



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校电子、信息类教材

通信电路与系统

Communication Circuits and Systems (2nd Edition)

(第 2 版)

主编 罗伟雄

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

责任编辑：钟 博
封面设计：庚辰年代

内 容 简 介

本书由通信电子线路和通信原理两门课程的教材内容综合而成，包含通信电子线路的全部内容和通信原理的基本内容。

全书共分十章，内容包括：通信概论、谐振功率放大、振荡电路、幅度调制与解调、混频电路、角度调制与解调、锁相环路及其应用、通信系统设计、模拟信号数字化、数字基带与频带系统。本书内容丰富、通俗易懂、概念清楚，每章均有习题，有利于教学和自学。

本书可作为高校信息工程与其他相关专业的本科生教材，也可供从事通信工程的专业人员和其他科研人员参考。

定价：32.00 元

ISBN 978-7-81045-586-2



9 787810 455862 >

7N 0.
8-2

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校电子、信息类教材

通信电路与系统

(第2版)

主 编 罗伟雄



GD 01141469

 **北京理工大学出版社**

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书由通信电子线路和通信原理两门课程的教材内容综合而成,包含通信电子线路的全部内容和通信原理的基本内容。

全书共分十章,内容包括:通信概论、谐振功率放大、振荡电路、幅度调制与解调、混频电路、角度调制与解调、锁相环路及其应用、通信系统设计、模拟信号数字化、数字基带与频带系统。本书内容丰富、通俗易懂、概念清楚,每章均有习题,有利于教学和自学。

本书可作为高校信息工程与其他相关专业的本科生教材,也可供从事通信工程的专业人员和其他科研人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

通信电路与系统/罗伟雄主编. —2版. —北京:北京理工大学出版社, 2007.9

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高等院校电子、信息类教材
ISBN 978-7-81045-586-2

I. 通… II. 罗… III. 通信系统-电子电路-高等学校-教材 IV. TN91

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第125431号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京国马印刷厂

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/20

字 数/452千字

版 次/2007年9月第2版 2007年9月第4次印刷

印 数/9501~13500册

定 价/32.00元

责任校对/张 宏

责任印制/李绍英

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

通信技术日新月异的发展及其成果的应用已经极大地影响着人类社会生活的方方面面，它对提高生产效率，改善人们的生活质量起到了巨大的推动作用，它和计算机同为实现信息化社会的重要技术手段。

“非线性电子线路”或“高频电子线路”是通信，电子信息工程专业本科生重要的技术基础课程之一。在该课程的传统教学中，主要讲授应用于通信、雷达、遥控遥测技术领域的单元功能电路，内容仅限于模拟电路，系统概念相对淡化；“通信原理”是通信专业本科生的必修专业课程。它以前续技术基础课为依托，较为全面地介绍通信原理和一定的通信系统知识，但不涉及系统内部的电路知识。实际上这两门课程有些内容是相互重复的。另外，随着通信技术和计算机技术的发展，有很多专业的学生需要通信的基本知识。有不少学校将“通信原理”课程由专业课变成了专业基础课。在这样的形势下，我们于1999年将原有的“通信原理”与“通信电子线路”两门课合并，变成了“通信原理与电路”。在几年的教学实际中取得了预期的效果。

这本教材是在原有《通信原理与电路》的基础上修订而成的。主要的修订之处包括：增加了通信系统设计的内容，主要讲述噪声、噪声传媒、噪声温度、接收机灵敏度、AGC、AFC等内容，同时在各章节增加了一些内容，如DDFS部分，故本书更名为《通信电路与系统》。

本书在编写时注意吸收了当前国内外相关优秀教材内容，努力反映现代通信技术的发展和多年来教学和科研实践中积累的经验。本书在编写上力求深入浅出，通俗易懂，以适合电子信息类各专业本科生对通信技术基础知识的学习要求。全书共分十章，第一章概括了通信的基本概念、通信系统的构成，通信方式和信道特征；第二章讲述通信系统中高频谐振功率放大的内容；第三章讲述振荡电路与正弦波产生等内容；第四章讲述幅度调制解调及混频电路；第五章讲述角度调制与解调的内容；第六章讲述锁相环路及其应用；第七章讲述模拟通信系统设计；第八章讲述模拟信号数字化、PCM调制与增量调制的内容；第九章讲述数字基带传输系统；第十章讲述数字基带调制解调原理。本书适合64学时左右的课程教学。

