



高职高专“十一五”规划教材

高频电子线路

主编 虞 沧

GAOPIN DIANZI
| XIANLU |

 吉林大学出版社

要 要 容 内

高职高专“十一五”规划教材

高频电子线路

主 编 虞 沧

副主编 胡光夏 冯红军

王念桥 杨诗凤



308957

广西工学院鹿山学院图书馆



d308957

吉林大学出版社

内容提要

本书主要介绍高频电子线路的基本原理、分析方法及基本计算方法。主要内容有通信系统的组成、高频电子线路中各种选频网络与阻抗变换电路、高频小信号放大器、正弦波振荡器、频谱搬移电路、角度调制与解调电路、反馈控制电路与频率合成技术以及高频功率放大器。每章后都附有本章思考题与习题,供读者参考。

本书可作为各高等院校本科及高职高专电子信息类及相关专业的教材及电子技术工程人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路 / 虞沧主编. — 长春: 吉林大学出版社,

2009. 9

(高职高专“十一五”规划教材)

ISBN 978-7-5601-4743-7

I. 高… II. 虞… III. 高频—电子电路—高等学校: 技术学校—教材 IV. TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 160170 号

书 名: 高职高专“十一五”规划教材

高频电子线路

作 者: 虞沧 主编

责任编辑、责任校对: 邵宇彤

吉林大学出版社出版、发行

开本: 787×1092 毫米 1/16

印张: 16.25 字数: 364 千字

ISBN 978-7-5601-4743-7

封面设计: 超视觉工作室

北京市彩虹印刷有限责任公司 印刷

2009 年 9 月 第 1 版

2009 年 9 月 第 1 次印刷

定价: 31.00 元

版权所有 翻印必究

社址: 长春市明德路 421 号 邮编: 130021

发行部电话: 0431-88499826

网址: <http://www.jlup.com.cn>

E-mail: jlup@mail.jlu.edu.cn

出版说明

作为高等教育的重要组成部分,高等职业教育是以培养具有一定理论知识和较强实践能力,面向生产、面向服务和管理第一线职业岗位的实用型、技能型专门人才为目的的职业技术教育,是职业技术教育的高等阶段。目前,高等职业教育教学改革已经从专业建设、课程建设延伸到了教材建设层面。根据国家教育部关于要求发展高等职业技术教育,培养职业技术人才的大纲要求,我们组织编写了这套《高职高专“十一五”规划教材》。本系列教材坚持以就业为导向,以能力为本位,以服务学生职业生涯发展为指导思想,以与专业建设、课程建设、人才培养模式同步配套作为编写原则。

从专业建设角度,相对于普通高等教育的“学科性专业”,高等职业教育属于“技术性专业”。技术性专业的知识往往由与高新技术工作相关联的那些学科中的有关知识所构成,这种知识必须具有职业技术岗位的有效性、综合性和发展性。本套教材不但追求学科上的完整性、系统性和逻辑性,而且突出知识的实用性、综合性,把职业岗位所需要的知识和实践能力的培养融会于教材之中。

从课程建设角度,现有的高等职业教育教材从教育内容上需要改变“重理论轻实践”、“重原理轻案例”,教学方法上则需要改变“重传授轻参与”、“重课堂轻现场”,考核评价上则需改变“重知识的记忆轻能力的掌握”、“重终结性的考试轻形成性考核”的倾向。针对这些情况,本套教材力求在整体教材内容体系以及具体教学方法指导、练习与思考等栏目中融入足够的实训内容,加强实践性教学环节,注重案例教学,注重能力的培养,使职业能力的培养贯穿于教学的全过程。同时,使公共基础类教材突出职业化,强调通用能力、关键能力的培养,以推动学生综合素质的提高。

从人才培养模式角度,高等职业教育人才的培养模式的主要形式是产学结合、工学交替。因此,本教材为了满足有学就有练、学完就能练、边学边练的实际要求,纳入新技术引用、生产案例介绍等来满足师生教学需要。同时,为了适应学生将来因为岗位或职业的变动而需要不断学习的情况,教材的编写注重采用新知识、新工艺、新方法、新标准,同时注重对学生创造能力和自我学习能力的培养,力争实现学生毕业与就业上岗的零距离。

为了更好地落实指导思想和编写原则,本套教材的编写者既有一定的教学经验、懂得教学规律,又有较强的实践技能。同时,我们还聘请生产一线的技术专家来审稿,保证教材的实用性、先进性、技术性。总之,该套教材是所有参与编写者辛勤劳作和不懈努力的成果,希望本套教材能为职业教育的提高和发展作出贡献。

