


教育科学“十五”国家规划课题研究成果

高频电子线路

胡宴如 耿苏燕 主编

 高等教育出版社

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

高频电子线路

胡宴如 耿苏燕 主编

高等教育出版社

ISBN 7-04-018321-5

00-88221-5-4

内容提要

本书是教育科学“十五”国家规划课题研究成果,为满足高等学校应用型人才培养需要而编写。全书由绪论,小信号选频放大器,高频功率放大器,正弦波振荡器,振幅调制、解调与混频电路,角度调制与解调电路,反馈控制电路等七章组成。

本书重点突出,着重于物理概念的叙述,力求避免繁琐的数学推导,加强基本理论和基本电路的分析,注意理论讲授、课堂讨论、自学、作业等教学环节的有机结合,以充分调动学生学习的积极性和主动性。书中每节都有复习与讨论题,每章有小结和习题。

本书可作为高等学校应用型本科电子信息工程、通信工程、测控技术与仪器等专业的教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/胡宴如,耿苏燕主编. —北京:高等教育出版社,2004. 12

ISBN 7-04-015596-6

I. 高... II. ①胡...②耿... III. 高频-电子电路-高等学校-教材 IV. TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 101479 号

策划编辑 韩颖 责任编辑 李葛平 封面设计 于文燕 责任绘图 尹莉
版式设计 胡志萍 责任校对 王雨 责任印制 宋克学

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京凌奇印刷有限责任公司

开 本 787×960 1/16
印 张 18
字 数 330 000

版 次 2004 年 12 月第 1 版
印 次 2004 年 12 月第 1 次印刷
定 价 20.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号:15596-00

总序

为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展需要,满足我国高校从精英教育向大众化教育的重大转移阶段中社会对高校应用型人才培养的各类要求,探索和建立我国高等学校应用型人才培养体系,全国高等学校教学研究中心(以下简称“教研中心”)在承担全国教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上,组织全国100余所以培养应用型人才为主的高等院校,进行其子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索,在高等院校应用型人才培养的教学内容、课程体系研究等方面取得了标志性成果,并在高等教育出版社的支持和配合下,推出了一批适应应用型人才培养需要的立体化教材,冠以“教育科学‘十五’国家规划课题研究成果”。

2002年11月,教研中心在南京工程学院组织召开了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题立项研讨会。会议确定由教研中心组织国家级课题立项,为参加立项研究的高等院校搭建高起点的研究平台,整体设计立项研究计划,明确目标。课题立项采用整体规划、分步实施、滚动立项的方式,分期分批启动立项研究计划。为了确保课题立项目标的实现,组建了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题领导小组(亦为高校应用型人才立体化教材建设领导小组)。会后,教研中心组织了首批课题立项申报,有63所高校申报了近450项课题。2003年1月,在黑龙江工程学院进行了项目评审,经过课题领导小组严格的把关,确定了首批9项子课题的牵头学校、主持学校和参加学校。2003年3月至4月,各子课题相继召开了工作会议,交流了各校教学改革的情况和面临的具体问题,确定了项目分工,并全面开始研究工作。计划先集中力量,用两年时间形成一批有关人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等理论研究成果报告和 In 研究报告基础上同步组织建设的反映应用型人才特色的立体化系列教材。

与过去立项研究不同的是,“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题研究在审视、选择、消化与吸收多年来已有应用型人才探索与实践成果基础上,紧密结合经济全球化时代高校应用型人才培养工作的实际需要,努力实践,大胆创新,采取边研究、边探索、边实践的方式,推进高校应用型本科人才培养工作,突出重点目标,并不断取得标志性的阶段成果。

教材建设作为保证和提高教学质量的重要支柱和基础,作为体现教学内容

和教学方法的知识载体,在当前培养应用型人才中的作用是显而易见的。探索、建设适应新世纪我国高校应用型人才培体系需要的教材体系已成为当前我国高校教学改革和教材建设工作面临的十分重要的任务。因此,在课题研究过程中,各课题组充分吸收已有的优秀教学改革成果,并和教学实际结合起来,认真讨论和研究教学内容和课程体系的改革,组织一批学术水平较高、教学经验较丰富、实践能力较强的教师,编写出一批以公共基础课和专业、技术基础课为主的有特色、适用性强的教材及相应的教学辅导书、电子教案,以满足高等学校应用型人才培养的需要。