本书在编写过程中，韩力教授在内容的增减、教材结构和内容方面提出了很多宝贵意见；中北大学王高老师编写了第四、五章。

目 录

第一章 通信概论	(1)
§ 1.1 概述	(1)
§ 1.2 通信和通信系统	(1)
§ 1.3 模拟和数字通信系统	(2)
§ 1.4 通信方式和主要传输方式的现状及发展趋势	(7)
§ 1.5 信息及其度量	(8)
§ 1.6 信道	(10)
§ 1.7 通信系统的主要质量指标	(20)
习题	(21)
参考文献	(22)
第二章 谐振功率放大	(23)
§ 2.1 概述	(23)
§ 2.2 非线性电路及其分析方法	(24)
§ 2.3 并联谐振回路	(27)
§ 2.4 谐振功率放大器的基本工作原理	(31)
§ 2.5 谐振功率放大器的动态特性	(35)
§ 2.6 谐振功率放大器的设计原则	(40)
附录 2.1 宽频带的功率合成	(46)
附录 2.2 余弦脉冲系数表	(50)
附录 2.3 匹配网络的计算公式与条件	(51)
习题	(53)
第三章 振荡电路	(56)
§ 3.1 LC 正弦波振荡器	(57)
§ 3.2 LC 正弦振荡电路的频率稳定性	(65)
§ 3.3 石英晶体振荡器	(71)
§ 3.4 RC 正弦波振荡器	(75)
习题	(78)
参考文献	(80)
第四章 幅度调制, 解调和混频电路	(81)
§ 4.1 概述	(81)
§ 4.2 幅度调制原理	(81)

§ 4.3 调幅电路	(87)
§ 4.4 幅度解调电路	(97)
§ 4.5 混频电路	(105)
习题	(117)
第五章 角度调制原理	(123)
§ 5.1 调角波的时域表达式	(123)
§ 5.2 调角波的频谱结构和带宽	(125)
§ 5.3 调频与调幅的比较	(128)
§ 5.4 调频与调相的比较	(129)
§ 5.5 调频电路	(130)
§ 5.6 相位检波电路	(136)
§ 5.7 频率检波电路	(140)
习题	(149)
参考文献	(151)
第六章 锁相环路	(152)
§ 6.1 锁相环路的线性分析	(153)
§ 6.2 锁相环路的非线性分析	(166)
§ 6.3 集成锁相环	(171)
§ 6.4 锁相环路的应用	(177)
习题	(190)
参考文献	(191)
第七章 模拟通信系统设计	(192)
§ 7.1 调幅与调频系统的抗噪声性能	(192)
§ 7.2 接收机中的干扰与噪声	(203)
§ 7.3 自动增益控制与自动频率细调	(213)
附录 7.1 各种模拟调制系统的对比	(219)
附录 7.2 预加重/去加重对信噪比的改善值	(220)
习题	(221)
第八章 模拟信号数字化	(223)
§ 8.1 抽样定理	(223)
§ 8.2 量化理论	(228)
§ 8.3 PCM 编码原理	(235)
§ 8.4 增量调制 (ΔM 或 DM)	(245)
习题	(253)
参考文献	(255)

第九章 数字基带传输系统	(256)
§ 9.1 引言	(256)
§ 9.2 数字基带信号的码型	(256)
§ 9.3 数字基带信号的功率谱	(261)
§ 9.4 基带脉冲传输和码间干扰	(262)
§ 9.5 无码间干扰的基带传输特性	(264)
§ 9.6 无码间干扰基带系统的抗噪声性能	(266)
§ 9.7 眼图	(269)
§ 9.8 均衡	(270)
习题	(273)
参考文献	(275)
附录 9.1 数字基带信号功率谱密度计算	(276)
附录 9.2 部分响应基带传输系统	(279)
附录 9.3 误差函数	(283)
第十章 数字频带调制	(285)
§ 10.1 概述	(285)
§ 10.2 二进制数字频带调制	(285)
§ 10.3 二进制键控信号的误比特率	(292)
§ 10.4 二进制数字调制系统的性能比较	(299)
§ 10.5 多进制数字频带调制	(300)
习题	(308)
参考文献	(309)

第一章 通信概论

§ 1.1 概 述

通信的任务是传递和交换信息。人类社会是建立在信息交流基础上的，通信是推动人类社会文明、进步与发展的巨大动力。随着生产力和科学技术的发展，人们对于通信的要求也就越来越高，从传递和交换的信息来说，当今社会的信息包含语言、音乐、文字、符号、图像和数据等。从传输信息的速度来说，要求传输速率越来越高，传输距离也越来越远。现代通信和计算机已经而且必将更加有机地结合起来，形成各种通信网络，并将各种网络综合形成各种信息服务的综合通信网络。

通信与经济发展密切相关。通信系统已经成为现代经济的重要基础产业。可以说没有通信事业的发展就没有经济的高速发展，因此，通信产业已成为我国经济建设的基础产业。

本章主要讨论通信系统的组成和分类，使读者对通信的基本概念和一些必要的术语有一个初步了解。

§ 1.2 通信和通信系统

通信是将信息从发送端传输到异地的接收端。现代通信系统的典型框图如图 1-1 所示。首先将所要传送的语言、音乐、符号、图像或数据等信息通过输入变换器（它可以是受话器、拾音器和电视摄像机等）转换成相应的电信号，这种电信号称为基带信号。

