

**MODERN COMMUNICATION
CIRCUITS**

〔美〕杰克·史密斯 著

叶德福 景虹 夏大平 张厥盛 译

李纪澄 审校

现代通信电路

西北电讯工程学院出版社

Modern Communication Circuits

Jack Smith

McGraw-Hill Book Company

1986

内 容 简 介

本书根据1986年美国 McGraw-Hill 图书公司出版,由杰克·史密斯著的《现代通信电路》一书译出。该书为美国大学高年级和研究生低年级电气工程课程教材。作者根据现代通信电路的发展,将有关基本电路理论、各种类型的电子线路以及现代通信系统中的主要部件——锁相频率合成器综合在一起,组成了电子线路课程内容的新体系。它的特点是体系新,内容新,涉及面广,叙述很精练,重视理论联系实际。读者可以从本书得到有关通信电路的理论和实际知识,并掌握简便而有效的有关通信电路的分析设计方法。全书共十二章,还有十三个附录。附录介绍了现代通信电路中最新、最常用的典型器件和专用集成电路,提供了丰富的实际资料。

本书可作为高等学校通信与电子系统有关各专业的本科生、大专生的教材和教学参考书。也可作为有关教师和工程技术人员的参考书。

现 代 通 信 电 路

[美] 杰克·史密斯 著

叶德福 景虹 夏大平 张厥盛 译

李纪澄 审校

西北电讯工程学院出版社出版发行

西北电讯工程学院印刷厂印刷

新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 25 字数 607 千字

1987年12月第1版 1987年12月第1次印刷 印数1—2000

ISBN 7-5606-0042-5/TN·0014

统一书号: 15322·106

定价: 4.15 元

译者的话

本书是根据1986年美国佛罗里达大学杰克·史密斯(Jack Smith)教授著“Modern Communication Circuits”一书译出。该书为美国大学生和研究生的电气工程课程教材。本书体系新、内容新、涉及面广、叙述精练、重视理论联系实际,有丰富的实际资料。读者可以从本书得到有关现代通信电路的基础理论知识和实际知识,并掌握简便而有效的有关通信电路的分析设计方法。

本书作为电子线路教材,突破了传统教材的格局。作者根据其教学经验和工程实践经验以及现代通信电路的发展,汲取了传统内容的精华,使之与发展中的新体制、新概念、新器件、新电路相结合,特别是引进了通信电路的关键部件——集成锁相环与频率合成器,从而形成了电子线路课程内容的新体系。全书强调基础、实践和发展中的新技术,颇具特色。在电子线路课程内容的改革和更新方面别树一帜,很值得我们借鉴。我们译出本书的目的之一就是希望它能对我们的电子线路课程内容改革有所促进。为了充分地向读者推荐本书,下面想就本书的特色多讲几句。

一、教材体系新 电子线路是一门传统的课程。一些基本内容,如串、并联谐振电路、变压器、放大器、振荡器等至今依然都有用。随着电子科学技术的飞速发展,新体制、新概念、新器件、新电路又不断涌现,这些新内容又必须充实到教材中去。此外,还要体现本课程工程和实践性都强的特点。若恪守传统的体系,必然使得电子线路教材的内容十分庞杂,学生学来很困难,目前的实际情况就是如此。如何在保留基本电路理论和电子线路精粹的前提下,充分讲述现代电路的新进展,而又兼顾理论联系实际,这是通信与电子系统各专业的电子线路课程改革的中心问题。本书作了这种尝试,把这几方面结合起来,构成了电子线路课程教材的新体系。做好这一工作的第一步是要精选和处理好传统的电路理论和电子线路内容,作者在这方面做了很好的工作。

在电路理论方面,只要是至今仍然有用的各种基本电路,例如简单的串、并谐振电路、阻抗匹配网络、一般变压器、三绕组变压器等内容都实事求是地保留下来了,但是对这些内容的讲述又是十分简明和恰如其分的。对较新的最适用于实现不调谐宽带放大器级间匹配和输出匹配的传输线变压器就讲得多一点。在分析方法方面采用了基于拉普拉斯变换的复频域分析法,这便于分析系统的响应,也与现在学生学习的电路基础理论相一致,是处理得较好的。

在电子线路方面,本书综述了各种基本电子线路(晶体管放大器、场效应管放大器、差动放大器、运算放大器等各种小信号放大器)的基础知识,建立了各种电路模型,简明地概括了它们的增益、输入阻抗、输出阻抗和频率特性等几个基本问题。对于组成通信系统的各种部件(振荡器、功率放大器、混频器、调制器和解调器)的介绍既有足够的广度而又繁简适度。例如各种混频、调制、解调电路在频率变换方面有共性以及有的电路类似而归并为一章,其中关于高电平调幅只讲了几段话。在振荡器这一章中,对于振荡器的分析采用了线性反馈分析法、电路分析法和负电阻分析法等三种方法。除了介绍基本的振荡器电路外,对于目前频率合成器中用到的晶体振荡器和外接晶体的集成电路振荡器介绍得较充分、较深入。

二、内容新 这是本书在取材方面的另一个特点。正如本书1986年在美国出版时的内容简介中所指出:《现代通信电路》把经典的设计技术和诸如低噪声放大器设计、频率合成、

相位噪声、自动增益控制、数字锁相环路、振荡器和数字电路应用等题目的最新理论结合起来了。

在现代通信系统中,绝大部分通信电路组件都是集成电路的,电路集成化是一个重要发展趋势。与同类教材相比,本书在介绍各种集成电路方面是较充分的。在讲述各部分电路时,都相应地介绍了适用的集成电路。近年来,集成锁相环作为一种价廉的多功能部件,在频率合成器、信号检测、频率调制与解调等方面都获得了广泛的应用,成为现代通信系统中不可缺少的重要部件。本书的第八、九、十章专门阐述锁相环原理、分析及其应用。在这方面的最新技术进展,诸如小数分频频率合成器、直接数字频率合成器、全数字锁相环等以及几个常用的典型集成锁相环,书中都作了适当的反映。书中介绍了D、E、S类高效高频功率放大器、脉冲鉴频器以及有关数字调制方法。对于现代通信工程中用于评价通信机性能的信纳比(SINAD)、“动态范围”等概念也作了介绍。