我们相信,随着我国高等教育的发展和高校教学改革的不断深入,特别是随着教育部“高等学校教学质量和教学改革工程”的启动和实施,具有示范性和适应应用型人才培养的精品课程教材必将进一步促进我国高校教学质量的提高。

全国高等学校教学研究中心

2003年4月

前 言

本书是教育科学“十五”国家规划课题研究成果。随着我国高等教育的迅速发展,为了满足高等学校应用型人才培养的需要,在全国高等学校教学研究中心以及高等教育出版社的支持下,根据长期教学改革和实践的经验,我们编写了此书。它适用于应用型本科电子信息工程、通信工程、测控技术与仪器等专业作为教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

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,新技术、新器件发展迅速。考虑到应用型本科人才培养的特点,本书在编写中特别注意以下几点:

(1) 突出重点,着重于物理概念的叙述,力求避免繁琐的数学推导,加强基本理论和基本分析方法的讨论。

(2) 注重应用,加强电路组成模型与应用方法的介绍,注意内容的适度更新。

(3) 注意理论讲授、课堂讨论、自学、作业等教学环节的有机结合,以充分调动学生学习的积极性和主动性。

(4) 难点适当分散,力图深入浅出,层次分明,简明扼要,有利于教与学。

全书共分七章。

第1章为绪论,主要介绍通信系统的组成、非线性电子线路的基本概念及本课程的特点。

第2章为小信号选频放大器,主要介绍谐振回路的基本特性和小信号谐振放大器的工作原理,对集中选频放大器的组成及放大器的噪声作简要的分析。

第3章为高频功率放大器,主要介绍谐振功率放大器的工作原理、特性及电路,同时对传输线变压器及宽带功率放大器进行讨论。

第4章为正弦波振荡器,主要介绍反馈振荡器,重点分析 LC 振荡器和晶体振荡器,并对振荡器的频率和振幅稳定性进行讨论,对其他正弦波振荡器只作简单介绍。

第5章为振幅调制、解调与混频电路,主要介绍振幅调制、解调和混频原理、相乘器电路、实用调幅、检波、混频电路。

第6章为角度调制与解调电路,主要介绍频率调制与解调原理、调频与鉴频电路。

第7章为反馈控制电路,主要介绍锁相环路和锁相频率合成器,自动增益控

制和自动频率控制电路只作简要介绍。

为了便于组织课堂讨论,本书每节编有复习与讨论题,同时,每章还编有小结和习题。

本书由胡宴如、耿苏燕主编,第1~4章由胡宴如编写,第5~7章由耿苏燕编写,胡旭峰、马丽祥、李晓鸣分别参与第3、4、7章的编写。

本书承蒙东华大学信息学院曾培峰副教授仔细审阅,提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢。书中错漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者 2004年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 通信与通信系统	1
1.1.1 通信系统的基本组成	1
1.1.2 模拟通信系统	2
1.1.3 数字通信系统	4
复习与讨论题	5
1.2 无线电波段的划分和无线电波的传播	6
1.2.1 无线电波段的划分	6
1.2.2 无线电波的传播	7
复习与讨论题	8
1.3 非线性电子线路的基本概念	8
1.3.1 线性与非线性电路	8
1.3.2 非线性电路的基本特点	9
复习与讨论题	11
1.4 本课程的主要内容及特点	11
本章小结	11
第 2 章 小信号选频放大器	13
2.1 谐振回路	13
2.1.1 并联谐振回路的选频特性	13
2.1.2 阻抗变换电路	18
复习与讨论题	23
2.2 小信号谐振放大器	23
2.2.1 晶体管的 Y 参数等效电路	23
2.2.2 单调谐回路谐振放大器	25
2.2.3 多级单谐振回路谐振放大器	29
2.2.4 调谐放大器的稳定性	30
复习与讨论题	32
2.3 集中选频放大器	33
2.3.1 集中选频滤波器	33
2.3.2 集中选频放大器应用举例	35
复习与讨论题	36
2.4 放大器的噪声	37
2.4.1 噪声的来源	37