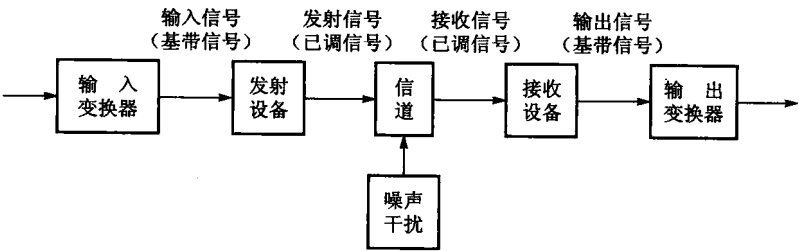


图 1-1 通信系统典型框图

发射机将基带信号进行某种变换送入信道，以便使基带信号在信道中进行有效的传输，这一变换过程称为调制，变换后的信号称为已调信号或频带信号。发射机主要由载波产生器、调制器和必要的功率放大器与天线组成，如图 1-2 所示。

信道是传播带有信息的电信号的媒质，它可

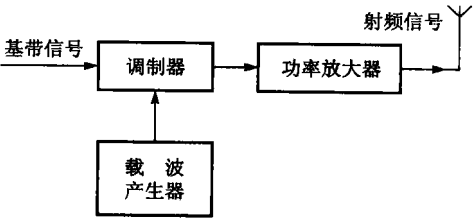


图 1-2 发射机组成框图

以是电线、电缆、波导、光导纤维或无线电信道。无线电信道是指携带信息的电信号在空间传播的通道。由于无线电波在空间传播的性能和大气结构、高空电离层结构、大地的衰减以及无线电波的频率、传播路径等密切相关，因此不同频段的无线电波的传播路径及其受上述各种因素的影响也不同，无线电波频段的划分如表 1-1 所示。

表 1-1 无线电波频段的划分

波段名称（传播方式）		波长范围	频率范围	频段名称	主要用途
地表波	长波 中波	3 000 m ~ 30 000 m 200 m ~ 3 000 m	10 kHz ~ 100 kHz 100 kHz ~ 1 500 kHz	低频 LF 中频 MF	电报 广播
地表波 电离层	短波 中短波 短波	50 m ~ 200 m 10 m ~ 50 m	1 500 kHz ~ 6 000 kHz 6 MHz ~ 30 MHz	中高频 IF 高频 HF	电报，广播 电报，广播
视距波	超短波 米波 分米波	1 m ~ 10 m 10 cm ~ 100 cm	30 MHz ~ 300 MHz 300 MHz ~ 3 000 MHz	甚高频 VHF 特高频 UHF	通信，电视，导航 电视、雷达、导航
	微波 厘米波 毫米波	1 cm ~ 10 cm 1 mm ~ 10 mm	3 GHz ~ 30 GHz 30 GHz ~ 300 GHz	超高频 SHF 极高频 EHF	中继通信、 卫星通信、 雷达，导航等
光波	激光	$<3 \times 10^{-4} \text{ m}$	$>10^3 \text{ GHz}$		通信

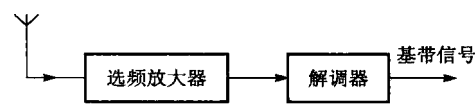


图 1-3 接收机组成框图

接收机的功能与发射机相反，它从信道中取出已调信号后进行处理，恢复出发送端相应的基带信号，这一过程称为解调。接收机主要由接收天线（无线传播时）、选频放大器和解调器组成，

其框图如图 1-3 所示。

图 1-1 中用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，使得接收端信号与发射端信号之间产生误差。有关这部分内容将在后面章节中详细叙述。

§ 1.3 模拟和数字通信系统

1.3.1 模拟和数字信号

虽然通信所要传输的信息形式是多种多样的，但是它们都可以归纳为两大类：离散信息和连续信息。在连续时间内，信息状态是可数的且时域上不连续的，称为离散信息，例如符号、文字、数据等。在连续时间内，信息状态是连续的且时域上连续的，称为连续信息，例如强弱连续变化的声音，亮度连续变化的图像等。

当信息通过输入变换器转换成相应的电信号后,若电信号的参量(如幅度、频率和相位等)的变化在时间上是离散的,而且取值也是离散的,则该电信号称为数字信号。若电信号的参量在时间上是连续的,而且其取值也是连续的,则电信号称为模拟信号。