从以上这些方面来看,本书讲述的通信电路确有“现代”的特色,定名为《现代通信电路》是贴切的。

三、重视实践 电子线路是一门工程性、实践性很强的课程,课程内容应与当前生产实践相结合,注意反映当前器件和电路的制造技术水平,本书在这方面做了很好的工作。全书有13个附录,详细地介绍了一些厂家生产的最新、最常用的器件和专用集成电路。专用集成电路有外接晶体控制的集成电路振荡器、COS/MOS微功率锁相环、数字锁相环滤波器。通过介绍可使学生了解这些器件和集成电路的特点、特性、技术规范、电路组成、应用场合以及调整、测试、使用中应注意的问题。在教材中引进丰富实际资料的这种做法还不多见,这对促进学生重视理论联系实际、开拓视野、获得一些实际知识无疑是十分有益的。书中对电路中的接口问题,如影响电路运行情况的输入阻抗、输出阻抗、负载变化等都给予了介绍。在书中许多地方,很注意给出一些器件参数、物理量、数据的数量级,这样做对学生是有意义的。总之,重视实践是本书又一个突出的特点。

书中每章末都附有习题,这些习题突出了本课程的重点,可以检验学生对书中提出的基本概念掌握的程度。所有习题都选用实际参数或附录中器件的技术规范,可以使学生获得分析和设计电子线路的初步经验。有些习题扩展了该章所研究的内容。这些对培养学生的独立工作能力是有益的。

本书不足之处是尚有一些差错疏漏,有的公式推导值得研究。有的内容叙述过于简练,进度过快,有些难点未予剖析,这在教学实施中可能会出现一些困难。附录中引用的实际材料尽管内容很好,但没有作一番去粗存精的加工和编排,显得不够精练。

本书翻译工作由叶德福(第1、7、12章,附录12、13)、景虹(第2、3、4章)、夏大平(第5、6、11章)、张厥盛(第8、9、10章,附录7、11)、李纪澄(前言、附录1~6、8~10)承担,叶德福统编全稿,李纪澄负责全书的审校工作。西北电讯工程学院出版社聘请的社外责任编辑郭建屏同志对译文的校勘做了大量工作,提出不少宝贵意见。对此,译者深表谢意。译校者对原书中出现的差错、疏漏,特别是技术内容方面的错漏,尽力作了校订。但限于水平,译文中仍会有错漏,恳请读者批评指正。

译校者

于西北电讯工程学院

1987.9.

前 言

本书介绍现代通信电路的基础分析和设计技术。书中讨论的通信电路频率覆盖范围高达约 100MHz。这个覆盖范围便于使用集成电路,便于采用宽带电路简化调谐操作,并有利于在高频电路中更多地采用场效应管,这反映了现代通信系统设计的实际情况。这里提供的材料有很多是首次以书籍的形式出现,其中有的是初次发表,更多的是从众多的通信电子学文献中搜集来的,还有一些是从早期的真空管电子学出版物中选编的。本书着重于实际近似分析方法,而不是强调建立在复杂电路模型基础上的理论推导。实际近似分析方法比冗长的推导更能深入地反映设计过程,而其精确性又常常可用计算机模拟来实现。

本书可作为大学高年级和研究生低年级电气工程课程的教科书,也可供从事实际工作的工程技术人员作参考书。本书设想读者已具备了低年级电气工程课程中线性晶体管电路的理论基础,但不要求有高频电子学专业课程方面的知识(诸如调谐电路分析等知识)。本书第二章综述了必要的电子线路基础知识。

几乎一切实际通信电路的特点是:对它们作精确分析十分复杂,因而必须采用近似。在设计过程中也要审慎地采用近似方法。本书的目的就是要阐明对通信电路的分析和设计方便而有效的许多近似方法。电路模型往往是不完备的,较精确而复杂的模型最好用计算机辅助分析方法来处理,这些方法是大多数电气工程专业的学生和电气工程人员能够采用的。在本书的实例中常运用计算机辅助分析方法。

即使不是全部通信电路,至少也是大部分通信电路都能由集成电路做成。但是,设计人员仍然必须熟悉分立电路技术,这有以下几方面的原因:首先,现在还有许多通信系统不能用集成电路来实现,这是因为集成后会降低电路的灵活性,而且电感电容调谐电路也还不能制作在集成电路块上。第二,在有些情况下,分立通信电路的性能有它的优越性。通信电路设计人员必须在体积、生产成本、输出功率、功率消耗、噪声和失真之间权衡利弊。第三,即使采用集成电路,也仍然需要对通信电路原理有基本的理解。此外,单块功率放大器会增添许多附带的问题,这些问题导致整套集成电路放大器比分立功率放大器需要占据更大的空间,当然,本书也考虑了集成电路对通信系统设计的影响。有两章专门讲锁相环。这种器件在现代通信系统中的重要性主要由于它能以集成电路的形式实现。最新的数字锁相环在第八章中讨论。

在一本教科书中要完全概括象通信电子学这样广阔的学科是不可能的。书中提出的许多方法适用于所有频率范围的通信系统。但对 100 MHz 以上的频率,用分布参数电路分析更为精确,不过本书没有讲述分布参数电路分析技术。数字电路在通信系统中起着日益重要的作用。本书介绍了数字电路的许多应用,但没有涉及常用的逻辑电路,因为这方面的内容在许多教科书中都有详尽的阐述。

