

面向 21 世纪

高等学校信息工程类专业系列教材

通信电子技术

Electronic Technology for Communications

徐 祎 姜 晖 崔 琛 编 著



西安电子科技大学出版社

www.xduph.com

面向 21 世纪高等学校信息工程类专业系列教材

通信电子技术

Electronic Technology for Communications

徐祎 姜晖 崔琛 编著

西安电子科技大学出版社

2003

内 容 简 介

本书以无线电通信为主线,系统地讨论了在无线电通信中应用最为广泛的电子技术问题。全书共分7章,主要介绍反馈控制技术、频率合成技术、功率合成技术、无线发射技术、无线接收技术、噪声源产生技术和微控制器应用技术等内容。其中,数字PLL、DDS、定向耦合器、发射中的自动调谐及检测、噪声源产生、微控制器在通信中的一般应用等内容在相近或同类教材中叙述较少或者是没有的。全书尤其突出了通信集成电路的应用等内容,除叙述原理的需要外,一般不涉及分立元件电路。

本书可作为高等学校通信工程与电子信息工程专业的教材,也可作为从事通信以及相关专业技术人员参考书。

★ 本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费索取。

图书在版编目(CIP)数据

通信电子技术=Electronic Technology for Communications / 徐玮等编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2003.8

(面向21世纪高等学校信息工程专业系列教材)

ISBN 7-5606-1280-6

I. 通… II. 徐… III. 电子技术—应用—无线电通信—高等学校—教材 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 056453 号

责任编辑 马乐惠 阎 彬

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)8242885 8201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com>

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 渭南市邮电印刷厂

版 次 2003年8月第1版 2003年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 16.5

字 数 389千字

印 数 1~4000册

定 价 18.00元

ISBN 7-5606-1280-6/TN·0233(课)

XDUP 1551001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

序

第三次全国教育工作会议以来,我国高等教育得到空前规模的发展。经过高校布局和结构的调整,各个学校的新专业均有所增加,招生规模也迅速扩大。为了适应社会对“大专业、宽口径”人才的需求,各学校对专业进行了调整和合并,拓宽专业面,相应的教学计划、大纲也都有了较大的变化。特别是进入 21 世纪以来,信息产业发展迅速,技术更新加快。面对这样的发展形势,原有的计算机、信息工程两个专业的传统教材已很难适应高等教育的需要,作为教学改革的重要组成部分,教材的更新和建设迫在眉睫。为此,西安电子科技大学出版社聘请南京邮电学院、西安邮电学院、重庆邮电学院、吉林大学、杭州电子工业学院、桂林电子工业学院、北京信息工程学院、深圳大学、解放军电子工程学院等 10 余所国内电子信息类专业知名院校长期在教学科研第一线工作的专家教授,组成了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材编审专家委员会,并且面向全国进行系列教材编写招标。该委员会依据教育部有关文件及规定对这两大专业的教学计划和课程大纲,对目前本科教育的发展变化和相应系列教材应具有的特色和定位以及如何适应各类院校的教学需求等进行了反复研究、充分讨论,并对投标教材进行了认真评审,筛选并确定了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材的作者及审稿人。这套教材预计在 2004 年春季全部出齐。

审定并组织出版这套教材的基本指导思想是力求精品、力求创新、好中选优、以质取胜。教材内容要反映 21 世纪信息科学技术的发展,体现专业课内容更新快的要求;编写上要具有一定的弹性和可调性,以适合多数学校使用;体系上要有所创新,突出工程技术型人才培养的特点,面向国民经济对工程技术人才的需求,强调培养学生较系统地掌握本学科专业必需的基础知识和基本理论,有较强的本专业的基本技能、方法和相关知识,培养学生具有从事实际工程的研发能力。在作者的遴选上,强调作者应在教学、科研第一线长期工作,有较高的学术水平和丰富的教材编写经验;教材在体系和篇幅上符合各学校的教学计划要求。

相信这套精心策划、精心编审、精心出版的系列教材会成为精品教材,得到各院校的认可,对于新世纪高等学校教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