按照信道中所传输的信号性质不同,通信系统可分为模拟通信系统和数字通信系统两大类。

需要指出,模拟信号不限于仅在模拟通信系统中传输,利用模/数(A/D)转换技术,将模拟信号先转换成数字信号再送入数字通信系统中进行传输,然后在接收端利用数/模(D/A)转换技术恢复成模拟信号。采用这种方式是由于数字通信和模拟通信相比,前者有很多优点。首先,数字通信的抗干扰能力强,尤其在中继通信中,数字信号可以利用再生技术来消除传输过程中积累的噪声,还可以利用纠错码技术来纠正传输中产生的差错,提高通信的可靠性;其次,数字信号易于加密,其保密性强。第三,数字信号便于计算机对数字信息进行处理。基于上述原因,目前有以数字通信代替模拟通信的趋势。另一方面,考虑到目前的通信设备大多数是模拟通信系统,为了充分利用现有设备,可在模拟通信系统中加入调制解调器(Modem),就可利用现有的模拟通信系统传输数字信号,例如用模拟电话系统传输数字信号。

1.3.2 模拟信号的传输

一、调制的必要性

在无线通信系统中,往往将包含要传输信息的电信号,经过调制后再传输,然后在接收端进行解调来提取信息。调制的过程就是用基带信号去改变高频信号某个参量的过程。由于发射的已调高频信号带有基带信号的信息,而高频信号本身有运载信息的工具,因此该高频信号称为载波,相应的频率称为载频。在接收端则必须将已调高频信号进行反变换,以恢复发送端欲传送的基带信号,这一反变换过程称为解调。

基带信号必须调制到高频载波上再送入信道的原因有:

(1) 高频已调信号易于辐射。为了使电磁能量有效地向空间辐射,通常发射天线的尺寸至少应该是发射信号波长的 $1/10$,而对于大多数基带信号来说,其波长很长,以致天线尺寸大到难以实现的地步。例如语音信号频率范围是 $300\text{ Hz} \sim 3\,000\text{ Hz}$,其相对应的波长为 $100\text{ km} \sim 1\,000\text{ km}$,而制作一个 $10\text{ km} \sim 100\text{ km}$ 长的天线是不现实的。但是当基带信号调制到较高的载频上后,由于载频的波长较短,因此发射天线易于实现。

(2) 便于同时传输多路不同的基带信号。若有若干个用户需使用电话线路,由于语音信号的频谱所占据的频带是相同的,所以如果不对基带信号(语音信号)进行调制处理,这些用户是无法同时通话的,否则这些基带信号之间将相互干扰。若将不同的基带信号调制到不同的载频上,只要这些载频的间隔足够大,使已调信号的频谱不重叠,就不会产生相互干扰。在接收端只要用不同中心频率的带通滤波器就可以得到所需的基带信号。

二、模拟调制的分类

对于模拟信号的调制处理称为模拟调制,按载波形式的不同,模拟调制可分为正弦波调制和脉冲调制两大类。

模拟正弦波调制的载波是正弦波。根据基带信号控制的正弦波参量——幅度、频率和相位的不同，又可分为幅度调制（AM）、频率调制（FM）和相位调制（PM）。图 1-4 给出了正弦波调制中调幅波和调频波的示意图。这时基带信号（或称为调制信号）为正弦波，它们分别表示了载波的幅度和频率随基带信号作线性变化。

模拟脉冲调制的载波是脉冲序列。根据基带信号所控制的脉冲序列参量——幅度、宽度和位置的不同，又可分为脉冲幅度调制（PAM）、脉宽调制（PWM），PWM 有时也称为脉冲持续时间调制（PDM）和脉位调制（PPM），PAM、PWM 和 PPM 分别是脉冲幅度、宽度（持续时间）和脉冲位置随基带信号做线性变化。它们的波形示意图如图 1-5（c）、（d）、（e）所示。图 1-5（a）（b）分别表示载波和基带信号的波形。