第一章为通信电路引言,并讨论了接收机设计的新趋势。第二章综述了双极晶体管和场效应管放大器的线性小信号分析。本章还包括运算放大器,因为现在已有增益带宽积足够大的这种器件可用于高频通信电路中。第三章规定了描述通信系统的噪声指标和失真指标,低噪声放大器设计基础也包括在这一章里。在现代通信系统中仍然非常重要的简单并联和串联

调谐电路在第四章中讨论。第五章讲述晶体管放大器高频性能的分析方法，并附有几种类型的自动增益控制系统。在现代通信系统中非常有用的变压器在第六章中讨论。传输线变压器仍是最适合于用来实现不调谐宽带放大器级间匹配和输出匹配的集总阻抗匹配网络。第七章深入讨论了高性能晶体管振荡器电路(包括晶体振荡器和压控振荡器)的分析和设计。锁相环是通信系统中功能最多和使用最广泛的电路之一，因为便于做成廉价的集成电路锁相环，所以它将继续实际上在所有的通信系统中获得应用。第八章专门讲述锁相环的应用。第九章讲述锁相环的分析。集成电路的使用也促成了频率合成器的设计，而频率合成器又改变了采用频率调谐的大多数新通信系统的设计。频率合成器实际上也促成了如跳频等现代通信技术的实现。第十章详细论述了频率合成器。第十一章讨论了功率放大器的分析和设计，还包括了对设计C类放大器有用的几个曲线图。频率搬移、调制、解调的方法，包括频移键控、相移键控以及处理数字信号的其它方法均在第十二章中讨论。

如果从当前的文献中再补充一些新内容，本书包括的材料足够两学期的课程使用。第一章、第三章至第七章、第十章或第十二章已在佛罗里达大学作为一学期课程使用过。每章都附有突出各章重点的习题。有几章的习题扩展了所研究的材料。在有些习题中用到附录中的部件和汇集的技术规范。

本书经过与我的朋友 Ulrich Rohde 博士多次讨论后写成。反映当前工艺水平的有关接收机和频率合成器设计的电路资料是在我们合作期间取得的。他提供的资料和提出的意见对写成本书帮助极大。我的学生们的建议、校正和电路设计也明显地提高了本书的质量。

杰克·史密斯

目 录

前言

第一章 无线电通信系统绪论

1.1 引言	1
1.2 网络理论	1
1.3 调制	2
1.4 接收机	3
现代通信接收机	6
集成电路调频接收机	6
1.5 发射机	7
习题	7
辅助阅读材料	8

第二章 小信号放大器

2.1 引言	9
2.2 双极晶体管放大器	9
等效电路	9
共发射放大器	10
共基放大器	11
射极跟随器	14
2.3 场效应管放大器	16
等效电路	16
共源放大器	17
源极跟随器	18
共栅放大器	20
2.4 多级放大器	21
2.5 双栅场效应管	22
2.6 推挽放大器	23
2.7 差动放大器	24
共模抑制比	25
FET差动放大器	26
BJT差动放大器	29
2.8 运算放大器	30
运算放大器的特性	30
理想反相放大器	30
非理想反相放大器: 有限环路增益的影响	31
增益带宽积	32
输入阻抗为有限值的影响	33
输入阻抗和输出阻抗都是有	

限值的影响	33
-------	----

同相放大器	34
-------	----

习题	35
----	----

参考文献	39
------	----

第三章 网络噪声和互调失真

3.1 引言	40
3.2 噪声	40
热噪声	41
过量电阻噪声	43
有源器件噪声	44
晶体管放大器中的噪声 ^[3, 11]	45
3.3 噪声系数、噪声因数和灵敏度	46
平均噪声因数	43
噪声系数	48
级联网络的噪声因数	48
噪声温度	49
灵敏度	50
3.4 低噪声网络设计	52
网络噪声的表示法	52
BJT放大器的等效噪声表示法	52
网络噪声因数	53
低噪声设计	55
低噪声放大器	56
BJT偏置电流的最佳化	57
3.5 互调失真	58
增益压缩	58
二阶谐波失真	59
互调失真比	59
动态范围	60
信纳比(SINAD)	61
习题	62
参考文献	63
辅助阅读材料	63

第四章 选频网络和变压器

4.1 引言	64
4.2 串联谐振电路	64
信号源电阻的影响	68
电压应用	69

4.3 并联谐振电路	69	6.3 不对称三绕组变压器	130
支路电流	72	混合变压器中的功率传输	133
4.4 含有变压器的并联谐振电路	72	混合变压器中的相位关系	134
次级调谐变压器	75	非理想三绕组变压器 ^[6.1]	135
双调谐电路	77	6.4 传输线变压器	136
自耦变压器	78	阻抗提升变压器	140
电容性变压器	79	混合变压器	141
4.5 用电抗网络进行阻抗匹配		功率输出级	141
和谐波滤波	81	习题	142
4.6 滤波器延迟和信号失真	84	参考文献	144
习题	86	辅助阅读材料	144
参考文献	89	第七章 振荡器	
辅助阅读材料	89	7.1 引言	145
第五章 高频放大器和自动增益控制		7.2 振荡条件	145
5.1 引言	90	奈奎斯特稳定判据	145
5.2 双极晶体管和场效应管放大器的		电路分析	149
高频特性	90	振荡器电路的另一种解释方法	152
BJT 高频模型	90	皮尔斯振荡器	155
电流增益带宽积	91	7.3 振幅稳定	156
FET 高频模型	92	7.4 相位稳定	157
密勒(Miller)定理	93	7.5 晶体振荡器的特性	158
FET 放大器的高频响应	93	并联型晶体振荡器	161
BJT 放大器的高频响应	97	串联型晶体振荡器	164
相同级的级联	104	7.6 压控振荡器和压控晶体振荡器	168
5.3 频带展宽技术	105	7.7 场效应管(FET)振荡器	170
输入补偿	106	FET 皮尔斯振荡器	171
反馈	107	7.8 延迟线控制振荡器	172
电流-电压反馈	108	7.9 集成电路振荡器	173
电压-电流反馈	110	习题	173
无耗反馈放大器 ^[5.2]	112	参考文献	177
中和	115	辅助阅读材料	177
共发-共基放大器(共源-共栅		第八章 锁相环路	
放大器)	116	8.1 引言	179
5.4 自动增益控制	117	8.2 锁相环的线性模型	180
自动增益控制理论	118	8.3 相位检波器(PD)	183
另一 AGC 模型	120	数字相位检波器	183
AGC 系统部件	122	异或逻辑相位检波器	183
习题	123	触发器相位检波器	184
参考文献	125	双D 触发器	185
辅助阅读材料	125	相位-频率检波器	186
第六章 混合变压器和传输线变压器		混频器	188
6.1 引言	127	取样检波器	188
6.2 三绕组变压器	127	相位检波器的比较	192

