1 + m \cos \Omega t)$ 与音频信号成线性变化关系。图 1-5(a)、(b)、(c) 分别为音频信号、载波信号和已调波信号的波形。由图可见, m 必须小于 1, 高频信号的振幅(包络)才能无失真地反映被传送的音频信号。

用三角函数关系可将公式(1-9)分解为

$$\begin{aligned} u(t) = & U_c \cos(\omega_c t + \varphi) + \frac{1}{2} m U_c \cos[(\omega_c - \Omega)t + \varphi] \\ & + \frac{1}{2} m U_c \cos[(\omega_c + \Omega)t + \varphi] \end{aligned} \quad (1-10)$$

式中，除了原有的载波分量外，还出现了 $\omega_c - \Omega$ 和 $\omega_c + \Omega$ 两个频率分量。它们的振幅都与 U_c 成正比。这两个分量分别称为下边频 ($\omega_c - \Omega$) 和上边频 ($\omega_c + \Omega$)。图 1-5(d) 表示了调制信号和已调信号的频谱分布。由图可见，振幅调制过程也可以看成是频率搬移过程，即将音频信号搬移到载波频率的两边。话音调制的已调信号可表示为

$$u(t) = U_c [1 + mf(t)] \cos(\omega_c t + \varphi)$$

式中， $f(t)$ 为无量纲的话音信号。因 $f(t)$ 可以分解为连续谱，其中每个频谱分量都对载频

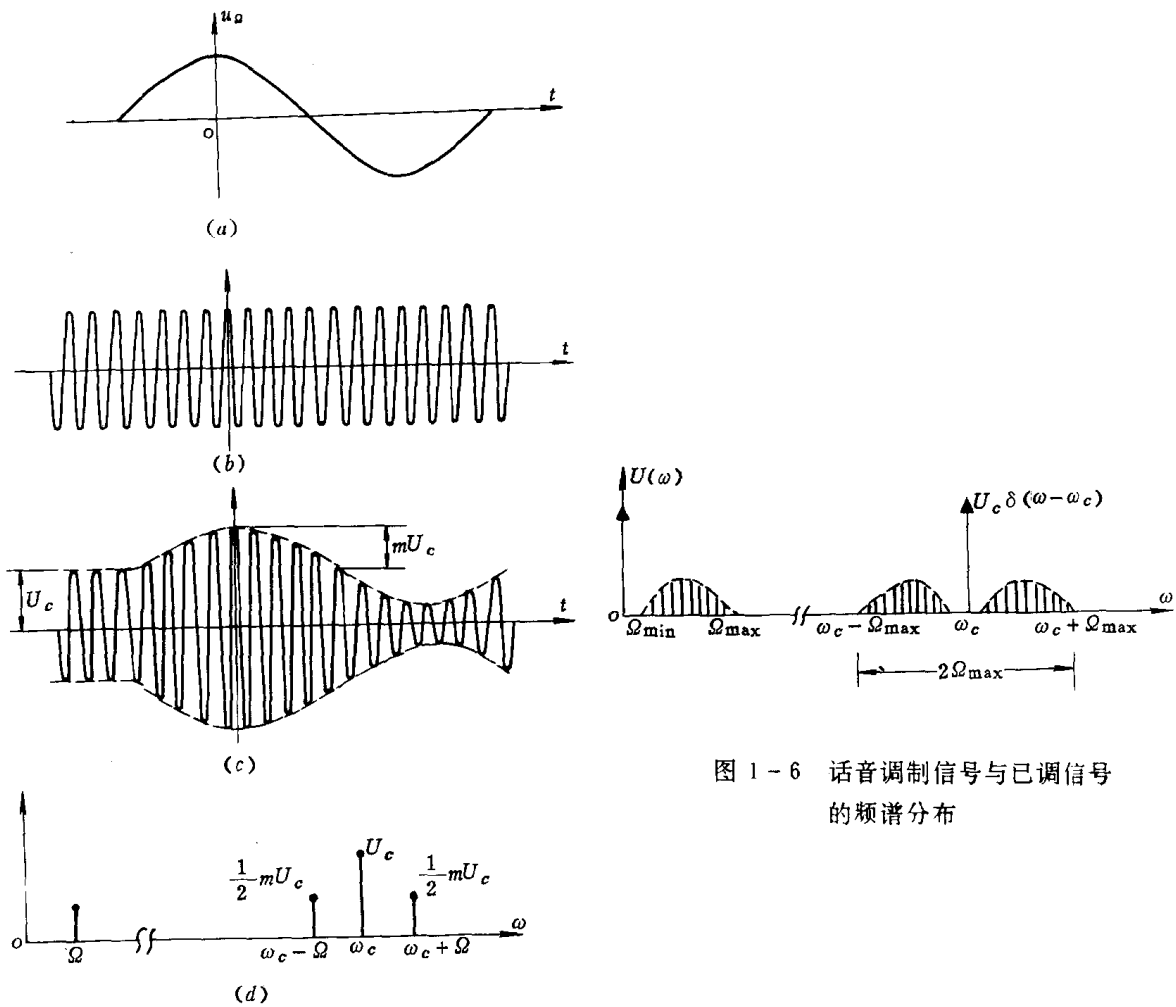


图 1-6 话音调制信号与已调信号的频谱分布

图 1-5 振幅调制信号的波形与频谱

- (a) 音频信号；
- (b) 载波信号；
- (c) 已调信号；
- (d) 调制信号与已调信号的频谱

调幅产生两个对应的边频分量，故已调信号在载频两边出现对应的两个边带，如图 1-6 所示。已调信号在载波频率 ω_c 附近占据一定的频带。设话音信号的最高频率为 F_{max} ，则已调信号的频带宽度为

$$B_s = 2F_{max} \tag{1-11}$$

设传输的话音最高频率为 3 400 Hz，则已调信号的带宽为 6 800 Hz。为使接收机正确地接收此信号，其高频电路的频带宽度应大于此信号的频带宽度。