2.4.2 噪声系数	39
复习与讨论题	40
本章小结	40
习题	41
第3章 高频功率放大器	43
3.1 谐振功率放大器的工作原理	43
3.1.1 基本工作原理	43
3.1.2 余弦电流脉冲的分解	45
3.1.3 输出功率与效率	47
复习与讨论题	49
3.2 谐振功率放大器的特性分析	49
3.2.1 谐振功率放大器的工作状态与负载特性	49
3.2.2 V_{CC} 对放大器工作状态的影响	52
3.2.3 U_{in} 和 V_{BB} 对放大器工作状态的影响	53
复习与讨论题	54
3.3 谐振功率放大器电路	55
3.3.1 直流馈电电路	55
3.3.2 滤波匹配网络	57
3.3.3 谐振功率放大器电路举例	62
复习与讨论题	63
3.4 丁类谐振功率放大器	63
3.5 集成高频功率放大器及其应用简介	66
3.6 宽带高频功率放大器	67
3.6.1 传输线变压器	68
3.6.2 功率合成技术	71
3.6.3 宽带高频功率放大器电路	75
复习与讨论题	76
本章小结	76
习题	77
第4章 正弦波振荡器	81
4.1 反馈振荡器的工作原理	81
4.1.1 反馈振荡器产生振荡的基本原理	81
4.1.2 振荡的平衡条件和起振条件	82
4.1.3 振荡的稳定条件	87
复习与讨论题	88
4.2 LC正弦波振荡器	89
4.2.1 三点式振荡器的基本工作原理	89
4.2.2 电感三点式振荡器	90

021	4.2.3 电容三点式振荡器	91
021	4.2.4 改进型电容三点式振荡器	94
021	4.2.5 集成 LC 正弦波振荡器	97
021	复习与讨论题	100
021	4.3 振荡器的频率和振幅稳定度	100
021	4.3.1 频率稳定度	100
021	4.3.2 振幅稳定度	102
001	复习与讨论题	103
061	4.4 石英晶体振荡器	103
051	4.4.1 石英谐振器及其特性	103
151	4.4.2 石英晶体振荡器	106
151	复习与讨论题	108
051	4.5 RC 正弦波振荡器	108
251	4.5.1 RC 桥式振荡器	108
351	4.5.2 RC 移相振荡器	111
051	复习与讨论题	112
001	4.6 负阻正弦波振荡器	112
131	4.6.1 负阻器件的伏安特性	112
021	4.6.2 负阻振荡电路	114
021	复习与讨论题	115
021	4.7 特殊振荡现象	115
001	4.7.1 寄生振荡	115
101	4.7.2 间歇振荡	116
001	4.7.3 频率占据现象	117
001	复习与讨论题	118
001	本章小结	118
001	习题	119
	第 5 章 振幅调制、解调与混频电路	126
010	5.1 振幅调制的基本原理	126
010	5.1.1 普通调幅波	126
010	5.1.2 抑制载波的双边带和单边带调幅信号	131
010	5.1.3 调幅电路组成模型	132
010	复习与讨论题	133
110	5.2 相乘器电路	134
050	5.2.1 非线性器件的相乘作用	134
050	5.2.2 二极管双平衡相乘器	139
050	5.2.3 双差分对模拟相乘器	144
050	复习与讨论题	150