系列教材编委会
2002 年 8 月

高等学校计算机、信息工程类专业

系列教材编审专家委员会

主任：杨震（南京邮电学院副院长、教授）

副主任：张德民（重庆邮电学院通信与信息工程学院院长、教授）

韩俊刚（西安邮电学院计算机系主任、教授）

李荣才（西安电子科技大学出版社总编辑、教授）

计算机组

组长：韩俊刚（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

王小民（深圳大学信息工程学院计算机系主任、副教授）

王小华（杭州电子工业学院计算机分院副院长、副教授）

孙力娟（南京邮电学院计算机系副主任、副教授）

李秉智（重庆邮电学院计算机学院院长、教授）

孟庆昌（北京信息工程学院教授）

周娅（桂林电子工业学院计算机系副主任、副教授）

张长海（吉林大学计算机科学与技术学院副院长、教授）

信息工程组

组长：张德民（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

方强（西安邮电学院电信系主任、教授）

王晖（深圳大学信息工程学院电子工程系主任、副教授）

胡建萍（杭州电子工业学院电子信息分院副院长、副教授）

徐祎（解放军电子工程学院电子技术教研室主任、副教授）

唐宁（桂林电子工业学院通信与信息工程系副主任、副教授）

章坚武（杭州电子工业学院通信工程分院副院长、教授）

康健（吉林大学通信工程学院副院长、教授）

蒋国平（南京邮电学院电子工程系副主任、副教授）

总策划：梁家新

策划：马乐惠 云立实 马武装 马晓娟

电子教案：马武装

前 言

本书以无线电通信为主线,系统地讨论了在无线电通信中应用最为广泛的电子技术问题,介绍了无线通信系统中的反馈控制技术、频率合成技术、功率合成技术、无线发射技术、无线接收技术、噪声源产生技术以及微控制器在通信设备中的应用等内容。

全书共分7章。第1章反馈控制技术,介绍了反馈控制的一般原理以及AGC、AFC、PLL等技术,重点讨论了锁相技术;第2章频率合成技术,在对各种频率合成方案进行了分析、比较后,重点讨论了锁相式频率合成器与直接数字式频率合成器的原理及应用;第3章功率合成技术,主要介绍了常用传输线变压器功率合成混合网络;第4章无线发射技术,讨论了发射机的一般组成、工作原理、功率放大和各种模拟、数字调制技术,介绍了发射机自动调谐及常用检测器的工作原理;第5章无线接收技术,在介绍接收机的一般组成方案及原理的基础上,重点讨论了超外差式接收机和各种模拟、数字已调信号的解调原理及实现;第6章噪声源产生技术,分别介绍了典型的模拟噪声源和数字噪声源,并对噪声的特性进行了详尽的讨论;第7章微控制器应用技术,介绍了微控制器(即单片机)在通信中的一般应用,给出了通信电台中常用的控制流程。

全书围绕无线电通信设备的组成,系统地讨论了各种功能电路在无线电通信系统中的应用。其中,数字PLL、DDS、定向耦合器、发射中的自动调谐及检测、噪声源产生、微控制器(MCU)在通信中的一般应用等内容在相近或同类教材中叙述较少或者是没有的。全书尤其突出了通信集成电路的应用,各章都介绍了集成电路的实现方案。除叙述原理的需要外,一般不涉及分立元件电路。

本书绪论及第3~7章由徐祎编写;第2章由姜晖编写;第1章由崔琛、徐祎共同编写。全书由徐祎统稿。在本书编写过程中,梁忞飞老师、研究生冯辉同学绘制了部分插图,王可人教授审阅了书稿,并提出了宝贵意见,在此深表感谢。

感谢西安电子科技大学出版社对本书的出版给予的支持与帮助。

由于编著者水平有限,书中不妥之处敬请读者指正。

编著者
2003年6月

目 录

绪论	1	2.3.2 集成 DDS 及应用	83
第 1 章 反馈控制技术	6	2.4 频率合成器的相位噪声	90
1.1 反馈控制的基本概念	6	2.4.1 输出相位噪声	90
1.1.1 工作原理	6	2.4.2 短期频率稳定度	96
1.1.2 数学模型	7	习题 2	96
1.1.3 基本特性	8	第 3 章 功率合成技术	100
1.2 自动增益控制	8	3.1 传输线变压器	100
1.2.1 工作原理	9	3.1.1 基本工作原理	100
1.2.2 AGC 检波器	12	3.1.2 常用的传输线变压器	103
1.2.3 增益控制方法	13	3.2 功率合成原理	105
1.2.4 AGC 电路	17	3.2.1 传输线变压器混合网络	105
1.3 自动频率控制	19	3.2.2 同相功率合成	108
1.3.1 工作原理	19	3.2.3 反相功率合成	109
1.3.2 AFC 电路	21	3.3 功率分配原理	110
1.4 锁相技术	23	3.3.1 功率分配器	110
1.4.1 锁相环基本工作原理	23	3.3.2 定向耦合器	112
1.4.2 锁相环基本部件	24	3.4 功率合成器方案及保护	113
1.4.3 锁相环性能分析	34	习题 3	115
1.4.4 数字锁相环	40	第 4 章 无线发射技术	117
1.4.5 集成锁相环	44	4.1 基本概念	117
1.4.6 锁相技术应用	46	4.1.1 发射机的基本工作原理	118
习题 1	49	4.1.2 发射机的主要性能指标	119
第 2 章 频率合成技术	51	4.2 射频功率放大	121
2.1 基本概念	51	4.2.1 射频功率放大器	121
2.1.1 基本方法与分类	51	4.2.2 阻抗匹配网络	127
2.1.2 频率合成器的主要技术指标	55	4.2.3 自动调谐	133
2.2 锁相式频率合成器	57	4.2.4 检测器	137
2.2.1 脉冲锁相式频率合成器	57	4.3 调制	142
2.2.2 混频锁相式频率合成器	57	4.3.1 幅度调制	143
2.2.3 数字锁相式频率合成器	58	4.3.2 频率调制	150
2.2.4 小数分频式频率合成器	63	4.3.3 数字调制	157
2.2.5 多环频率合成器	67	4.4 发射通道典型集成电路	164
2.2.6 集成锁相式频率合成器	69	4.4.1 射频集成功率模块	164
2.3 直接数字式频率合成器	78	4.4.2 小功率集成 FM 发射系统	168
2.3.1 DDS 基本原理	78	习题 4	170