8.4 压控振荡器(VCO)	192
8.5 环路滤波器	193
8.6 锁相环路应用	194
跟踪滤波器	194
角度调制	194
频率解调	195
振幅解调	195
相移器	196
信号同步器	196
8.7 数字锁相环	197
习题	199
参考文献	200
辅助阅读材料	200

第九章 锁相环路分析

9.1 引言	201
9.2 稳态误差分析	201
9.3 稳定性分析	202
I 型系统	204
极点-零点滤波器	206
环路带宽的控制	207
II 型系统	208
II 型三阶系统	214
有时间延迟的环路	217
有取样保持相位检波器的环路	218
9.4 瞬态响应	220
线性化 PLL 的瞬态响应	220
I 型系统: 相位阶跃响应	221
I 型系统: 频率阶跃响应	222
II 型环	223
斜升输入	224
I 型和 II 型环路比较	225
大信号性能	227
数字相位检波器	227
一阶系统	227
有低通滤波器的 I 型环	229
正弦相位检波器 ^[9.2]	232
举例	234
习题	234
参考文献	236
辅助阅读材料	236

第十章 频率合成器

10.1 引言	237
---------------	-----

10.2 直接频率合成	237
10.3 锁相频率合成	239
参考频率对环路性能的影响	240
变模分频器	241
下变频	243
减少转换时间的方法	243
10.4 直接数字合成 ^[10.5]	247
10.5 合成器设计举例	249
10.6 相位噪声	252
振荡器相位噪声模型	252
锁相环路的相位噪声	255
分频和倍频对相位噪声的影响	256
习题	257
参考文献	259
书刊要目	259

第十一章 功率放大器

11.1 引言	262
11.2 A 类放大器	262
变压器耦合 A 类放大器	265
A 类推挽放大器	266
方波输入	268
11.3 B 类放大器	268
互补晶体管推挽放大器	271
直接耦合 B 类推挽放大器中的功率关系	271
11.4 C 类放大器	272
C 类功率放大器的设计	274
倍频	277
11.5 D 类放大器	277
非理想特性	279
11.6 S 类功率放大器	279
脉冲宽度调制器	280
11.7 E 类调谐功率放大器 ^[11.5]	281
习题	281
参考文献	282
辅助阅读材料	283

第十二章 调制器与解调器

12.1 引言	284
12.2 混频器	284
混频器	285
变频损耗	289

失真	290
二极管环形混频器的	
互调失真 ^[12.1]	290
平方律混频器	292
BJT混频器	292
FET混频器	294
12.3 振幅和相位的调制与解调	296
振幅调制	296
振幅调制器: 标准 AM	297
解调器	300
平均包络检波器	300
同步检波	301
角度调制	302
角度调制器	302
FM解调器	303
FM检波器	303
脉冲鉴频器	304
12.4 数字调制	305
模拟数据的数字调制与解调	308
振幅调制	308
频率调制	308
相位调制	308

12.5 集成电路技术 ^[12.8]	309
习题	311
参考文献	312
辅助阅读材料	312
关于混频器的参考资料	313

附录

附录 1 SILICONIX 1260 T [*]	314
附录 2 U 310-SILICONIX	317
附录 3 2N 5394 噪声特性	318
附录 4 HARRIS 5190 [*]	320
附录 5 BURR-BROWN 3554 [*]	328
附录 6 MOTOROLA 390 [*]	338
附录 7 RCA CD 4046 [*]	341
附录 8 CM860 TELEDYNE [*]	354
附录 9 CP 640 TELEDYNE CRYSTALLONICS [*]	356
附录 10 LM 194 NATIONAL SEMICONDUCTOR [*]	362
附录 11 TI [*] 数字锁相环滤波器	365
附录 12 变容二极管 [*]	370
附录 13 IC 振荡器(外接晶体) [*]	375

第一章 无线电通信系统绪论

1.1 引言

通信系统利用电能将信息从一处传输到另一处。信息传输使用的频率从用于直接电话通信的甚低频一直到也是电话通信用的光频。本书介绍用于高频通信系统、频率覆盖范围高达约100MHz的电子电路的分析和设计。这些材料也适用于许多其它系统,包括电视和频谱分析仪,在这些设备中设计低噪声的高频接收机是头等重要的。工作频率高于100MHz时,另外的电路模型,特别是分布参数电路模型更为精确。本书也涉及低频电路,但着重讨论高频电路。