149	5.3 振幅调制电路	150
149	5.3.1 概述	150
150	5.3.2 低电平调幅电路	151
150	5.3.3 高电平调幅电路	156
150	复习与讨论题	158
150	5.4 振幅检波电路	158
150	5.4.1 振幅解调的基本原理	158
150	5.4.2 二极管包络检波电路	160
150	5.4.3 同步检波电路	167
150	复习与讨论题	170
150	5.5 混频电路	171
150	5.5.1 混频的基本原理	171
150	5.5.2 二极管环形混频器和双差分对混频器	173
150	5.5.3 晶体管混频电路	175
150	5.5.4 混频干扰	177
150	复习与讨论题	179
150	本章小结	180
150	习题	181
	第 6 章 角度调制与解调电路	188
150	6.1 调角信号的基本特性	188
150	6.1.1 瞬时角频率与瞬时相位	188
150	6.1.2 调频信号与调相信号的数学表示式	189
150	6.1.3 调角信号的频谱和带宽	194
150	复习与讨论题	198
150	6.2 调频电路	198
150	6.2.1 调频的实现方法与主要性能指标	198
150	6.2.2 变容二极管直接调频电路	200
150	6.2.3 间接调频电路	205
150	6.2.4 扩展最大频偏的方法	212
150	复习与讨论题	213
150	6.3 鉴频电路	213
150	6.3.1 鉴频的实现方法与主要性能指标	213
150	6.3.2 斜率鉴频器	217
150	6.3.3 相位鉴频器	221
150	6.3.4 限幅器	229
150	复习与讨论题	232
150	本章小结	232
150	习题	233

第 7 章 反馈控制电路	238
7.1 自动增益控制电路	238
7.1.1 自动增益控制电路的作用	238
7.1.2 增益控制电路	241
复习与讨论题	242
7.2 自动频率控制电路	242
7.2.1 工作原理	242
7.2.2 应用举例	243
复习与讨论题	244
7.3 锁相环路(PLL)	244
7.3.1 锁相环路基本原理	245
7.3.2 锁相环路的数学模型	245
7.3.3 锁相环路的捕捉与跟踪	250
7.3.4 集成锁相环路	251
7.3.5 锁相环路的应用	255
复习与讨论题	258
7.4 频率合成器	258
7.4.1 频率合成器的主要技术指标	258
7.4.2 锁相频率合成器	260
7.4.3 直接数字频率合成器(DDS)	266
复习与讨论题	267
本章小结	267
习题	268
部分习题答案	271
参考文献	274

第 1 章 绪 论

引言 自从无线电技术问世以来,它对社会生产和人类生活产生了非常深刻的影响。随着科学技术的不断发展,无线电技术,或者更广义地说无线电电子学已广泛应用于国民经济、军事和人们日常生活各个领域,技术水平也越来越高。

通信是无线电技术最早应用的方面。通信技术的发展和现代化充分反映了无线电技术的发展。下面先对通信系统作简要的介绍,然后讨论非线性电子线路的基本概念。

1.1 通信与通信系统

1.1.1 通信系统的基本组成

通信的一般含义是从发送者到接收者之间信息的传递。用电信号(或光信号)传输信息的系统称为通信系统,也称电信系统。

通信系统基本组成如图 1.1.1 所示。它由输入、输出变换器,发送、接收设备和信道等组成。

信源就是信息的来源,它有不同形式,例如语言、音乐、文字、图像、电码等。输入变换器的作用是将信源输入的信息变换成电信号,称该信号为基带信号;不同的信源需要不同的变换器,例如话筒、摄像机、电话机等。