第 5 章 无线接收技术	172	6.2 噪声的放大	228
5.1 基本概念	172	6.2.1 噪声放大电路	228
5.1.1 接收机的基本工作原理	172	6.2.2 噪声限幅	229
5.1.2 接收机的主要性能指标	174	6.3 数字噪声源	231
5.2 超外差式接收机	176	6.3.1 伪噪声编码	231
5.2.1 接收机中的放大器	176	6.3.2 m 序列	232
5.2.2 混频器	179	习题 6	235
5.2.3 选频滤波器	183	第 7 章 微控制器应用技术	236
5.2.4 接收机中的噪声与干扰	188	7.1 微控制器	236
5.2.5 中频频率选择及变频次数	190	7.1.1 基本组成	237
5.3 解调	193	7.1.2 过程通道	238
5.3.1 振幅解调	194	7.1.3 控制软件	240
5.3.2 频率解调	196	7.2 典型微控制器简介	241
5.3.3 数字解调	201	7.2.1 KS56/KS57	241
5.4 接收通道典型集成电路	206	7.2.2 MC68HC05	243
5.4.1 集成中频系统	206	7.3 微控制器在通信设备中的应用	247
5.4.2 小功率集成 FM 接收系统	210	7.3.1 主控程序	247
习题 5	214	7.3.2 频率合成器的控制与频道选择	249
第 6 章 噪声源产生技术	217	7.3.3 发射功率控制及天线调谐	250
6.1 晶体二极管噪声源	217	7.3.4 显示器与键盘	252
6.1.1 晶体二极管噪声机理	217	习题 7	255
6.1.2 二极管噪声电路	220	参考文献	256
6.1.3 噪声的统计特性	220		

绪 论

通信就是消息(Message)的传递,即将消息借助于某种形式的信号(Signals)由一地传送到另一地的过程。当所传送的信号是电信号时,就称为电通信(Electrical Communication)。由于电通信具有几乎可在任意通信距离上实现快速、有效、准确、可靠的消息传递的能力,并且其它形式的信号可以很方便地转换成电信号,因此,在现代通信中人们广泛采用电通信,本书中的通信特指电通信。

图 0-1 为通信系统模型。在发送端,消息输入到发送设备,由发送设备将消息变换为适合于信道(Channel)传输的电信号,电信号经传播媒介也就是信道传输到接收端。在信号的传输过程中,信号被叠加上噪声及干扰。在接收端,接收设备滤除噪声及干扰后,将电信号还原为消息。

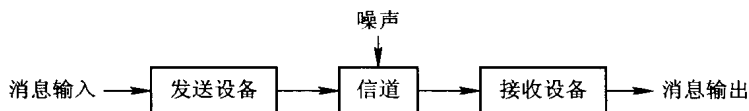


图 0-1 通信系统模型

根据信道中所传输的信号性质的不同,通信可分为模拟通信和数字通信两大类。

在模拟通信中,系统传输的通常都是由连续模拟消息转换而成的连续模拟信号。发送设备首先通过发送终端将其它形式的连续消息变换为原始电信号,以便于进行电通信。为了在接收端能够恢复原来的消息,原始电信号与消息之间必须建立单一的对对应关系。为了使信号利于在信道中传输,发送设备还需将原始电信号转换成适合信道传输的信号,这一过程称为调制(Modulation)。经过调制后的信号称为已调信号,它应有两个基本特性:一是携带消息,二是适合在信道中传输。经信道传输后已调信号到达接收端,在接收设备中,已调信号先被还原为原始电信号(我们称这一过程为解调(Demodulation),解调是调制的逆过程),而后再由接收终端将原始电信号还原回消息。模拟通信系统模型如图 0-2 所示。发送终端和接收终端常统称为终端,主要完成消息与原始电信号之间的转换。