这就是我们编写这套教材的初衷。

前 言

“高频电子线路”是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。考虑到应用型人才培养的特点，本书中内容以通信系统为主要研究对象，介绍了发送、接收设备所涉及的高频电子线路的各功能单元电路和典型线路的功能、工作原理、性能特点及其分析方法，以理解概念、实现功能为主。在讲述器件和电路特点的同时，重点介绍了各种电路的机理，强调了概念的应用、功能的实现；同时理论与实践相结合，使学生在理论学习的同时建立起整体的概念。

全书共分八章，系统地介绍了通信系统的组成、高频电子线路中各种选频网络与阻抗变换电路、高频小信号放大器、正弦波振荡器、频谱搬移电路、角度调制与解调电路、反馈控制电路与频率合成技术以及高频功率放大器。

本书由武汉职业技术学院虞沧主编并统稿，武汉职业技术学院电子信息工程学院胡光夏老师、河南质量工程职业学院冯红军、武汉职业技术学院电子信息工程学院王念桥、杨诗凤任副主编。其中虞沧编写第一、二章，第三、八章由胡光夏编写，第四、六章由杨诗凤编写，第五章由冯红军编写，第七章由王念桥编写。

本书可作为高等学校通信工程、电子信息工程及其他电子信息类相近专业的教学用书和参考书，也可供有关工程技术人员参考。

作者深知，本书所涉及的范围广、新知识多，我们对这一领域的学习和研究还很浅，水平有限，书中难免有疏漏、错误和不妥之处，恳请广大读者不吝指正。

编 者

2009 年 4 月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 概 述	1
第二节 无线电发送、接收系统	3
习 题	6
第二章 选频网络与调谐放大器	7
第一节 LC 谐振回路	7
第二节 滤波器	24
第三节 小信号调谐放大器	33
第四节 高频集成放大器	51
第五节 放大器的噪声	58
习 题	63
第三章 高频功率放大器与功率合成技术	65
第一节 概 述	65
第二节 谐振功率放大器电路组成	77
第三节 丁类(D 类)功率放大器	84
第四节 宽带高频功率放大电路	88
第五节 功率合成器	91
第六节 射频模块放大器和集成功率放大器简介	97
习 题	101
第四章 正弦波振荡器	102
第一节 反馈型振荡器的基本原理与分析方法	102
第二节 LC 正弦波振荡器	106
第三节 振荡器的稳定性	118
第四节 石英晶体振荡器	123
习 题	126
第五章 频谱变换电路	130
第一节 概 述	130
第二节 模拟乘法器	131
第三节 普通调幅波的产生和解调电路	134

第四节	抑制载波调幅波的产生和解调电路	142
第五节	混频电路	145
第六节	倍频器	146
第七节	调角波的基本性质	147
第八节	直接调频电路	153
第九节	间接调频电路	165
第十节	调频波的解调	167
第十一节	限幅器	185
习 题		187
第六章	数字调制与解调	194
第一节	数字基带传输系统	194
第二节	数字信号的载波传输	195
习 题		210
第七章	反馈控制电路与锁相环电路	211
第一节	概 述	211
第二节	二进制振幅键控(ASK)调制与解调	211
第三节	二进制频移键控(FSK)调制与解调	216
第四节	二进制相位键控(PSK)调制与解调	221
第五节	多进制数字调制系统	227
第六节	正交振幅调制(QAM)	236
第七节	其他形式的数字调制	241
习 题		242
第八章	频率合成技术	243
第一节	频率合成器的主要技术指标	243
第二节	直接频率合成法	245
第三节	间接频率合成法(锁相环路法)	248
习 题		251
参考文献		252

第一章 绪 论

第一节 概 述

自 19 世纪末至今,在自然科学领域有着许多重大发现和发明,无线电是这些发明中极其重要的一种。它从诞生到现在的近百年中,对人类的生活和生产起着非常重要的作用。

人们在生活和生产等活动中需要将语言、文字、图像及数据等含有信息的信息,从一个地方传送到另一个地方,称之为通信。通信的主要任务就是传输信息,一般含义是从发送者到接收者之间的信息传递,这种利用电信号实现信息传送过程的系统称为通信系统。高频电子线路是无线电设备、通信系统中的重要组成部分。通信过程中所要传送的原始信息,如语言、文字、图像、数据等,通常通过换能器(如麦克风等)转换成为电信号(电流或电压)以便传送,这些反映原始信息的电信号称为基带信号。根据电信号传输的媒介不同,通信可分为有线通信和无线通信两大类。其中利用电缆传送信息的系统称为有线通信系统;利用电磁波传送信息的系统称为无线通信系统;利用光导纤维传送信息的系统称为光纤通信系统。