发送设备用来将基带信号进行某种处理并以足够的功率送入信道,以实现信号有效的传输,其中最主要的处理为调制,发送设备的输出信号为已调信号。

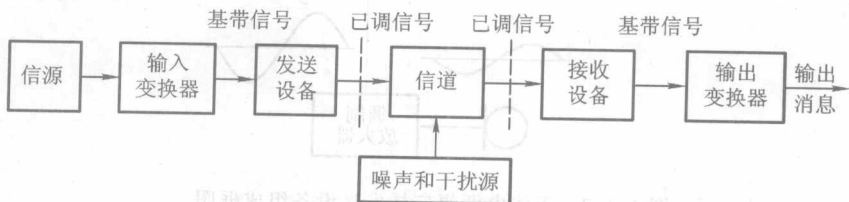


图 1.1.1 通信系统基本组成

信道是信号传输的通道,又称传输媒介,它大体分为无线信道和有线信道两大类。无线信道包括地球表面、地下、水下、地球大气层及宇宙空间;有线信道包

括架空明线、同轴电缆、光缆等。不同的信道有不同的传输特性,相同的媒介对不同频率的信号传输特性也是不相同的。

噪声和干扰源集中表示了信道中的噪声和干扰,以及分散在通信系统中其他各处的噪声。由于它们的存在,使接收端信号与发送端信号之间存在一定的误差。

接收设备及输出变换器和发送设备及输入变换器的作用相反。由信道传送过来的已调信号由接收设备取出并进行处理,得到与发送端相对应的基带信号(这一过程称为解调)。该基带信号经输出变换器即可复原成原来形式的信息。

通信系统的种类很多,按所用信道的不同可分为有线通信系统和无线通信系统。按传输的基带信号不同可分为模拟通信系统和数字通信系统,前者传输幅度随时间连续变化的信号,而后者传输在时间和数值上离散取值的信号。

1.1.2 模拟通信系统

直接传输模拟信号的通信系统称为模拟通信系统。在图 1.1.1 中,基带信号为模拟信号时,它就是典型的模拟通信系统框图。为了进一步说明模拟通信的发送和接收系统,下面以无线电广播系统为例来讨论。

图 1.1.2 所示为无线电调幅广播发送设备的组成框图,图中还画出了各部分输出电压的波形。

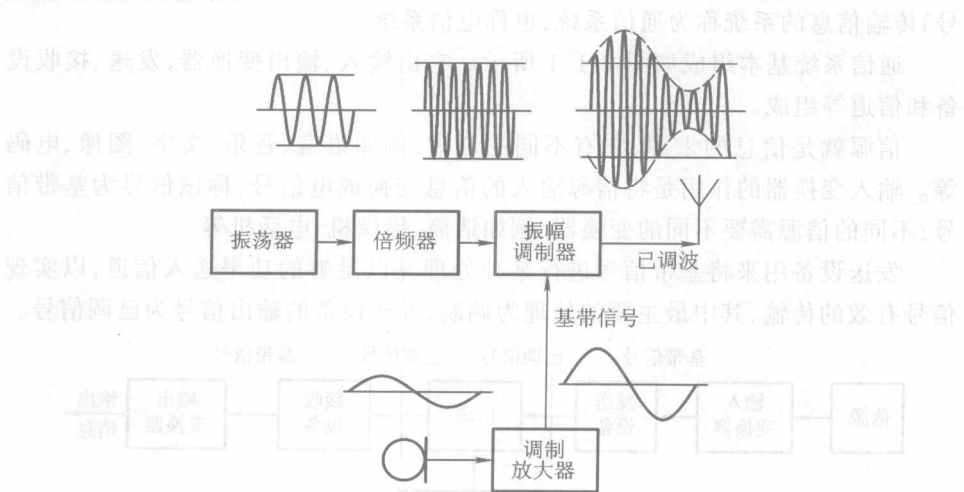


图 1.1.2 无线电调幅广播发送设备组成框图

振荡器用来产生高频信号。倍频器可将振荡器产生的高频信号频率整数倍升高到所需值,其输出为载波频率信号。在倍频器后通常还可设置高频功率放大器,用来放大载波信号,使之有足够的功率推动末级调制器。调制放大器实际

上是低频放大器,它由低频电压和功率放大级组成,用来放大话筒所产生的微弱话音信号,然后送入调制器。振幅调制器是将输入的高频载波信号和低频调制信号变换为高频已调信号,并以足够大的功率输送到天线,然后辐射到空间。