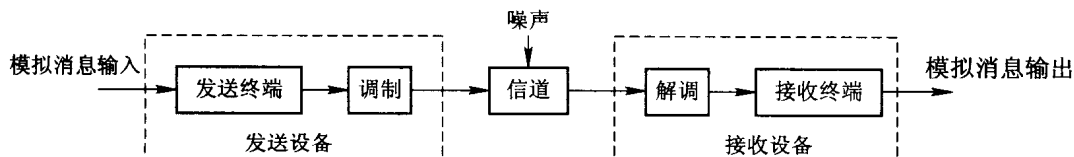


图 0-2 模拟通信系统模型

数字通信系统模型如图 0-3 所示。数字通信既可传输离散数字消息，也可传输经过 A/D 变换后的连续模拟消息。为了使数字信号能更有效地传输，在发送数字信号前通常要进行编码，编码后的信号再经调制发送到信道传输。接收端需要解码后再将信号还原为消息。与模拟通信相比，数字通信增加了编、解码过程。当用数字通信系统传输模拟消息时，在发送端需要通过 A/D 变换将模拟信号转换为数字信号，在接收端通过 D/A 变换再将数字信号转换回模拟信号。

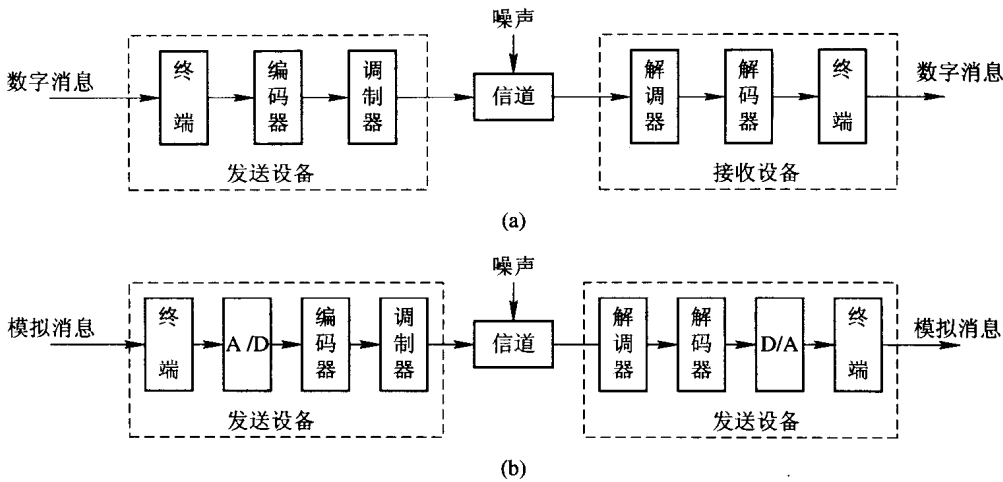


图 0-3 数字通信系统模型

由于数字通信传输的数字信号携带的消息的参量只有有限个取值，例如二进制信号，只有 1、0 两个值，接收信号时只需判别 1、0 码就可以，因此允许信号波形可以存在一定的失真。而对于模拟通信来说，即使很小的失真，也将对消息的恢复产生影响。所以数字通信具有良好的抗噪声性能。在中继通信时，数字信号可通过信号波形的再生消除噪声的积累。利用编码技术，数字通信还可以发现或纠正信号传输过程中的错码。对数字信号加密比对模拟信号加密容易实现得多，并且很难被破译。数字信号易于存储、处理和变换，更便于与计算机相连接。数字通信的这些优点，使得它在现代通信中得到广泛应用。但数字通信存在信号带宽比较宽，设备结构复杂，需要同步系统等缺点。

无论模拟信号还是数字信号，在信号的传输过程中，信号都将衰减，并会加入噪声和干扰。所以在通信系统中，无论是发送端还是接收端都要对信号进行放大和滤波。虽然在通信系统模型中未给出放大和滤波模块，但放大信号和滤波在通信系统中必不可少，且贯穿于通信系统的各个环节。

根据电信号传输媒介的不同，也就是通信信道的不同，通信可分为有线通信和无线通信两大类。有线通信是指利用导线作为信道的通信，此时电信号通过架空明线、对称电缆、同轴电缆、波导管、光缆等有线传输媒质进行传输。有线电话、有线电视、光纤通信等都是有线通信。无线通信是指利用大气空间作为信道的通信，它是利用无线电波在空间的传播，也就是空间电磁波的辐射来传输消息的。无线电广播、无线电电视、移动通信、卫星通信等均属无线通信。图 0-4 为无线通信系统示意图。无线通信中的发送设备又称无线发射设备，主要由发送终端、发射机和发射天线三部分组成；无线接收设备主要由接收天线、