基带信号通常不直接采用无线电波传送,其原因有两个:一是它们的频率较低、波长较长,不能通过天线有效地发送信息;二是各信号的频谱分布几乎在同一频率范围,如果直接把反映原始信息的电信号通过天线以辐射电磁波的方式传送或通过电缆、光缆传送,信道就无法保证同时传送两路以上的信息而又互不干扰,同时也不便于接收端正确分离两路以上的信息。因此,必须把要传送的电信号设法分开,重要的方法之一是将欲传送的基带信号加载(调制)到某一特定频率的高频电振荡(称为载波)信号上。载有基带信息的高频振荡信号称为已调信号,也称为频带信号。它可通过电缆或光缆把信息传送到接收端,也可通过天线辐射出高频电磁波,将信息传送到接收机。

我们知道,任何载有消息的无线电波都占据一定的频带。频率越高,可利用的总频带(或称波段)就越宽,因此利用高频已调波可在同一波段同时传送多个不同的信息。另外,某些频带很宽的原始信息(如雷达信号、电视图像、多路话音)只能在高频率上传输。例如:电视图像信号的频带宽度约为 6 MHz,它适宜在几十兆赫兹以上的频率上传输。不同波段的无线电波应选择不同的传播方式,传播方式的不同决定了传播的距离和传播特性(如信号的稳定性、衰耗等)的差异。通常无线电波的传播方式主要有视距传播、地波传播、电离层传播(天线传播)、对流层散射传播及卫星传播等,图 1-1 为其示意图。

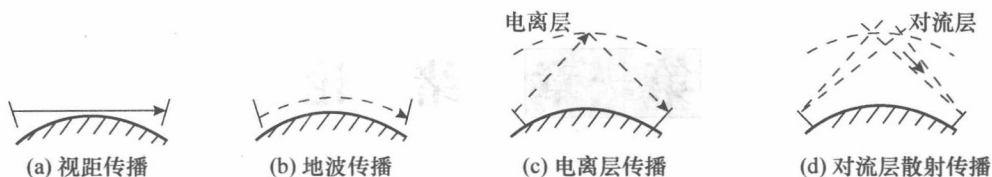


图 1-1 无线电波的几种主要传播方式

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。通常将高于 1000 MHz 的厘米波、毫米波等波段统称为微波。

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	1 000~10 000 m	30~300 kHz	地波、较远距离通信
中波	100~1 000 m	300~3 000 kHz	地波、天波，广播、通信、导航
短波	10~100 m	3~30 MHz (HF 频段)	天波、地波，广播、通信
超短波	1~10 m	30~300 MHz (VHF 频段)	视距传播、对流层散射、通信、电视、雷达
分米波	10~100 cm	300~3 000 MHz (VHF 频段)	视距传播、对流层散射、卫星通信、雷达、电视
厘米波	1~10 cm	3~30 GHz (SHF 频段)	视距传播，中继、卫星通信、雷达
毫米波	0.1~1 cm	30~300 GHz (极高频)	视距传播、射电天文、卫星通信、雷达

显然，对各种无线电通信系统，尽管它们在传递信息形式、工作方式及设备体制等方面有所不同，但设备中所包含的对高频信号的产生、接收及检测处理的基本电路大都是相类似的，这些电路统称为高频电子线路。可见，高频电子线路是随着无线电通信手段的出现而出现的，且随着通信容量的不断增大、使用频率的不断提高而发展的。高频电子线路的各种功能电路的组成及性能则随微电子技术的发展而发展。它经历了电子管电路、晶体管电路和集成电路等三个重要阶段。目前高频电路和模拟电路、数字电路一样，电路的集成度越来越高，各种高频集成电路新器件不断问世，应用越来越广泛，计算机技术也在高频电子线路中得到了应用。高速 DSP（数字信号处理器）结合 MCU（微处理器），把传统的模拟高频电信号变成数字信号进行处理，使得现代无线电信号的处理速度更快，通信质量更高。

本书将结合无线电通信电路，以集成电路为主线，从分立元件电路入手，分析高频电路中的基本单元电路的组成及工作原理，并根据目前高频集成电路的发展，尽可能多地介绍高频集成电路的特性及其典型应用电路。

第二节 无线电发送、接收系统

一、通信系统的组成

通信系统主要由输入/输出换能器、发送/接收设备和信道等三大部分组成，图 1-2 是无线电通信系统的基本组成框图。



图 1-2 无线电通信系统的基本组成框图

在有线通信系统中，信道是电缆或光缆等。而在无线电通信系统中，信道就是电磁波传播的空间，不同频段的电磁波有不同的传播方式和传播特性。无线电通信系统中，需要将信号进行适当的变换。