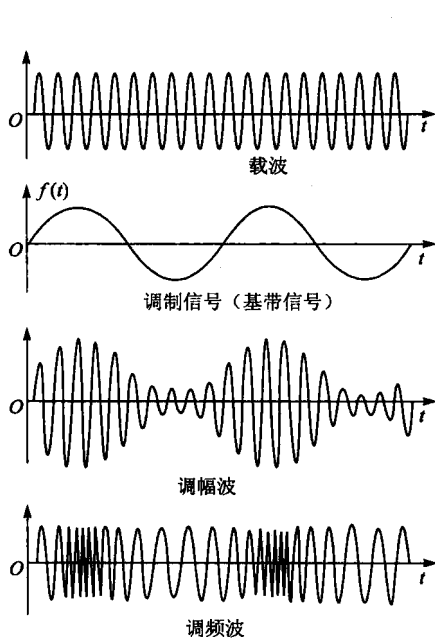


图 1-4 模拟正弦波调制的示意图

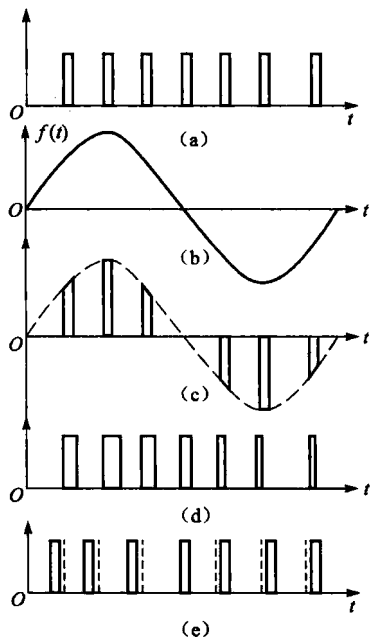


图 1-5 模拟脉冲调制波形示意图

三、频分复用的多路传输

通信系统中，为了在同一信道中同时传输多个不同的基带信号，常常将各个不同的基带信号调制到不同的载波频率上。例如各个广播电台采用不同的载波频率。基带信号调制的类型可以不相同，但载波的频率间隔必须足够大，使各个已调信号的频谱之间有一定间隔，这个间隔为防护频带。它既可避免已调信号频谱间的相互干扰，同时也便于接收端将不同的基带信号分离出来。如我国的调幅广播电台的载频间隔就不能小于 9 kHz，图 1-6 给出了频分复

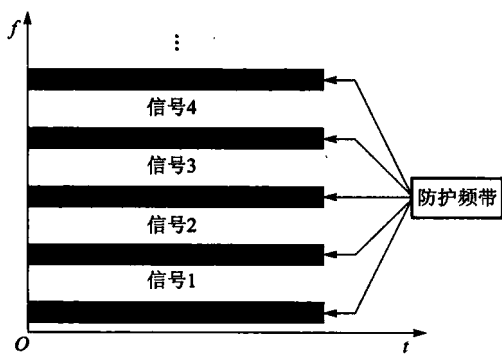


图 1-6 频分复用的通信空间示意图

用 (Frequency-division multiplexing, FDM) 通信空间的示意图。由图看出频分复用系统中的每个信号在频域中占据着有限的不同频率区间, 但每个信号在时域中同时占有信道, 并且是混杂的。

若要用同一载波同时传输多个不同的基带信号, 则必须采用二次调制方式。即先将各基带信号调制到较低的不同载频上, 这一过程称为一次调制或称基带调制, 它们的载波称为副载波。然后将这些已调的调制波相加在一起, 便得到一个组合信号, 将这个组合信号再调制到高频载波上, 以便发射。采用模拟脉冲调制方式的频分复用系统往往采用二次调制方式, 图 1-7 (a)、(b) 分别表示频分复用多路传输的发射和接收框图。

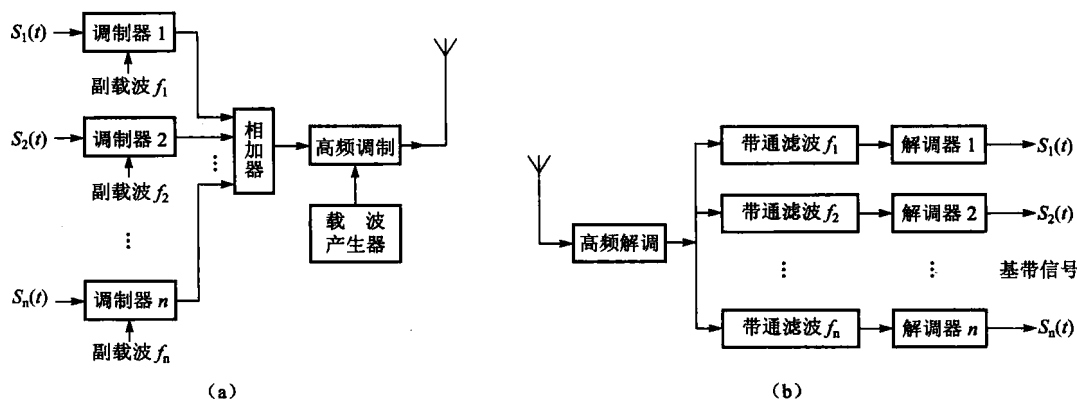


图 1-7 频分复用系统框图

(a) 发射系统; (b) 接收系统

1.3.3 数字信号的传输

一、模拟信号的数字化

正如前面所述, 数字通信系统和模拟通信系统相比, 前者有很多优越性, 因此在很多情况下希望将模拟信号转换成数字信号, 再用数字通信方式进行传输。例如数字移动电话 (一般通俗称为数字大哥大) 就是将语音信号 (模拟信号) 转换成数字信号, 再进行传输的。