接收机和接收终端三部分组成。由于无线通信机动性强，其应用领域相当广泛，已成为现代通信中最重要的通信手段之一。



图 0-4 无线通信系统示意图

不同波段的无线电波具有不同的传播方式，传播方式的不同决定了传播的距离及特性。表 0-1 列出了无线电波的波段划分、主要传播方式及用途。我们熟悉的无线电调幅广播占用中波(MF)和短波(HF)两个波段。由于调频广播采用的调频(FM)信号占据的带宽较宽，因此使用超短波(VHF)波段。而电视则使用甚高频(VHF)和超高频(UHF)两个频段，其中 VHF 有 12 个频道，UHF 有 70~80 个频道。移动通信也使用 VHF 和 UHF 频段。在短波(HF)波段，利用天波电离层反射可实现远距离无线通信。卫星通信占用 SHF 频段，靠通信卫星反射实现远距离无线通信。通常已调信号的带宽越宽，所使用的信道频段越高。

表 0-1 无线电波段划分

波段名称		波 长	频段名称	频率范围	传播方式	用 途
甚长波		$10^3 \sim 10^2$ km	音频(AF)	0.3~3 kHz	海水、地波	海底、基带数据
超长波		$10^2 \sim 10$ km	甚低频(VLF)	3~30 kHz		导航、频标
长波		10~1 km	低频(LF)	30~300 kHz	地波	导航、电力通信
中波		$10^3 \sim 10^2$ m	中频(MF)	0.3~3 MHz	地波、天波	广播、通信、导航
短波		$10^2 \sim 10$ m	高频(HF)	3~30 MHz	天波、地波	广播、远距离通信
超短波	米 波	10~1 m	甚高频(VHF)	30~300 MHz	视距、 对流层散射	电视、调频广播、 移动通信
	分米波	$10^2 \sim 10$ cm	超高频(UHF)	0.3~3 GHz		电视、雷达、 移动通信
微波	厘米波	10~1 cm	特高频(SHF)	3~30 GHz	视距	卫星通信、 微波中继、雷达
	毫米波	10~1 mm	极高频(EHF)	30~300 GHz		卫星通信、雷达、 射电天文

如图 0-5 所示为典型多信道波段工作无线通信电台组成框图，它主要由发射通道、接收通道、振荡频率源、基带信号处理、输入输出设备以及控制电路组成。发送消息时，消息由基带电路进行处理后，经调制器生成已调波信号，发射混频器将已调波信号搬移到适宜无线信道传输的频率上，经功率放大器将信号放大到足够的功率，由天线辐射到空间信道。接收信号时，先由预选滤波器滤除部分干扰，再经混频器、窄带滤波器选出所需接收

的信号，放大后由解调器还原为基带信号，经基带电路处理后输出原消息。由于信号调制样式的不同、通信体制的多样性以及通信技术的不断发展，使得无线通信设备各部分的组成也有所不同，但其基本原理相同。组成无线通信系统各部分的基本原理、功能电路及所涉及的技术问题，就是本书所讨论的对象。

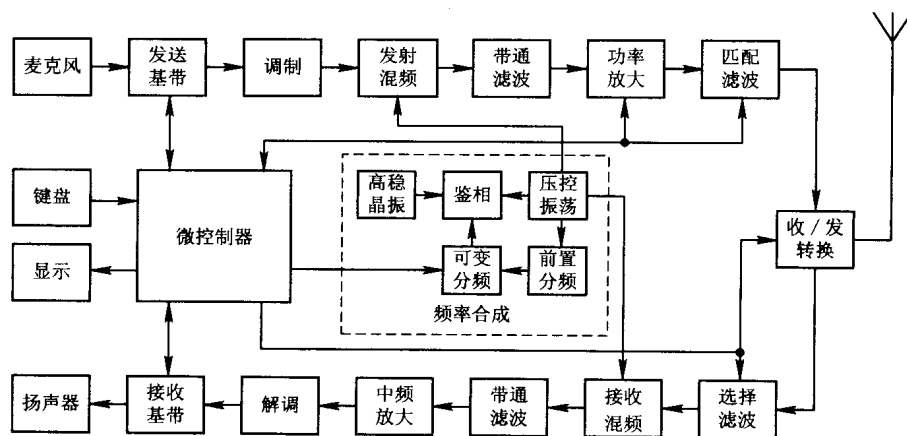


图 0-5 典型多信道波段工作无线通信电台组成框图

本书主要讨论无线通信系统中所涉及的电子技术问题，并介绍现代电子技术在通信系统中的应用。这些电子技术主要包括无线通信系统中的反馈控制技术、频率合成技术、功率合成技术、无线发射技术、无线接收技术、噪声源产生技术以及无线通信设备中微控制器的应用等。

为了保证通信的高质量，提高整机性能指标，人们在通信设备中大量采用了反馈控制技术，主要有自动增益控制(AGC)、自动频率控制(AFC)以及锁相环路(PLL)等。反馈控制技术的应用使得通信系统在一定条件下，可以自适应地调整其工作状态，以适应复杂多变的工作环境。反馈控制技术是现代通信电子技术中不可缺少的一项。