二、调制与解调

在发送端，发送设备包括输入换能器、发射机和发射天线三部分。其中，输入换能器将待发送的信息变换为基带信号，如果信息表现为声音，那么输入换能器便是将声音变换为电信号的话筒；发射机将基带信号变换成其频带适合在信道中传播的信号，并送入信道，这种变换称为调制。用来对载波进行调制的基带信号称为调制信号。基带信号可以是模拟信号，也可以是数字信号，相应的调制称为模拟调制和数字调制。调制后的高频载波称为已调信号，也称为频带信号。

发射机将已调信号放大并变换为足够强度的高频电振荡，发射天线则将高频电振荡变换为电磁波向外辐射。在接收端，接收信号是发射信号的逆过程，接收设备由接收天线、接收机和输出换能器组成。其中，接收天线将空间传播的电磁波变换为高频电信号，由接收机对该信号进行相应的加工处理，输出换能器则将处理后的电信号还原为所传送的原始信号。如果原始信号表现为声音，那么输出换能器便是将电信号变换为声音的扬声器。

从原理上看，调制过程的实质是一个由调制信号去控制高频载波信号的某一参数，使该参数按照调制信号的规律变化的过程。而高频载波信号（电压或电流）的振幅、频率、相位三个参数可被调控，与之对应可实现三种基本模拟调制，分别是振幅调制（AM）、频率调制（FM）和相位调制（PM）。

现代数字通信系统中，普遍采用数字信号调制技术，通常又称“键控”，此时载波的振幅、频率、相位在有限的几个值之间变化，故数字信号的调制又分别称振幅键控（ASK）、频移键控（FSK）和相移键控（PSK）。除上述基本调制外，还可以实现某些组合调制。在微波通信中还用到以脉冲信号为中间信号的二重调制等，请读者参阅相关文献。

三、无线电收、发信机

图 1-3 是无线电通信发射机的组成框图。其中, 图 (a) 是调幅发射机的组成框图。它包括 3 个组成部分, 即高频 (振荡器、缓冲器、倍频器、高频功放、调制和解调) 电路、低频电路和电源部分 (未画出)。图 (b) 是手持电话机发送部分组成框图。

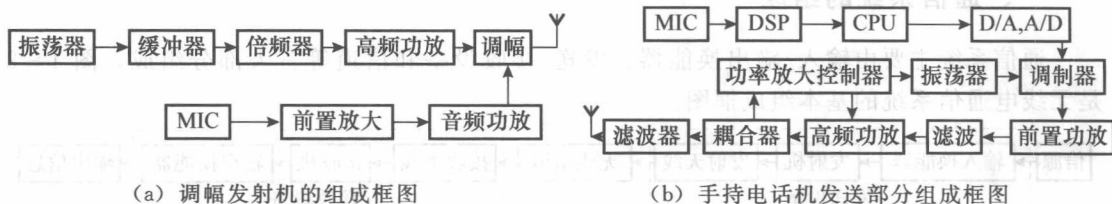


图 1-3 无线电通信发射机的组成框图

图中, 振荡器的作用是产生频率稳定的高频载波信号。为了提高频率稳定度, 通常采用石英晶体振荡器, 并在其后加以缓冲级, 以减小后级对它的影响。一般晶体振荡器的振荡频率不太高, 达不到载波所要求的频率 f_c , 因而在缓冲级后须加若干级倍频器, 将频率提高到所需频率 f_c 上。在图 (b) 所示接收机中, 由于对振荡信号的频率稳定度要求高, 故振荡信号常常由频率合成电路提供, 同时电路中还采用了 DSP 电路、CPU (中央处理器) 和 A/D, D/A 电路等, 对音频信号进行处理。高频功率放大器的主要作用是把信号放大到足够的功率电平, 由发射天线将高频已调信号辐射出去。

从换能器 (如话筒) 输出的低频调制信号经若干级放大器放大到足够的功率电平后, 用以对高频载波信号进行调制。

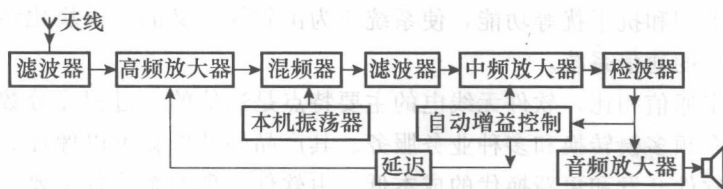
发射机高频输出功率的大小随用途的不同而异, 一般通信发射机输出功率从几百毫瓦以至数千瓦, 广播及电视发射机则可高达几千瓦至几十千瓦。