下面几章论述通信接收机和发射机基本电路的分析和设计。集成电路简化了系统的设计,但通信系统设计人员仍需熟悉在此频率范围适用的各种电路技术和简化近似法。设计人员常常面临采用集成电路(IC)还是分立元件方案的选择。抉择依据的因素很多,包括生产成本、体积大小、功率消耗、噪声和失真等。第三章讲述估算电路噪声和失真性能的定量标准。将集成电路应用在通信系统中时,为了把集成电路与系统的其余部分在接口处正确地连接,需要电子线路方面的理论知识。本书将研究组成通信系统的各种部件(包括振荡器、放大器、变压器、调制器和解调器)的电子线路。书中没有讨论各种调制方法的数学分析,因为这在许多有关通信理论的教科书中已有了详尽的介绍。

1.2 网络理论

本节简述下面几章要用到的网络理论概念。电子线路中的常用变量是在电路各点上测得的电压和电流。激励和响应可以在时域描述,在时域确定响应时要求解微积分方程,而这无助于对设计过程的深入理解。对线性时不变系统来说,应用拉普拉斯变换通常更易于获得系统响应。时间变量 $v(t)$ 的拉普拉斯变换是

$$V(s) = \int_0^{\infty} v(t)e^{-st} dt \quad (1.1)$$

式中 s 的量纲是频率,称为复频率变量。线性系统传输函数 $H(s)$ 定义为

$$H(s) = \frac{R(s)}{V(s)} \quad (1.2)$$

式中 $R(s)$ 是对激励 $V(s)$ 响应的拉普拉斯变换。把电感器看作具有复阻抗 sL ,电容器看作具有复阻抗 $(sC)^{-1}$,就很容易求得线性电路的传输函数。这种方法可用下面的例题说明。

例 1.1 求图 1.1 所示电路的传输函数 $V_o(s)/V_i(s)$ 。

解 在此电路中电感器具有复阻抗 sL ,电容器具有复阻抗 $(sC)^{-1}$ 。利用电路分析的分压定则,可求出传输函数 $H(s)$ 为

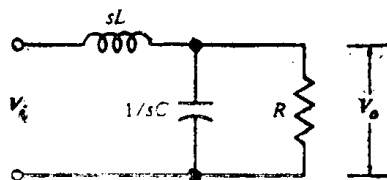


图 1.1 低通滤波器

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R/(RsC + 1)}{R/(RsC + 1) + sL} = \frac{R}{s^2 RLC + sL + R} \quad (1.3)$$

当没有可能造成混淆时, 为简明起见, 常把激励和响应写作 V_i 和 V_o 。

用线性传输函数 $H(s)$ 来描述系统响应的另一优点是: 在 $H(s)$ 式中, 令 $s = j\omega$, 即可得出网络的频率响应。这就是说, 如果系统是稳定的, 激励是一个正弦波, 那末稳态响应(在暂态值已衰变到可忽略不计时)也将是同频率的正弦波。如果

$$v_i(t) = V \sin \omega t$$

则稳态响应为

$$r(t) = R \sin(\omega t + \phi)$$

式中

$$|H(j\omega)| = \frac{V}{R} \text{ 和 } \arg H(j\omega) = \phi$$

例 1.2 求图 1.1 所示网络在 $L = 0.5 \text{ H}$ 、 $C = 2 \text{ F}$ 、 $R = 1 \Omega$ 时的频率响应。

解 在传输函数中代入 $s = j\omega$ 就可获得频率响应, 在此情况下, 式(1.3)可写为

$$H(j\omega) = [(j\omega)^2 + 0.5j\omega + 1]^{-1}$$

响应的幅值是频率的函数

$$|H(j\omega)| = \left\{ \left[(1 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{-1}$$

相移也与频率有关

$$\arg H(j\omega) = -\tan^{-1} \frac{0.5\omega}{1 - \omega^2}$$

不含理想延迟元件的线性传输函数具有如下形式:

$$H(s) = \frac{A(s)}{B(s)} \quad (1.4)$$

式中 $A(s)$ 和 $B(s)$ 是 s 的多项式。 $A(s)$ 的零点称为**传输函数的零点**, 而 $B(s)$ 的零点称为**传输函数的极点**。极点是使传输函数的数值为无穷大时 s 的值。为了使传输函数稳定, 全部极点都必须分布在 s 平面的左半部(即极点的实数部分必须是负值)。稳定性问题将在第九章中详细研究。

例 1.3 计算例 1.2 中给出的传输函数

$$H(s) = (s^2 + 0.5s + 1)^{-1}$$

的极点和零点。

解 该传输函数无有限值的零点。因为分母多项式的阶比分子高两阶, 所以在无穷远处传输函数有两个零点。极点

$$s_1, s_2 = -0.25 \pm j \frac{(3.75)^{1/2}}{2}$$

位于左半平面。每个极点的实数部分为 -0.25 , 虚数部分为 $\pm j(3.75)^{1/2}/2$ 。

1.3 调制

为了使信号载有信息, 信号的某一特征必须随所传送的信息而变化。早期的无线电通信是通过控制信号的有、无来传送信息的。后来用话音信号对无线电波进行振幅调制的方法很快就表现出更优越的性能。振幅调制提供了传送话音的通信手段, 它的发展导致无线电广播

工业的迅速建立。

角度调制是广泛用于高频通信系统的另一种传送信息的方法。角度调制信号可用下列方程描述：

$$S(t) = A \sin(\omega_0 t + \phi)$$

它的振幅保持不变，而角度 ϕ 随调制信号而变化。实现角度调制可以采用相位调制或频率调制。接收机的功能之一是由已调制信号恢复(解调)出原调制信号。第十二章将更详细地介绍各种类型的调制和解调电路。现今数字调制技术使用得更为经常，特别是用于卫星通信系统和电话通信系统。数字调制指信号的一个参数随数字信号变化。变化的参数可以是信号的振幅、频率或相位。也就是说，数字调制是一种或多种常用的振幅调制或角度调制方法的扩展。