无线电调幅广播接收设备的组成框图如图 1.1.3 所示。为了提高接收机的性能,目前广泛采用超外差接收方式,超外差接收机的结构特点是具有混频器。图 1.1.3 中高频放大器用来对天线所收到的有用频率信号进行初步的选择和放大,以便抑制其他频率的无用信号。高频放大器输出的载频为 f_c 的已调信号和本机振荡器所提供的频率为 f_L 的高频等幅信号同时输入混频器,在其输出端就可获得载频频率较低的中频已调信号,通常取中频频率 $f_1 = f_L - f_c$ 。中频放大器为中心频率固定在 f_1 上的选频放大器,它可以进一步滤除无用信号,并将有用信号放大到足够值,然后经检波器解调,可恢复出原基带信号,经低频放大后输出。为了有助于理解各组成部分的作用,在图 1.1.3 中画出了各部分输出的电压波形。

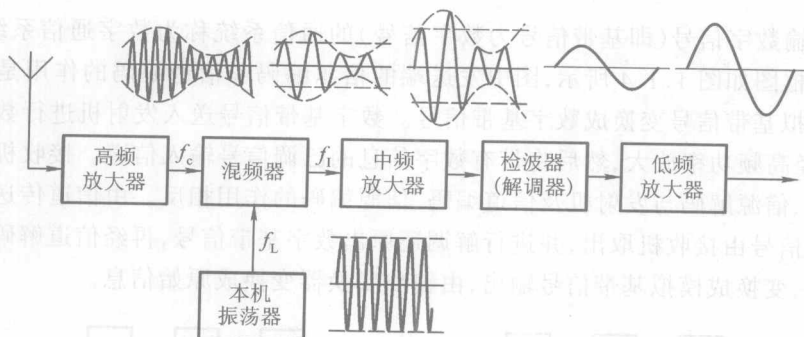


图 1.1.3 超外差式调幅接收机组成框图

由以上讨论可以看出,发送和接收设备中除了低频放大电路外,其他主要是处理高频信号的电路,它包括能对高频信号进行选频放大的高频电压和功率放大器,能产生高频信号的振荡器,能对基带信号进行变换和处理的调制器、解调器、混频器和倍频器等,这些都是本书要讨论的主要内容。其中,除高频电压放大器(含中频放大器)是线性电子线路外,其他均属于非线性电子线路。一般说来,线性电路输出信号与输入信号的波形和频率相同,只是幅度发生了变化;非线性电路输出信号与输入信号相比较,波形和频率分量都不相同。

调制过程对通信系统至关重要,因为调制方式在很大程度上决定了系统可能达到的性能。

在无线电通信系统中,电信号是通过天线以电磁波的形式向空间辐射传输的。理论和实践证明,只有当电信号的频率很高,以致它的波长与天线的尺寸相

近时(例如发射天线的尺寸至少应该是发射信号波长的 $1/10$),电信号才能有效辐射传输。一般基带信号频率很低,例如话音只有 $0.1\sim 6\text{ kHz}$,假如是 1 kHz ,则其波长为 300 km ,需用 30 km 长的天线,这显然是无法实现的。采用调制就可以把低频基带信号调制在高频载波信号上,从而易于实现电信号的有效传输。同时,不同电台可以采用不同频带的高频电磁波,以避免相互之间的干扰。在频率域内实现信道的复用称为频率复用(同时,在时间域里,利用脉冲调制或编码调制可使各路信号在同一信道交错传输,这样的信道复用称为时间复用)。

用待传输的基带信号去改变高频载波信号的某一参量,就可以实现调制。如用基带信号去改变高频载波信号的振幅,则称为振幅调制,简称调幅,用符号AM表示。如用基带信号去改变高频载波信号的频率或相位,则称为频率调制(简称调频,用符号FM表示)或相位调制(简称调相,用符号PM表示)。经过调制后的高频信号带有基带信号的信息,称为已调信号。

1.1.3 数字通信系统

传输数字信号(即基带信号为数字信号)的通信系统称为数字通信系统,它的组成框图如图1.1.4所示,图中发送端的信源编码和信道编码的作用是把输入的模拟基带信号变换成数字基带信号。数字基带信号送入发射机进行数字调制,并经高频功率放大,然后将带有数字信息的已调信号输入信道。接收机及信道解码、信源解码与发射机及信道编码、信源编码的作用相反。由信道传送过来的已调信号由接收机取出,并进行解调还原出数字基带信号,再经信道解码和信源解码,变换成模拟基带信号输出,由输出变换器变换成原始信息。