无线电信号的接收过程正好和发送过程相反, 由接收天线接收到的电磁波先转变为已调高频振荡电流 (或电压), 然后从已调高频振荡电流 (电压) 中检测出原调制信号, 这一过程称为解调。图 1-4 是无线电通信接收机的组成框图。其中, 图 (a) 是超外差调幅接收机的组成框图。图中高频放大器是由一级或多级小信号谐振放大器组成, 它的作用是利用电路中的谐振网络, 从天线接收到的众多频率的信号中选出所需信号, 并予以放大。图 (b) 是手持电话机射频接收部分的组成框图。值得注意的是, 由于谐振放大器的中心频率随所需接收的信号频率 f_c 不同而异, 故此高频放大器选频网络的中心频率必须是可调节的, 这就须要用到 AFT (自动频率调节) 电路。

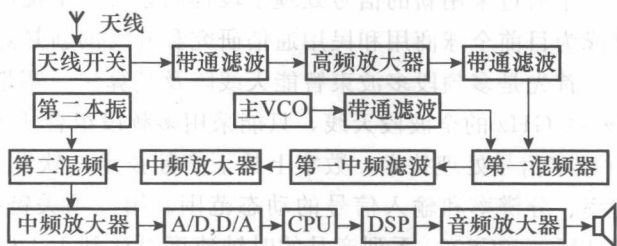
混频器是超外差接收机的核心, 其作用是将高频放大器输出的频率为 f_c 的高频已调信号与来自本地振荡器频率为 f_L 的高频振荡信号相差拍, 产生和频或差频分量, 使高频已调波不失真地变换为载波频率为 f_i 的中频已调波信号。 f_i 是固定值, 称为中频。

本地振荡器是用以产生频率为 $f_L = f_c \pm f_i$ 的高频振荡信号。由于 f_i 为固定值, 而 f_c 随所需接收信号不同而不同, 所以振荡器的振荡频率 f_L 是可调的, 且必须使其正确跟踪 f_c , 目前多采用 $f_L = f_c \pm f_i$ 方式, 即超外差接收方式。

中频放大器是由多级小信号谐振放大器组成的中心频率固定的带通放大器, 用以选择并放大中频调幅信号。中频放大器通常还带有 AGC (自动增益控制) 电路。



(a) 超外差调幅接收机的组成框图



(b) 手持电话机射频接收部分的组成框图

图 1-4 无线电通信接收机的组成框图

检波器的功能是从中频放大器输出的中频调幅信号中检测（解调）出被传送的调制信号。

低频放大器由若干级小信号电压放大器和功率放大器组成，用以放大调制信号并经扬声器发出声音。

由上述可见，在发射机和接收机中，除了低频放大器外，其他都是处理高频信号的电路。它包括高频信号的产生（振荡器）、放大（小信号放大器、功率放大器）、倍频、混频、调制和解调电路。这些单元电路都是由有源器件（分立元件或集成电路）和无源器件构成的，既有线性电路，也有非线性电路。这些单元电路及有关的技术问题就是本书讨论的对象，显然，它们的性能好坏直接影响整个通信系统的质量。

实际的通信设备通常比前面介绍的例子复杂得多，且除了采用上述调幅方式外，还可采用调频等其他调制方式。但无论采用何种调制方式，发射机和接收机都必须包括上述各组成部分，其区别主要在于调制和解调的方式不同。

随着微电子技术、数字信号处理技术和计算机技术的发展，无线电技术发生了根本性变化：从单工到双工通信，从模拟到数字通信，从固定到移动通信。而且通信体制和标准繁多，通信容量的迅速扩大与频率资源极度紧张之间的矛盾日趋激化，于是第三代无线电通信正朝着数字化方向——软件无线电（SoftwareRadio）发展，以解决上述矛盾。

软件无线电是在数字化技术的基础上发展起来的，由软件来确定和完成无线电通信机的功能。它将无线电通信从以硬件为主转变到以软件为主，使多频段、多模式、多信道、多协议、多速率和多功能通信成为可能，也使无线电通信摆脱硬件系统结构的束缚。这一技术最初是在军事通信中提出来的。为了使各兵种之间的通信具有协调、保密、机动、抗干扰和抗摧毁等功能，因而提出了采用软件实现通信的各种功能。它的主要思想：以 DSP 和 CPU 为核心，构造一个开放性、标准化、模块化的通用硬件平台，将信号的调制解调方式、频段和信道选择、数据格式、加密模式、通信协议、滤波等功能以及不同体制标准等用模块化的软件加载来实现，并使宽带 A/D，D/A 尽可能靠近天线，利用 DSP 完成诸