取样定理为模拟信号的数字传输奠定了理论基础。该定理指出: 若对一个频带有限的模拟信号进行取样, 当取样频率等于或大于模拟信号最高频率的 2 倍时, 根据这些信号的取样值就可确定并恢复出原信号。这样在传输过程中只需传输离散的取样值, 而不必传输模拟信号本身。对模拟信号取样可用模拟脉冲幅度调制 (PAM) 来实现, 但是更常用的方法是采用脉冲编码调制 (PCM) 和增量调制 (ΔM), 这两种方法将在后面详细叙述。

一般将模拟信号数字化的过程称为模/数 (A/D) 转换。在接收端只要将收到的数字信号进行数/模 (D/A) 转换, 即可恢复出原始模拟信号, 图 1-8 给出了模拟信号数字传输的简单框图。

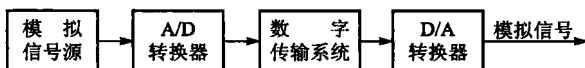


图 1-8 模拟信号的数字传输的简单框图

二、数字调制的分类

由于数字基带信号的频谱大多集中在低频端, 因此它只适合于有线传输, 例如本地电话网和计算机有线局域网。若要进行无线传输或同时传输多个数字信号, 仍必须对数字信号进行调制, 以便在无线信道中采用频分复用 (FDM) 方式进行传输。这种用数字信号对高频正弦型载波进行调制的方法称为数字调制。数字调制也分为三大类。

幅度键控 (Amplitude-Shift Keying, ASK) 或称为通-断键控 (On-Off Keying, OOK): 其载波的幅度受数字基带信号控制, 波形如图 1-9 (c) 所示, 图 1-9 (a)、(b) 分别为载波和数字基带信号。

相位键控 (Phase-Shift Keying, PSK): 其载波的相位受数字基带信号控制。当基带信号为“1”时, 载波起始相位为 0, 当信号为“0”时, 载波起始相应为 π , 其波形如图 1-9 (d) 所示。

频移键控 (Frequency-Shift Keying, FSK): 其载波的频率受数字基带信号控制。当基带信号为“1”时, 载波频率为 f_1 , 而信号为“0”时, 载波频率为 f_2 其波形如图 1-9 (e) 所示。

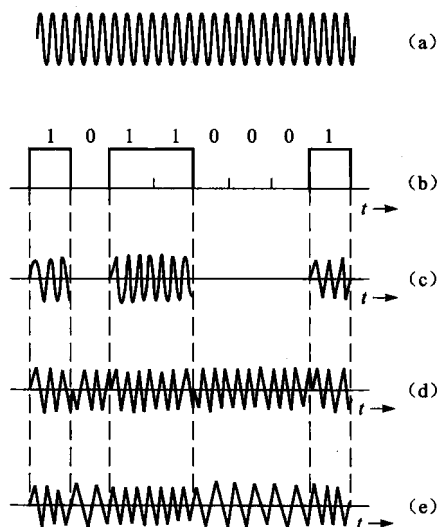


图 1-9 数字调制波形图

三、时分复用多路传输

由于数字基带信号在时间上是离散的, 也就是传输模拟取样信号仅占用信道的部分时间, 这样就有可能在不同的时间区域内, 传输多个不同的数字基带信号。图 1-10 表示两个不同的信号 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 时分复用 (Time-Division Multiplexing, TDM) 示意图, 这两个 PAM 信号的抽样脉冲频率相同, 但在时间上却交替出现。

图 1-11 是时分复用的通信空间示意图, 它与图 1-6 所示的频分复用通信空间相反。在时分复用系统中每个信号占据着不同时间区间, 为了保证各个信号在时域内不重叠并便于接收端分离各路信号, 应设置防护时间, 如图 1-11 所示。