图 1.2 说明数字式单路单载波(SCPC)卫星通信信道的简化方框图。每个话路被取样后，变换为数字编码信号，此信号对低载频进行调制。已调信号利用有充分频率间隔(Δf)的不同载频，使这些信号能够组合起来而彼此没有频率交叠。此过程称为**频率复用**。把这个频率复用信号再与本机振荡器的信号混频后把频率提高，然后加以放大并发射出去。发送信道中包括许多话路。此例只是同时发送几个数据信道的许多可能方案之一。由接收到的信号恢复出原话路信号是接收机的功能。

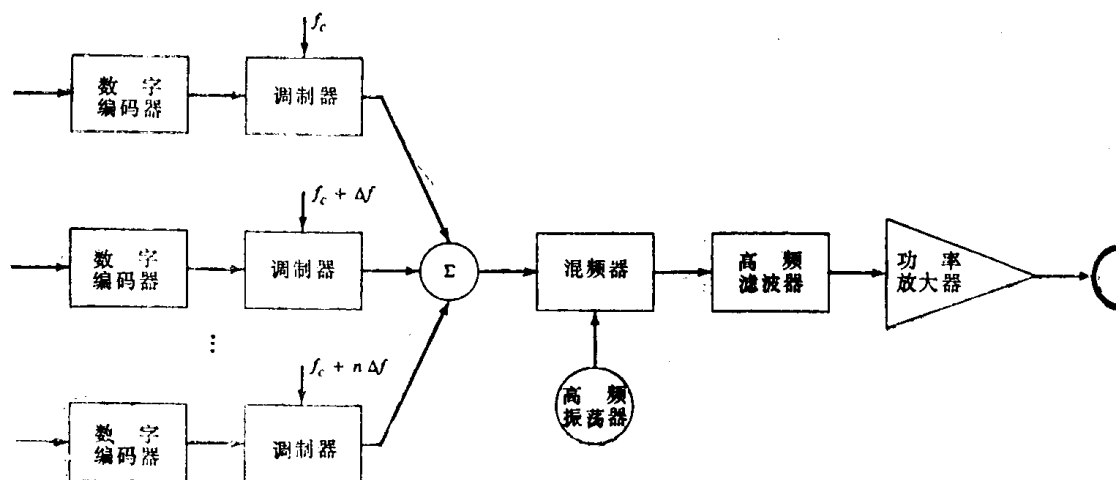


图 1.2 卫星通信信道

1.4 接收机

已调信号传输到接收机，在接收机里把信号放大并提取出信息。通常总有许多不同的信号同时存在于接收机的输入端，因此接收机必须能够选择出所需要的信号。选择按入射信号的频率进行，区别不同频率信号的能力称为**接收机的选择性**。接收机的另一个功能是对信号中包含的信息进行检测(解调)，或者还要再现并放大原始信号。接收机有各种类型，从简单的电话接收器、无线电、电视、雷达、导航直到卫星通信接收机。每一类型接收机的复杂程度随发射信号的复杂程度、工作频率和在相同频带中无用信号的数目及振幅而不同。而选择性、抑制输入噪声和对有用信号检波等则是所有接收机共同的问题。

“无线电”这一名称起源于大约 1919 年，为的是要把接收语音的接收机与早期仅仅接收电码(脉冲)的接收机区别开来。最早的接收机没有放大信号的能力，但此缺陷由于真空管

(三极管)的发明很快就克服了。首批真空管电路并未提供高的增益,但不久 E.H. 阿姆斯特朗发明了“再生式接收机”,这种接收机采用了从输出端到输入端的正反馈来提高增益。再生式接收机的简图示于图 1.3。电路中的真空管同时用作放大器和检波器。重现(检测)调制信号的解调器称为**检波器**。反馈的交流输出信号与输入信号同相(再生),从而增加了环路增益。再生接收机大概是电子反馈的最初应用,因为这种电路易于振荡,它迅速导致电子振荡器的发明,电子振荡器极大地改进了发射机的设计。

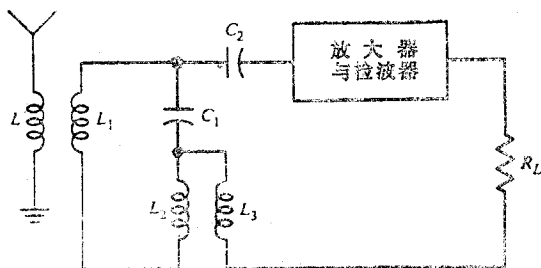


图 1.3 早期再生式接收机的原理图

再生式接收机不久即为调谐高放式(TRF)接收机所取代。典型的调谐高放式接收机方框图示于图 1.4,它由三个级联的射频调谐放大器以及后随的检波器和功率放大器组成。操作这种接收机的困难在于难以将全部射频放大器都调谐到同一频率上。由于 E.H. 阿姆斯特朗



图 1.4 早期射频调谐接收机的方框图

朗发明了超外差接收机,高放式接收机就被淘汰了。“超外差”把输入信号频率搬移成为接收机中滤波器的固定输入频率,从而不需要把所有射频放大级都调谐到输入信号频率上。这就有可能装置性能比可变频率滤波器优越得多的固定频率放大器和滤波器。实际上所有接收机现在仍采用超外差(Superheterodyne)原理。此原理是将输入信号与本机振荡器产生的信号相乘或差拍。[heterodyne(外差)源于希腊语 heteros(另外的)和 dynamis(强制)。]若角频率为 ω_c 的正弦波乘以角频率为 ω_L 的正弦波,则合成信号由频率为 $\omega_c \pm \omega_L$ 的两个正弦波组成,即

$$\sin \omega_c t \sin \omega_L t = \frac{\cos(\omega_c - \omega_L)t - \cos(\omega_c + \omega_L)t}{2}$$