如放大、变频、解调和抗干扰等功能,使系统成为由软件定义的、模块化结构的、具有高灵敏度的、开放性的通信系统。

与目前的数字通信相比,软件无线电的主要特点是通信的全过程充分数字化,完全可编程,具有程控多频多模转换和多种业务服务。其产品硬件更新可以像计算机升级换代一样简单,产品的软件开发和更新换代的成本低。由软件实现的系统各主要功能更易于通过软件加载实现,也易于通过采用新的信号处理手段提高系统抗干扰性能和适应能力。

软件无线电已成为目前全球商用和民用通信研究和开发的新热点。但软件无线电也提出了新的技术问题,首先是多频段多波束智能天线阵及其算法、宽带射频前端技术,目前还未研制出 2 MHz~2 GHz 的全波段天线,只能采用多频段组合式天线。其次是高速宽频带 A/D、高速实时数字信号处理技术、数字上/下变频技术,软件无线电对 ADC 器件的要求主要是采样速率、分辨率和输入信号的动态范围。第三项关键技术是 DSP 器件的处理速度问题,目前 TMS320C6000 系列产品的时钟速度可达到 1.1 GHz,理想的软件无线电需要采用 DPS 完成 ADC 之后的数字信号处理过程,但上述 DSP 器件仍然不能胜任这一任务。此外,还需合适的软件无线电的系统结构、软件算法和通信协议等。图 1-5 所示为软件无线电数字化超外差接收机的基本组成框图。

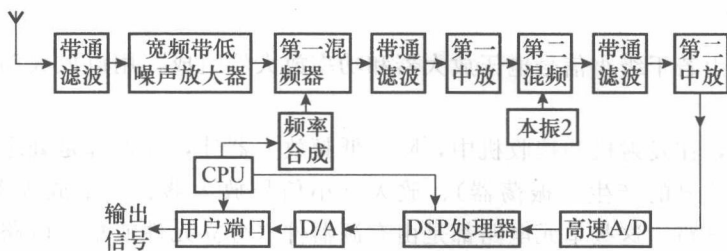


图 1-5 软件无线电数字化超外差接收机的基本组成框图

从图 1-5 可见,射频 (RF) 信号从天线接收,经过预选带通滤波器、宽频带低噪声放大器 (LNA)、第一混频器、带通滤波器和第一中放后再二次混频,产生第二中频信号,通过带通滤波和第二中放后的第二中频信号作为高速 A/D 的输入信号,此后,进行数字信号处理,最后输出所需的音频信号。软件无线电的独特优点是具有整体可编程性,射频频段可编程、信道访问模式可编程、信道编码可编程和调制方式可编程等。而且系统配置灵活,系统功能的增加或改变,只需要适当调整软件及接口功能等,而不需要重新设计系统,特别是硬件系统。由于器件的限制,高速 A/D 和 DSP 等目前只在中频段使用,随着技术的发展,将向射频段发展。



习 题

1-1 无线电波的波段划分、主要传播方式和用途各是什么?

1-2 无线电收、发信机由哪几个主要部分组成? 试画出方框图。你熟悉其中的哪一部分?

第二章

选频网络与调谐放大器

无线电收、发信机中普遍采用高频放大电路，将微弱的高频电振荡信号进行放大，以满足调制、解调等电路的需要。

在无线通信过程中通信信道数多，所占频段范围较宽，工作频率也较高（从几百千赫到几百兆赫，如：卫星通信系统中，工作频率可达数吉赫）。同一通信频段内，存在着许多被传送的无线电信号及噪声，而接收机则只选择出所需要的信号进行放大。因此，接收机中的放大器除了要有足够的增益外，还应具有选择不同频率的信号的能力，于是便产生了各种各样的选频放大器。但无论是哪一种类型的电路，它们主要由两部分组成：一部分是其核心器件放大器件；另一部分是用做选择信号的线性选频网络。放大器件可以是晶体管（BJT）、场效应管（FET）及砷化镓（GaAs）器件等，也可以是高频集成放大器。按通过放大器的频谱宽度，又可分为窄带和宽带放大器。

第一节 LC 谐振回路

LC 谐振回路在高频电路中起着重要的作用。利用其选频特性，可从含有各种信号和干扰的信道中选择出人们所需的信号。LC 谐振回路实际上是 LC 组成的线性选频网络。有关电感器 L 及电容器 C 的基本特性，已在前面的课程中有详细论述，本课程主要分析 LC 在高频工作情况下的特点及分析方法。