作为通信设备中的振荡频率源，频率合成器是近几年发展最快、种类及采用新工艺最多的专用集成电路之一，它的发展对通信的影响非常大，它为如跳频通信等新的通信体制的建立提供了必要的保证，改变了许多传统的通信模式，提高了通信设备的整机性能并增强了设备的功能。

功率合成技术是现代通信电子技术中的重要组成部分，它是获得超大发射功率的重要途径。在大功率通信电台中必须采用该技术。

在无线通信的发射过程中，功率放大与调制是其最重要的部分。不同的调制样式决定了发射机不同的组成形式，同时也对发射机中各组成部分提出了不同的要求。调制样式的选择主要取决于通信体制，它与设备复杂程度、成本、性能要求等有关。高效率地进行功率放大是发射机中需要重点解决的问题，因为功率放大器的性能直接影响整机的性能指标。自动检测、调整功率放大器的状态，这在发射设备中，尤其是在大功率电台中至关重要。

接收是发射的逆过程，应与发射相匹配。超外差式接收机是最典型的通信接收机，应用也最为广泛。其发展演变的过程充分体现了现代电子技术的发展过程。与发射电路相比

较，接收电路更容易集成化，随着大规模专用集成电路的发展，接收机中越来越多地采用了接收通道专用集成电路。接收性能的优劣很大程度上取决于解调方案的设计。对不同解调电路的分析可加深对现代通信电路尤其是数字通信电路的理解。

在特殊场合需要对噪声加以利用或使用，比如在测量仪器、电子对抗等方面。由于噪声的特殊性，对它的放大、处理有别于一般的信号，需要专门研究讨论。

微控制器(MCU)也就是单片机在通信设备中的应用，促进了通信设备的小型化和智能化，大大提高了设备的自动化程度。MCU已成为现代通信电台中不可缺少的部分。

随着通信理论的发展和通信电子技术的发展，无线通信正向着集成化、小型化、数字化、智能化及网络化方向发展，这必将带来通信设备系统结构的变化。尤其是软件无线电(Software Radio)的出现，给通信设备带来了全新的变革。例如，变频加窄带滤波是传统接收机中常用来抑制干扰的行之有效的方法，现在正逐渐被数字接收机或软件无线电的“零中频”直接处理所代替。虽然目前软件无线电在工程实现上还受到一些技术水平的限制，但它已为我们展现了理想的通信方式。

第 1 章 反馈控制技术

在通信电路中,为了提高电路的技术性能指标,常需要对电信号的振幅、频率和相位这三个参数进行自动控制。为了使接收机输出信号的振幅不随接收信号的强弱而剧烈变化,要求接收机的增益能够进行自动调节。超外差式接收机的本振频率相对信号载频的不稳定性,会严重影响接收质量,甚至会导致接收信号中断。为了确保本振频率相对于信号载频频率的稳定性,需要接收机具备自动频率微调的能力。在数字通信系统中,要求收发两端的时钟信号严格保持同步,这就要求控制收发两端时钟信号的相位差必须在可容许的范围内。实现上述信号振幅、频率与相位的自动控制,常采用反馈控制方法。

1.1 反馈控制的基本概念

1.1.1 工作原理

反馈控制电路由比较器、控制信号产生、被控器件以及反馈四部分组成,这四部分构成了一个闭合环路。图 1-1 所示为反馈控制电路的一般原理框图。比较器将外加基准信号 $r(t)$ 与反馈信号 $f(t)$ 进行比较,产生误差信号 $e(t)$,然后通过控制信号产生输出控制信号 $c(t)$,控制信号 $c(t)$ 与输入信号 $x(t)$ 共同作用于被控器件,产生输出信号 $y(t)$,输出信号经过反馈为比较器提供进行比较的反馈信号 $f(t)$ 。

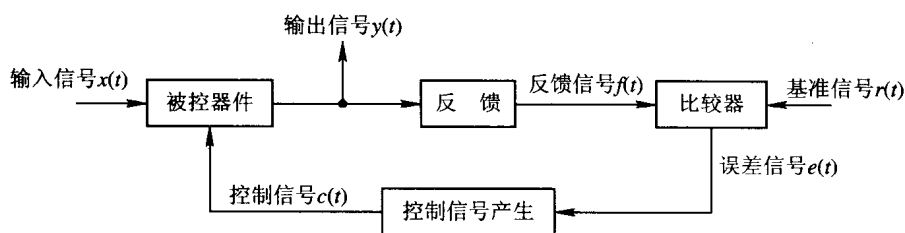


图 1-1 反馈控制电路的一般原理框图

反馈控制电路通常处于两种不同的工作模式下:基准信号 $r(t)$ 不变和基准信号 $r(t)$ 变化。

1. 基准信号 $r(t)$ 不变

若电路原来处于稳定的工作状态,当输入信号 $x(t)$ 或被控器件特性发生变化,导致输出信号 $y(t)$ 发生变化时,反馈信号 $f(t)$ 也将同时发生变化。由于基准信号 $r(t)$ 固定,则必