超外差接收机的简化方框图示于图 1.5。在这种类型接收机中,输入信号由第一本机振荡器变换为中频,然后由第二混频器和低通滤波器降低为低频信号。若输入信号由载波 f_c 和音频成分 f_a 组成,且第一本机振荡器频率为 f_o ,则第一混频器的输出由两个频率 $f_c + f_o$ 和 $f_c - f_o$ 组成。

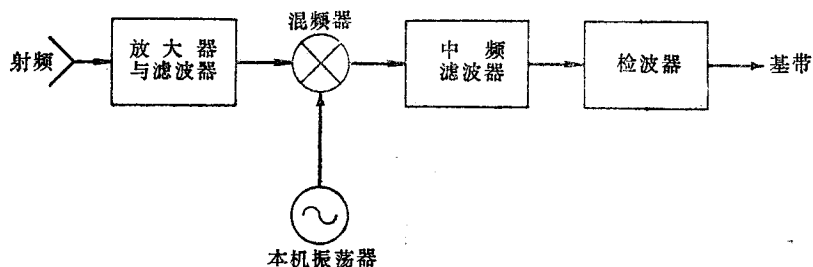


图 1.5 超外差接收机

和 $f_c + f_o - f_o$ 组成。选择本机振荡器频率 f_o 时, 应使这两个频率中的一个等于中频(IF)滤波器的中心频率(f_{IF})。由于 f_o 通常比 f_c 低得多, 为了使混频器的输出频率处于中频滤波器带宽的中心, 实用上常使

$$f_o = f_{IF} + f_c \text{ 或 } f_o = f_{IF} - f_c$$

这种检波方式的优点是同一高质量的滤波器可供一切输入频率使用。频率选择是由改变本机振荡器频率 f_o 实现的。然后中频滤波器输出 $f_{IF} + f_o$, 经第二混频器降低到 f_o , 第二混频器将中频输出与第二振荡器频率(该频率固定在 f_{IF})进行混频。当输入端存在大量不同频率的信号时, 用这种检波方式便出现一个问题。譬如, 若接收机设计成选择第一混频器输出端上的差频, 此时 $f_{IF} = |f_o - f_c|$, 即

$$f_{IF} = f_o - f_c \text{ 或 } f_{IF} = f_c - f_o$$

则存在另一信号频率 f_{IM} , 也能同本机振荡器频率 f_o 混频而产生中频信号。

若 $f_{IF} = f_o - f_c$, 则

$$f_{IM} - f_o = f_{IF}, \text{ 即 } f_{IM} = f_o + f_{IF} = f_c + 2f_{IF}$$

若 $f_{IF} = f_c - f_o$, 则

$$f_o - f_{IM} = f_{IF}, \text{ 即 } f_{IM} = f_o - f_{IF} = f_c - 2f_{IF}$$

信号频率 f_{IM} 称为**镜象频率**。

例 1.4 设一接收机中频滤波器的中心频率为 455 kHz。如果想接收 1MHz 的输入信号, 本机振荡器调谐到 1.455 MHz。则镜象频率为

$$f_{IM} = f_o + 2f_{IF} = 1.91 \text{ MHz}$$

如果有 f_{IM} 存在于输入端, 那末它也会通过中频滤波器。

在有用信号和镜象频率信号都进入混频器后, 就无法将它们分开。因此, 必须在镜象频率信号到达混频器之前将它消除。在混频器前面加一镜象抑制滤波器(称为**预选器**)就能达到这一目的。对于设计来覆盖一个频带的接收机, 预选器必须是可调的。可调滤波器往往很复杂, 并在接收机成本的构成中占有相当大的比重。但大多数接收机都应有预选器。

例 1.4 中, 中频滤波器的中心频率低于输入信号频率, 且输入频率向下搬移到中频频率。中频中心频率也可选择得高于输入信号频率(上变频)。下面的例子说明上变频的优点。

例 1.5 设计一覆盖频带范围为 1~30 MHz 的接收机, 它采用中心频率为 40 MHz 的中频滤波器。对于 1MHz 的输入信号频率 f_s 来说, 有两个本机振荡器频率 f_o (41 MHz)、 f'_o (39 MHz) 能在 40 MHz 上形成混频器的产物。若本机振荡器频率为 41 MHz, 则镜象频率为 81 MHz; 而若本机振荡器频率为 39 MHz, 则镜象频率为 79 MHz。表 1.1 列举了位于覆盖频率范围内的几个输入频率、它们的本机振荡器频率和对应的镜象频率。可选择两组中任何一组本机振荡器频率, 但通常采用第一组本振频率, 即 f_o , 因为这时最高频率与最低频率

表 1.1 本机振荡器频率及其对应的镜象频率(MHz)

f_s	f_o	f_{IM}	f'_o	f'_{IM}
1	41	81	39	79
2	42	82	38	78
10	50	90	30	70
30	70	110	10	50

之比为 70/41, 它低于采用 f_c 时的频率比 39/10。在可变频率振荡器的设计和制作中, 最高频率和最低频率的比是一个重要因素, 比率越低, 设计就越简单。

上变频技术的一个重要特点是全部镜象频率都比要覆盖的频带高。这意味着在输入端加一带宽为 30 MHz 的低通滤波器就可抑制全部镜象频率; 这样上变频时就不需要可调带通滤波器了。不久以前, 在这个频率范围里是不可能采用上变频的, 因为在 30~50 MHz 频率范围内不容易得到高质量的带通滤波器; 然而, 近代制造工艺有了改进, 现在已能提供这个频率范围的高质量晶体滤波器了。

上变频的另一优点是振荡器调谐比 $f_{\max}/f_{\min}$ 小于下变频的振荡器调谐比。若用中频为 455 kHz 的下变频接收机来覆盖相同频带, 则本机振荡频率就需要从 $f_{\min} = 1.455$ MHz 变到 $f_{\max} = 30.455$ MHz, 即调谐范围为 20.93 : 1。