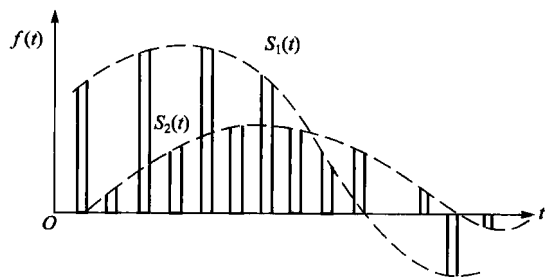


图 1-10 两个 PAM 信号的时间复用

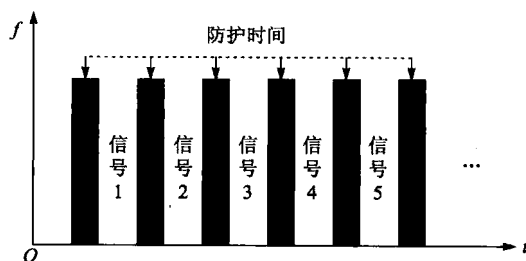


图 1-11 时分复用的通信空间示意图

§ 1.4 通信方式和主要传输方式的现状及发展趋势

1.4.1 通信方式

对于点对点之间的通信,按信息传输的方向与时间关系,通信方式可分为单工通信、半双工通信和全双工通信三种。

所谓单工通信,是指信息只能单方向传输,如图 1-12 (a) 所示。遥测、遥控和无线寻呼系统往往采用这种方式。

所谓半双工通信,是指通信双方均可以收发信息,但双方不能同时发送消息。如图 1-12 (b) 所示。例如采用同一载频的无线通信设备,就按这种通信方式工作。

所谓全双工通信,是指通信双方可以同时发送接收消息的工作方式,如图 1-12 (c) 所示。例如电话就是全双工通信。

在数字通信中,按数字信号传输的排列方式,可分成串行传输和并行传输。

所谓串行传输,是将数字信号按时间顺序一个接一个地在信道中传输。并行传输是指在同一时刻在信道中可传输两个或两个以上的数字信号。一般远距离数字通信均采用串行通信,因为它只需要一条通信线路,对于近距离通信,为了提高传输速率可采用并行通信,这就要有若干个通路。

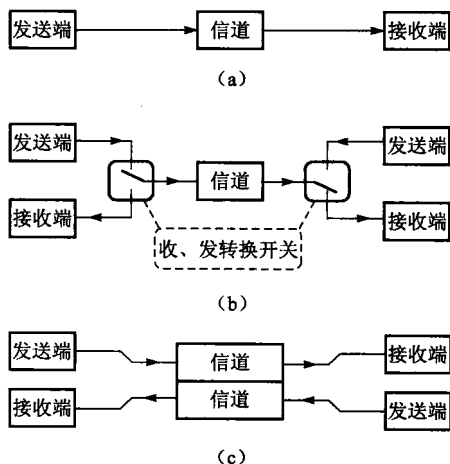


图 1-12 通信方式示意图
(a) 单工方式; (b) 半双工方式; (c) 全双工方式

1.4.2 主要传输方式的现状及发展趋势

一、有线通信

有线通信是最早发展的通信手段,它包含明线、对称电缆、同轴电缆和光纤四种。它们的通信容量均由可通话路数来衡量。对于明线,通话路数一般在 3~12 路,一般用于农村电话通信。对称电缆可通话路数为 60 路左右,一般用于市话通信系统。同轴电缆最高可达 13 200 路,一般用于长途话路通信或有线电视系统。光纤通信是近几年发展起来的通信方式,可望提供极大的通信容量,它具有损耗低、频带宽、线径细、重量轻、耐腐蚀和价格低的优点,因此同轴电缆有逐渐被光纤电缆所替代的趋势。电缆通信中主要采用模拟单边带和频分复用 (SSR/FDM) 方式。

二、无线电视距中继通信

无线电视距中继是指工作频率在超短波和微波波段时,电磁波基本上沿视线传播、通信距离依靠中继方式延伸的无线通信系统。相邻中继站间距离一般为 40 km~50 km。它弥补了有线通信的缺点,可到达电缆无法敷设的地区,且容易架设,建设周期短,投资也低于同

轴电缆，它是长途电话和电视节目的主要传输手段。目前模拟电话微波通信容量每频道可达 6 000 话路，主要采用 SSB/FM/FDM 调制方式。

数字微波通信也已成为微波中继通信的主要发展方向，并且从二进制调制向多进制调制方向发展。采用多电平调制，在 40 MHz 的标准频道间隔内可传送 1 920 ~ 7 680 路脉冲编码调制（PCM）数字电话，赶上并超过模拟通信的容量。

三、卫星中继通信

人造卫星中继信道可看成无线中继信道的一种特殊形式，也就是将中继站架设在卫星上。它的特点是通信距离远、覆盖面积大、不受地形限制、传输容量大、可靠性高。目前卫星通信使用范围已遍及全球，仅国际卫星组织就拥有上百万条话路，80% 的洲际通信业务和 100% 的远距离电视传输业务均采用卫星通信，它已成为国际通信的主要手段。

卫星通信中目前大量使用的是模拟调制及频分多址方式，其发展方向也是数字调制、时分多址（TDMA）和码分多址（CDMA）。卫星通信正在向更高频段发展，并采用多波束和卫星上处理的新技术。

四、移动通信

移动通信是现代通信中发展最快的一种通信手段，它分为公用移动通信系统和专用调度通信系统。随着微电子技术和计算机技术的发展，移动通信已从过去无线对讲和广播方式发展成为一个有线和无线融为一体、固定和移动互联的全国或全球的通信系统。