由公式(1-10)中可以看到,只有两个边频载有消息信号的信息(m 与 Ω),因此,也可以只利用三种分量(载波、上边频和下边频)中的一部分来进行传输。只利用两个边带的调制称为双边带调制(DSB)。只用其中一个边带的调制称为单边带调制(SSB)。利用一个边带和部分载波的调制称为残留边带调制(VSB)。它们都是广义振幅调制的一种。双边带调制的已调信号,其带宽与上述AM调制相同,为 $2F_{\max}$ 。单边带调制和残留边带调制的已调信号,其带宽要窄些。

对于其它各种调制,已调信号同样要占据一定的频带宽度。这是关于信号和调制的一个基本概念。掌握和了解已调信号的频谱结构和带宽,也是学习本书的一个内容。

第三节 无线电设备系统的组成

各种无线电设备中都离不开高频电路。为了初步了解各种高频电路的功用特点,可以结合典型的无线电设备组成进行介绍。无线电通信设备、电视广播接收机就是较典型的无线电设备系统。

一、无线电通信设备

通信的任务就是要传送消息。这里的消息指语言、文字、图像和数据等,它们都是以电信号的形式出现的。因此,现代通信又称电信。图1-7是无线电通信系统组成图。它由发信设备、收信设备、信道等各部分组成。信道就是电磁波传播的途径。图中,只表示了一个方向的通信。发端用户通过发信设备将消息变为适合于信道传送的信号;收信设备则把收到的信号还原成消息,并传送到收端用户。

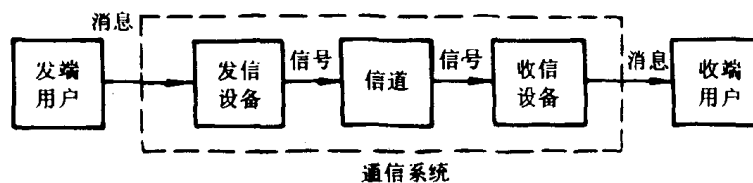


图 1-7 通信系统的组成

无线电通信的类型很多,可以按传输手段、频率范围、用途等分类。如按传输手段分类,有短波通信、超短波通信、微波中继通信和卫星通信等。按传送消息类型分类,有模拟通信和数字通信。按用途分类,有地面移动通信、航空通信和舰船通信等等。各种不同的通信,其设备的组成、设备的复杂程度都有很大不同。为了说明高频电路在无线电通信设备中的功用和特点,现举一个用于超短波无线电移动通信中的单工无线电台的组成方案。图1-8是此无线电台的组成框图。它是由无线电发信机和无线电收信机两部分组合构成。在无线通信中,为了充分利用频率资源,发、收信号常用同一个频率,收、发轮流工作,这种工作方式称为单工通信。

在发射机中,振荡器的功用是产生最初的高频信号,它的工作频率等于或低于所需的工作频率。在后一种情况下,可以通过倍频器,将振荡频率整数倍地倍增到其工作频率上。图上的激励放大器是高频信号放大器,它将高频信号放大到一定电平,以激励(或称推动)