然导致误差信号 $e(t)$ 发生变化, 产生一个反映误差的控制信号。合理设计被控器件的特性, 使输出信号 $y(t)$ 随 $e(t)$ 变化的方向与起始变化时的方向相反, 经过循环反馈后, 最终整个环路将达到新的稳定状态。在这种工作模式下, 反馈控制电路的作用是使电路的输出信号 $y(t)$ 稳定在预先设定的某一状态上。

2. 基准信号 $r(t)$ 变化

当基准信号 $r(t)$ 变化时, 无论输入信号 $x(t)$ 或被控部件本身特性有无变化, 输出信号 $y(t)$ 一般均要发生变化。此时反馈信号 $f(t)$ 与基准信号 $r(t)$ 相比, 如果二者变化规律不一致或不满足预先设置的规律, 则产生误差信号 $e(t)$ 。设计被控器件的特性, 使得它在 $e(t)$ 作用下的输出信号 $y(t)$ 向减小误差的方向变化, 最终使输出信号 $y(t)$ 与基准信号 $r(t)$ 的变化趋于一致或满足预先设置的规律。在这种工作模式下, 反馈控制电路的作用是使电路的输出能跟踪上基准信号的变化。

1.1.2 数学模型

反馈控制电路一般不满足线性规律, 所以应采用非线性方法分析。但在一定的条件下, 反馈控制电路可近似采用线性化的分析方法, 虽然这些分析是在一定条件下进行的, 但足以反映反馈控制电路的基本特性以及各组成部分对特性的影响。

图 1-2 给出了在满足线性条件或对电路进行线性化后, 反馈控制电路的 s 域数学模型。在反馈系统中, 除了输入激励 $x(t)$ 与输出响应 $y(t)$ 之间的关系外, 输出 $y(t)$ 与参考信号 $r(t)$, 误差信号 $e(t)$ 与参考信号 $r(t)$ 之间的关系也非常重要。

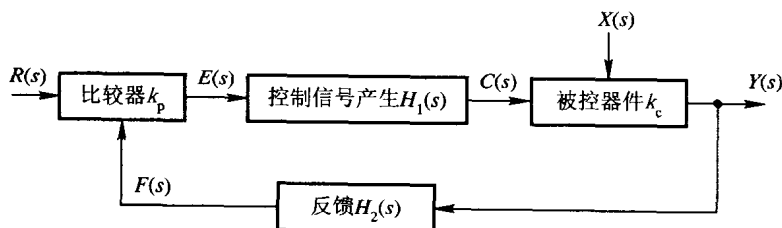


图 1-2 反馈控制电路的 s 域数学模型

在满足线性化的条件下, 比较器输出的误差信号为

$$E(s) = k_p [R(s) - F(s)] \quad (1-1-1)$$

被控器件线性化后, 有

$$Y(s) = k_c C(s) \quad (1-1-2)$$

控制信号产生模块的传输函数为

$$H_1(s) = \frac{C(s)}{E(s)} \quad (1-1-3)$$

反馈模块的传输函数为

$$H_2(s) = \frac{F(s)}{Y(s)} \quad (1-1-4)$$

由此可分别得出整个反馈控制电路的闭环传递函数 $T(s)$ 与误差传递函数 $T_e(s)$:

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{k_p k_c H_1(s)}{1 + k_p k_c H_1(s) H_2(s)} \quad (1-1-5)$$

$$T_e(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{k_p k_c}{1 + k_p k_c H_1(s) H_2(s)} \quad (1-1-6)$$

1.1.3 基本特性

反馈控制电路的基本特性主要有：暂态与稳态响应、跟踪特性、频率特性、稳定性与动态范围。

(1) 暂态与稳态响应。这里所指的响应，是指在输入信号不变的条件下，由基准信号 $r(t)$ 引起的输出信号 $y(t)$ 的暂态响应与稳态响应。可利用闭环传递函数 $T(s)$ 与基准信号 $R(s)$ 得到 $Y(s) = T(s)R(s)$ ，求出系统的响应 $y(t)$ 后，对 $y(t)$ 进行分解，即可得到暂态响应与稳态响应。暂态响应与稳态响应能在一定程度上反映系统的反馈控制速度和被控程度。