现代通信接收机

现代无线电接收机的射频部分方框图与图 1.5 所示超外差接收机的基本相同, 但其电路与早先的超外差接收机不同。不同点之一是采用了上变频, 使输入滤波器仍是一较简单的不调谐低通滤波器。在混频器之前是否需要一放大器, 取决于具体应用和对接收机技术要求。第三章中将证明, 在许多应用场合不要这种放大器反而能提高接收机的性能。

现代接收机在许多细节方面与老式的接收机不同。主要不同点是采用了频率合成器来提供原来由可变频率振荡器产生的频率。频率合成器能够由一个参考频率产生大量相对精确的频率。虽然它也至少要包含两个振荡器, 但是它的频率漂移和噪声比老式常用的可变频率振荡器要小。现在, 采用数字电路可以精确地控制频率合成器的输出频率。这使无线电接收机和频谱分析仪的微处理机控制成为可能。频率合成器在第十章中详细介绍。由于现在大多数频率合成器是和锁相环结合起来的, 所以设计频率合成器时, 需要透彻地理解锁相环的特性。第八章和第九章提供了这方面的资料。以上对接收机的讨论只考虑了接收振幅调制信号。接收频率调制信号的接收机与此类似, 下面一节介绍调频接收机的主要部件。

集成电路调频接收机

集成电路制造工艺已经能够用最少量的外部元件设计一部收音机。图 1.6 是 Siemens 5469 的简略方框图, Siemens 5469 是具有高度系统集成的高频集成电路。这个双极器件包含用于输入频率高达 50 MHz 的完整调频接收机。器件包括: (1) 射频(RF)

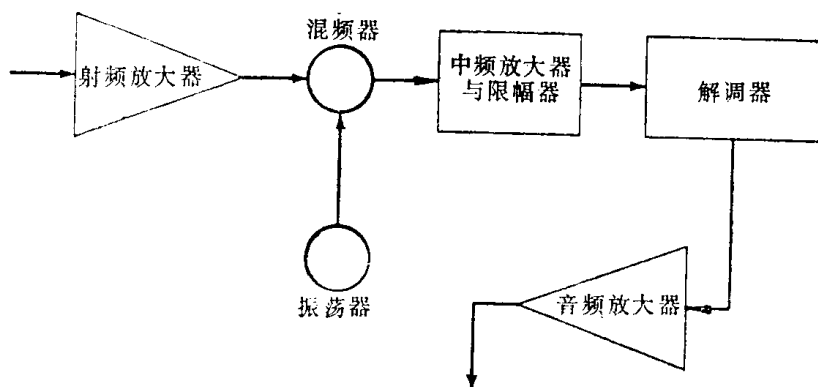


图 1.6 集成电路调频接收机方框图

输入放大器，(2)振荡器，(3)混频器，(4)中频(IF)放大器和限幅器，(5)解调器，(6)带静噪和音量控制的音频(AF)放大器。

全调频系统可以用这样一个集成电路加一个晶体，少到只有两个电感器和供频率微调以及增益调整用的几个电阻器和电容器构成。外接电阻器和电容器增加了电路的灵活性。虽然电阻器和电容器本来可以包括在集成电路中，但电感-电容调谐电路尚无法制作在集成电路片上。所以按目前的集成电路工艺水平，还做不出完备的、不需任何外加元件的集成电路接收机或收发信机(发射机和接收机结合为一体)。

1.5 发 射 机

发射机将欲传送的信息调制到载波上，并将波形放大到所需功率电平后送至发射天线。发射机的各组成部分示于图 1.7。其中有高频振荡器，它受信息信号的调制。然后把已调信号倍频达到所需的发射频率，并经功率放大器放大到所需功率电平。最初的无线电发射机是通过对两个有间隙分隔的电极充电而工作的。当电荷量充得足够多时，便产生火花越过间隙，于是就有电能辐射。然而这种火花间隙发射机是低速的，并且难以准确地控制振荡频率和波形。随着电子振荡器和大功率真空管的发展，火花间隙发射机便被淘汰了。

图 1.7 所示发射机框图结构只是许多型式中的一种。实际上也可以在功率放大器中进行调制。发射机的框图结构取决于所用调制的类型和所需功率电平。窄带发射机通常采用脉冲、

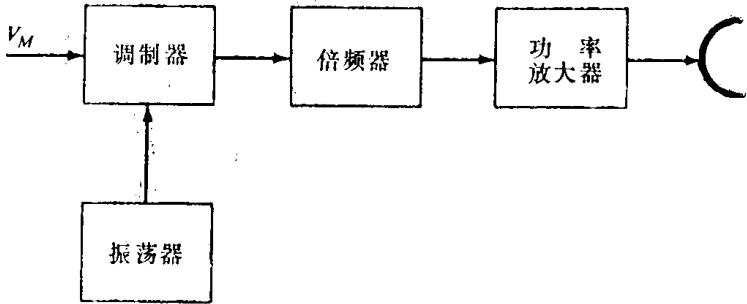


图 1.7 发射机方框图

振幅或频率调制。宽带发射机使用单边调制或多模式调制，它用于远距离的军事、航海、航空和业余无线电通信。许多发射机与接收机中的电路是相类似的，二者都需要低噪声放大器和振荡器。设计接收机要考虑最小可检测信号，而在发射机方面输出功率却是头等重要的。高频功率放大器在第十一章中介绍。

习 题

1.1 求图 P1.1 中所示电路的传输函数 $V_o(s)/I(s)$ 。

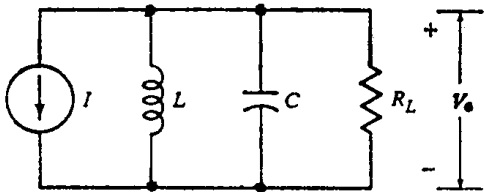


图 P1.1 带通滤波器