图 1.1.4 数字通信系统组成框图

用数字基带信号对高频正弦载波进行的调制称为数字调制。根据基带信号控制载波的参数不同,数字调制通常分为振幅键控(ASK)、相位键控(PSK)和频率键控(FSK)三种基本形式。它们的调制波形分别示于图1.1.5中。图1.1.5(a)为载波信号,图1.1.5(b)为数字基带信号。振幅键控是载波振幅受基带信号控制,基带为高电平时有高频载波输出,低电平时没有载波输出,其波形如图1.1.5(c)所示;相位键控是载波的相位受基带信号控制,当基带信号为高电平时,载波起始相位为 0 (或为 π),低电平时,载波起始相位为 π (或为 0),其波形如图1.1.5(d)所示;频率键控是载波频率受基带信号控制,高电平时频率为 f_1 ,低

电平时为 f_2 , 其波形如图 1.1.5(e) 所示。

由于数字信号通过再生中继技术可以消除噪声的积累, 并能及时发现和纠正信号传输中因干扰而产生的差错, 所以数字通信具有很强的抗干扰、抗噪声能力, 同时数字通信便于与计算机接口进行处理, 使通信系统更加通用和灵活, 所以数字通信已成为今后现代通信技术的发展方向。

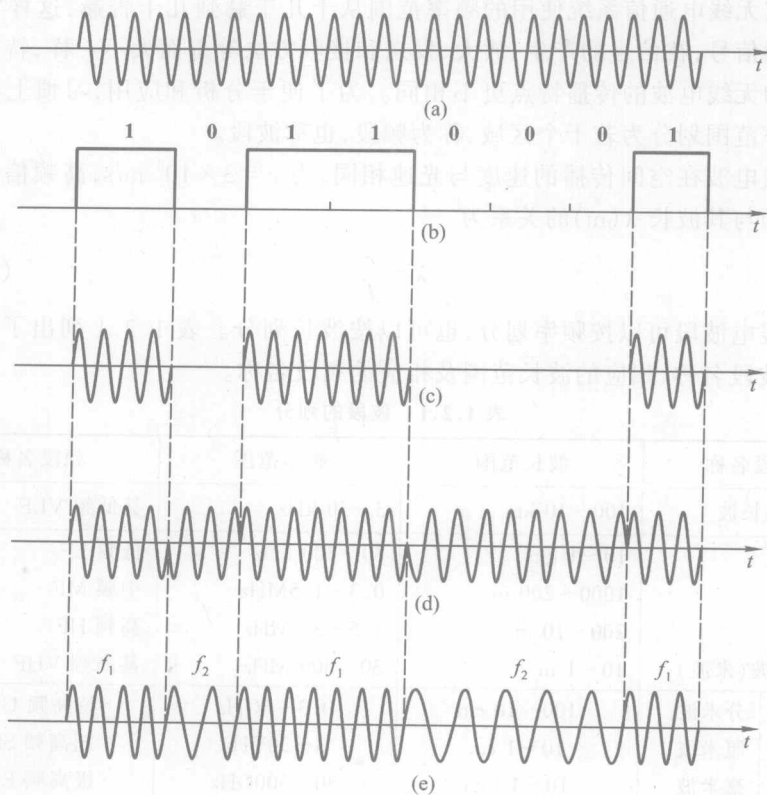


图 1.1.5 数字调制波形

(a) 载波信号 (b) 数字基带信号 (c) ASK 波形 (d) PSK 波形 (e) FSK 波形

复习与讨论题

- 1.1.1 何谓通信系统? 通信系统由哪些部分组成? 各组成部分的作用是什么?
- 1.1.2 无线电调幅广播发送和接收设备由哪些主要部分组成? 各组成部分的作用是什么?
- 1.1.3 通信系统中为什么要采用调制技术?
- 1.1.4 说明数字通信系统组成的特点。