一、LC 串联谐振回路

图 2-1 所示是 LC 串联谐振回路， L 和 C 分别为回路电感和回路电容，电阻 r 是它们的损耗。实际上由于电容器的损耗比电感线圈的损耗小得多，故而 r 近似等于线圈的损耗电阻， U_s 为激励源，用 U_s^* 表示，并假定 U_s 是余弦（或正弦）信号，且信号源内阻为零，即

$$U_s^* = U_{sm} \cos(\omega t) \quad (2-1)$$

式中， U_{sm} ——信号源电压幅度；

ω ——角频率，初相角为零。

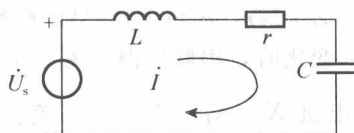


图 2-1 LC 串联谐振回路

1. 回路阻抗与谐振频率

我们知道, 串联谐振回路中 L 、 C 的电抗 ωL , $1/\omega C$ 是信号源角频率 ω 的函数, 所以回路总阻抗 Z 也是角频率 ω 的函数。

$$Z = r + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = |Z| e^{j\varphi} \quad (2-2)$$

式中, $|Z|$ —— 阻抗 Z 的幅模;

φ —— 其辐角。

$$|Z| = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (2-3)$$

$$\varphi_z = \arctan \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} \quad (2-4)$$

令 $X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ 为回路的总电抗, X 也是 ω 的函数。 X_L , X_C 与 X 随 ω 的变化曲线如图 2-2 所示。

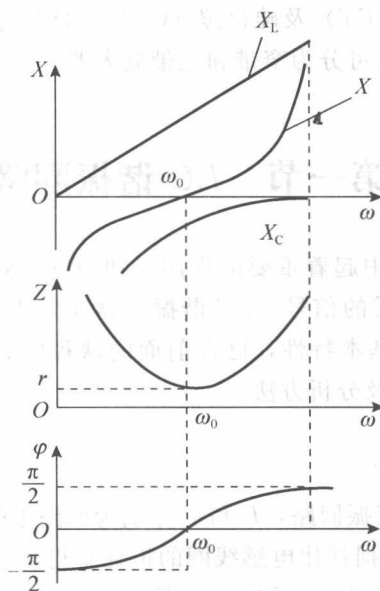


图 2-2 X_C , X_L 及 Z 的频率特性

从图 2-2 可见, 串联谐振回路的阻抗具有如下特性。

- (1) 当 $\omega < \omega_0$ 时, $X < 0$, $|Z| > r$, $\varphi < 0$ 回路呈容性。
- (2) 当 $\omega = \omega_0$ 时, $X = 0$, $|Z| = r$, $\varphi = 0$ 回路呈纯阻性。
- (3) 当 $\omega > \omega_0$ 时, $X > 0$, $|Z| > r$, $\varphi > 0$ 回路呈电感性。

当外加激励信号的角频率 ω 变化时, 串联回路各参量也相应变化。当 $\omega < \omega_0$ 时, 回路中容抗 $\frac{1}{\omega C}$ 大于感抗, 回路的总电抗 $X = X_L - X_C < 0$; 随着 ω 的增加, 回路的容抗 $\frac{1}{\omega C}$ 减小, 感抗 ωL 增加; 当 ω 增加到使 $X = X_L - X_C = 0$ 时, 回路中的感抗等于容抗, 但二者的作用相互抵消, 使得回路呈纯阻性, 即 $Z = r$, 相角 $\varphi = 0$, 回路电流达到最大值。这时称

串联回路发生了串联谐振, 对应的谐振角频率用符号 ω_0 表示。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2-5)$$

$$\text{或} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-6)$$

ω_0 是回路固有谐振角频率。串联回路的谐振角频率 ω_0 取决于回路本身的参数, 与外加激励信号的参数无关。只有当外加信号的角频率 $\omega = \omega_0$ 时, 回路才发生串联谐振。串联谐振时 $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$, 常称为串联回路的特征阻抗, 用 ρ 表示。

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2-7)$$

2. 回路的品质因数

品质因数是谐振回路的一个重要性能指标。它的物理意义是回路的储能与耗能之比, 也可表示为回路特征阻抗与回路固有损耗之比。在串联谐振电路中, 电感或电容是储能元件, 电阻是耗能元件, 因此回路的固有(空载)品质因数用 Q_0 值表示, 定义为

$$Q_0 = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{r\omega_0 C} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\rho}{r} \quad (2-8)$$