移动通信的发展方向是数字化、微型化、标准化、个人化。

§ 1.5 信息及其度量

通信的目的是传输信息，因此有必要对“信息”的含义和它的量度进行讨论。信息在概念上与消息相似，消息是以具体信号形式表现出来，而信息则是抽象的、本质的内容。信息可理解为消息中所包含的有意义的内容。消息的出现是随机的、无法预知的。一个预先确知的信号（消息），不会给接收者带来任何信息，因而此消息不包含任何信息量，也就没有必要进行传输。为了衡量通信系统传输信息的能力，需要对被传输的信息进行定量。

对于消息而言，可以分成离散信源和连续信源两种，首先对离散信源的信息量进行定量。

从日常经验可知：消息出现的可能性越小，也就是出现概率越小，则此消息携带的信息量就越大。例如：一般人们早上 8:00 上班，若有人告诉你“明天早上 8:00 上班”，这个消息人们已习以为常，因而这个消息中信息量就很小。但若有人告诉“明天早上 10:00 上班”，这将使人感到意外，这一异常的告知将带给人们更大的信息量。从这个例子可明显地看出信息量与消息出现概率有关。当一个必然事件也就是消息出现概率为 1 时，这消息所包含的信息量为 0。

另外，若消息持续时间越长，则消息包含的信息量也随之增加，也就是说，若干个独立消息之和的信息量应该是每个消息所含信息量的线性叠加，即信息量具有相加性。另一方面，对于有若干个符号组成的离散消息源，随消息长度的增加，其可能出现消息的数目将按指数规律增加。例如，二元离散序列中，由 2 位符号组成的随机序列的消息有 00, 01, 10

和 11 四个, 即 2^2 。而 3 位符号构成的随机序列的消息为 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 和 111 八个, 即 2^3 。

基于上述考虑, 哈特莱首先提出用消息出现概率的对数作为离散消息的信息度量单位, 某离散消息 x_i 所包含的信息量为

$$I(x_i) = \log_a \frac{1}{P(x_i)} = -\log_a P(x_i) \quad (1-1)$$

式中, $P(x_i)$ 为消息 x_i 的出现概率。

信息量单位的确定取决于式 (1-1) 中对数底 a 的确定。若取对数底 $a=2$, 则信息量的单位为比特 (bit); 若取 $a=e$ 为对数的底, 则信息量的单位为奈特 (nit); 若取 10 为底, 则信息量的单位为十进制单位, 或称哈特莱。通常广泛使用的单位为比特 (bit)。

若传输的离散消息是两个消息中独立选择其一, 即二进制中 0, 1 必出现其中之一, 而且每个消息出现的概率是相同的, 也就是“1”出现和“0”出现的概率均为 $1/2$ 。这时每收到一个消息时的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/2} = \log_2 2 = 1 \text{ bit}$$

这说明对于二进制序列每传送一个符号, 在 0、1 等概率的情况下, 一个二进制符号携带的信息量为 1 bit。若采用 M 进制, 也就是在 M 个符号中独立地选择其一, 每个符号出现的概率为等概率的, 即概率为 $1/M$, 这样对于 M 进制中每收到一个符号的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/M} = \log_2 M \text{ bit} \quad (1-2)$$

当 M 为 2 的整幂次, 即 $M=2^k$ ($k=1, 2, 3, \dots$)

$$I = \log_2 2^k = k \text{ bit} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 表示当 $M=2^k$ 进制时, 每一符号包含的信息量为二进制每个符号所包含信息量的 k 倍。

综上所述, 若符号出现的概率为等概率时, 则每收到一个符号其包含的信息量为

$$I = \log_2 1/P \quad (1-4)$$

或

$$I = \log_2 M \quad (1-5)$$

式中, M 为独立符号个数; P 为每个符号出现的概率 $P=1/M$ 。

在符号出现的概率为非等概率的情况, 如离散信息源是由几个符号组成的集合, 在此符号集中每个符号用 x_i 表示, 每个 x_i 的出现概率用 $P(x_i)$ 表示, 并相互独立出现, 它可表示为

$$\left\{ \begin{array}{cccc} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ P(x_1) & P(x_2) & \cdots & P(x_n) \end{array} \right\}$$

而且

$$\sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$$

这时每个 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 所包含的信息量分别为

$$-\log_2 P(x_1), -\log_2 P(x_2), \dots, -\log_2 P(x_n)$$

每个符号所包含信息量的统计平均值, 即平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x) &= P(x_1) [-\log_2 P(x_1)] + P(x_2) [-\log_2 P(x_2)] + \cdots + P(x_n) [-\log_2 P(x_n)] \\ &= - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \end{aligned} \quad (1-6)$$