(2) 跟踪特性。所谓跟踪特性，是指在已知基准信号 $r(t)$ 的条件下，误差信号 $e(t)$ 的变化规律。由误差传递函数 $T_e(s)$ 与 $R(s)$ ，可求出 $E(s)$ ，即 $E(s) = T_e(s)R(s)$ ，对 $E(s)$ 进行拉普拉斯反变换，即可求出跟踪特性——误差信号 $e(t)$ 。由终值定理可得反馈控制电路误差信号的终值：

$$e_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \quad (1-1-7)$$

(3) 频率特性。根据拉普拉斯变换与傅立叶变换的对应关系，可方便地由 $T(s)$ 与 $T_e(s)$ 得到系统的闭环频率响应特性 $T(j\omega)$ 与误差频率响应特性 $T_e(j\omega)$ 。

(4) 稳定性。一个负反馈控制电路的稳定性是十分重要的。根据线性系统稳定性判据可知：若闭环传递函数 $T(s)$ 中的全部极点都位于复平面的左半平面内，则环路是稳定的；若其中有一个或一个以上的极点位于复平面的右半平面内或虚轴上，则环路是不稳定的。

(5) 动态范围。反馈控制电路的正常工作范围称为动态范围或控制范围。动态范围的大小主要取决于各部件中器件的非线性特性，一般用基准信号 $r(t)$ 、输入信号 $x(t)$ 或输出信号 $y(t)$ 的取值范围来表示。

1.2 自动增益控制

在通信系统中，要求系统具有稳定的输出信号电平，以保证系统能够接收或发射稳定的信号，一般通过自动增益控制 AGC (Automatic Gain Control) 来实现这一功能。AGC 的作用就是稳定输出信号电平，使输出信号电平稳定在允许的变化范围内。AGC 电路可以保证当输入信号电平有很大的变化时，输出信号电平基本平稳，并且它还可以减小由于电路参数变化引起的输出电平波动。AGC 电路在通信以及其它电子设备中具有非常重要的作用。

1.2.1 工作原理

1. AGC 的基本工作原理

AGC 电路一般由可控增益放大器、AGC 检波、直流放大器和比较器组成,如图 1-3 所示。

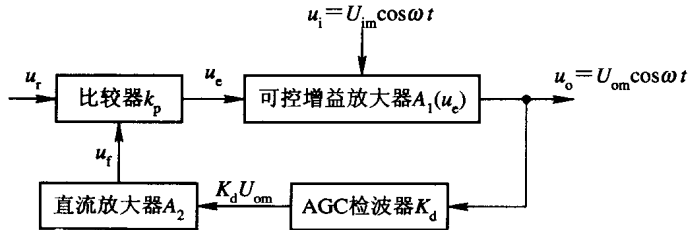


图 1-3 自动增益控制电路框图

设可控增益放大器的输入信号为 $u_i = U_{im} \cos \omega t$, 输出信号为 $u_o = U_{om} \cos \omega t$, 可控增益放大器的增益为 $A_1 = U_{om} / U_{im}$, 该增益受比较器输出的误差电压 u_e 控制, 是 u_e 的函数。一般情况下, A_1 随误差信号 u_e 的增大而减小。

从增益控制的角度看, 反馈控制电路的输入量是基准信号 u_r , 输出量是输出信号 u_o 的振幅 U_{om} 。输出量与输入量之间的关系满足线性, 且是预先确定下来的, 即

$$U_{om} = K u_r \quad (1-2-1)$$

式中: K 为常数。

输入量 u_r 通常是一个不变的电压, 此时比较器只有当 u_f 大于 u_r 时才有 u_e 输出, 否则 $u_e = 0$, 这种情况时, 把 u_r 称为比较器的门限电压。在一些特殊应用场合下, 输入量 u_r 也可以是一个按一定规律变化的电压。

直流放大器输出的反馈电压 u_f 为

$$u_f = A_2 K_d U_{om} \quad (1-2-2)$$

式中: A_2 ——直流放大器的电压增益;

K_d ——AGC 检波器的检波电压传输系数;

U_{om} ——输出电压 u_o 的振幅。

比较器输出的误差电压为

$$u_e = k_p (u_f - u_r) \quad (1-2-3)$$

式中: k_p ——比较器的传输系数。

当环路满足式(1-2-1)时, 比较放大器输出的误差电压 $u_e = 0$, 此时环路不工作, 即 u_o 经 AGC 检波和直流放大后加到比较器的输入电压 u_f 等于 u_r , 即

$$A_2 K_d U_{om} = u_r \quad (1-2-4)$$

上式表明: A_2 与 K_d 的乘积应为 $1/K$; $A_1(0)$ 与 U_{im} 的乘积应为 U_{om} 。

当某种原因使 U_{im} 或 $A_1(0)$ 偏离所要求的数值时, U_{om} 将由 $K u_r$ 变化到 U_{om0} , 把 U_{om0} 与 $K u_r$ 的偏差 ΔU_{om0} 称为起始幅差。 U_{om0} 经 AGC 检波和直流放大后, 与 u_r 比较产生误差电压

$$u_{e0} = k_p (A_2 K_d U_{om0} - u_r) \quad (1-2-5)$$