显然, r 越大回路损耗的功率越多, 回路的品质因数就越小; 反之, r 越小, Q 值就越大。

3. 串联回路的选频特性

为了分析串联回路的选频特性, 将图 2-3 中的激励信号 u_s 和电流 i 用相量符号表示。

即用 $\dot{U}_s$ 表示 u_s , 用 $\dot{I}$ 表示 i , 则 $\dot{U}_s$ 与 $\dot{I}$ 之间应满足

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_s}{Z} = \frac{\dot{U}_s}{r + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} = \frac{\frac{\dot{U}_s}{r}}{1 + j \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r}} = \frac{\dot{I}_m}{1 + j\xi} \quad (2-9)$$

式中, $\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_s}{r}$ ——回路的最大电流;

$$\xi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} \approx Q_0 \cdot \frac{2\Delta f}{f_0} \text{——广义失谐。回路电流的幅模和幅角分别为}$$

$$I(\omega) = \frac{I_m}{\sqrt{1 + \xi^2}} \quad (\text{幅频特性}) \quad (2-10)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \xi \quad (\text{相频特性}) \quad (2-11)$$

由式 $I(\omega) = \frac{I_m}{\sqrt{1 + \xi^2}}$ (幅频特性), 令 $\alpha = \frac{I(\omega)}{I_m} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}}$, 其中 $I_m = \frac{U_{sm}}{r}$ 。为了分析

方便, 要求出 ξ 与 Q_0 值之间的关系, 在窄带选频电路中

$$\xi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} = \frac{\omega_0 L}{r} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = Q_0 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \approx Q_0 \frac{2\Delta f}{f_0} \quad (2-12)$$

于是有

$$\alpha = \frac{I(\omega)}{I_m} = \frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+Q_0^2\left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)^2}} \quad (2-13)$$

当串联回路参数 (R, L, C) 和激励源电压幅度 U_m 及角频率 ω 确定后, 由式 $I(\omega) = \frac{I_m}{\sqrt{1+\xi^2}}$ (幅频特性) 和式 $\varphi(\omega) = -\arctan \xi$ (相频特性) 可确定电流的大小和相位。用电压源激励串联谐振回路时, 响应电流的幅度是激励信号角频率的函数。当激励信号的角频率 ω 偏离回路谐振频率 ω_0 时称为失谐。 ω 离 ω_0 越远失谐越严重, 电流减小越明显。

根据式 (2-13) 可以绘出以 f 为自变量、 α 为因变量、 Q 为参变量的串联谐振幅频特性曲线如图 2-4 所示, 相频特性如图 2-4 所示。从图 2-3(a) 可见, 串联谐振电路中, 回路 Q 值的大小对谐振特性曲线的形状影响较大。 Q 值越高, 谐振曲线越尖锐, 其选频特性越好, 即选择性越好, 抑制干扰的能力越强。

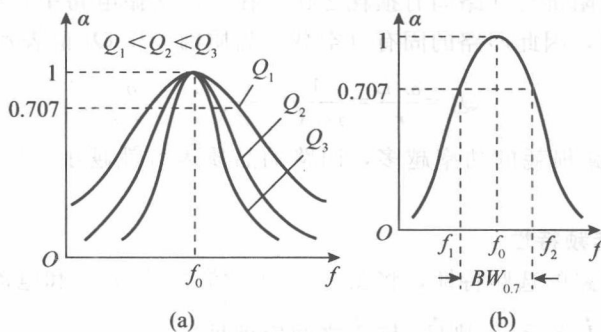


图 2-3 LC 串联回路的幅频特性

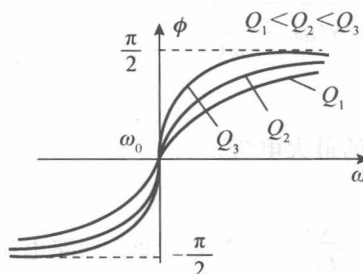


图 2-4 LC 串联回路的相频特性

由于损耗电阻 r 很小, 在计算串联谐振的回路谐振时电感线圈和电容器两端的电压 $\dot{U}_{L0}$ 和 $\dot{U}_{C0}$ 时, 可以忽略 r 的影响, 于是有

$$\dot{U}_{L0} = \dot{I}_m \cdot j\omega_0 L = j \frac{\omega_0 L}{r} \cdot \dot{U}_s = jQ_0 \dot{U}_s \quad (2-14)$$

$$\dot{U}_{C0} = \dot{I}_m \cdot \frac{1}{j\omega_0 C} = \frac{1}{j\omega_0 Cr} \cdot \dot{U}_s = -jQ_0 \dot{U}_s \quad (2-15)$$

可见, 串联谐振时, 电感线圈和电容器两端电压幅值的大小等于外加电压幅值的 Q_0