

邮电高等学校试用教材

数字微波通信

孙海山 李转年 编 姚彦 审

YOU DIAN GAO DENG

YOU DIAN GAO DENG

HAN SHOU

YOU DIAN GAO DENG HAN SHOU

JIAO CAI

HAN SHOU SHI YONG

GAO HAN

邮电高等学校试用教材

数 字 微 波 通 信

孙海山 李转年 编
姚彦 审

人民邮电出版社

登记证号(京)143号

内 容 提 要

本书是邮电高等学校试用教材。

全书介绍了数字微波通信的基本理论和线路设计中的主要问题。从数字通信的基本概念入手,讲述了数字信号最佳接收、基带传输、数字调制解调及误码性能,最后介绍了数字微波线路的一种设计方法。

全书共分五章并附有 $Q(x)$ 表可用于误码率计算。

本书也可作邮电高等函授教材及供从事微波通信工作人员参考。

邮电高等学校试用教材

数字微波通信

孙海山 李转年 编

姚 彦 审

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

人民邮电出版社河北印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本: 850×1168 1/32 1992年10月 第 一 版
印张: 9 28/32 页数: 158 1992年10月河北第1次印刷
字数: 25 千字 插页: 1 印数: 1— 6 000 册

ISBN 7-115-04739-1/G·187

定价: 3.30 元

前 言

本书是邮电高等学校微波通信专业试用教材。

本书由于篇幅所限，内容仅限于数字微波中涉及的基本概念和工程中的一些问题。

由于本书是专业课教材，涉及到的基础知识较多，其中有通信系统、数字通信和微波技术基础等方面的知识。凡用到的基础知识一般不再重复。考虑在职受教育微波专业学员一般缺乏数字通信方面知识，故本书简要介绍了数字通信的基本概念作为学习数字微波的过渡内容。

突出基本概念和实用性是本教材的特点。全书内容计划授课时间为120学时。

本书第一、二两章由西安邮电学院李转年老师编写，其余部分由北京邮电学院函授分院孙海山老师编写。全书由孙海山老师统编。

在编写过程中，得到了邮电函授教材（微波专业）编审组各位同志的具体帮助，尤其是高炜烈、刘天琪和朱大成三位老师的指导。在此对各位同志和老师表示衷心感谢。

全书承蒙清华大学姚彦教授审阅。

由于编写水平有限，书中难免出现错误和不妥之处，切望读者指正。

编者

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 信号概述	(1)
一、信息与信号.....	(1)
二、模拟信号.....	(2)
三、数字信号.....	(4)
四、模-数、数-模变换.....	(8)
第二节 通信系统概述	(18)
一、基本模型.....	(18)
二、模拟通信系统.....	(19)
三、数字通信系统.....	(20)
第三节 数字微波通信系统概述	(25)
一、时分多路复用原理.....	(25)
二、传输容量系列.....	(27)
三、主要技术问题.....	(29)
四、主要特点.....	(31)
第四节 数字信号最佳接收	(32)
一、最佳接收机结构.....	(32)
二、最佳接收机极限性能.....	(35)
三、最佳接收原理的应用.....	(41)
本章小结.....	(49)
习题.....	(51)
第二章 数字基带传输	(52)
第一节 引言	(52)
第二节 数字基带信号码型	(54)

一、码型设计原则·····	(55)
二、二进制码·····	(56)
三、三进制码·····	(59)
第三节 数字基带信号功率谱分析·····	(62)
一、相关函数法·····	(63)
二、直接法·····	(74)
第四节 数字基带信号波形形成·····	(87)
一、无码间串扰波形·····	(88)
二、部分响应波形·····	(96)
第五节 最佳基带系统及其误码性能·····	(106)
一、接收与发送滤波器传输函数的最佳分配·····	(107)
二、最佳基带系统的误码性能·····	(109)
第六节 码间串扰与均衡技术·····	(113)
一、码间串扰与眼图·····	(113)
二、均衡技术·····	(117)
本章小结·····	(121)
习题·····	(126)
第三章 数字调制与解调·····	(130)
第一节 线性调制·····	(130)
第二节 幅移键控信号及其解调·····	(132)
一、二进制幅移键控·····	(133)
二、二进制抑制载波双边带调制·····	(136)
三、二进制幅移键控信号的解调·····	(137)
四、二进制幅移键控系统的性能·····	(138)
五、多进制幅移键控·····	(140)
第三节 相移键控信号及其解调·····	(143)
一、二相相移键控·····	(144)
二、四相相移键控·····	(170)
三、多相相移键控·····	(181)

第四节 正交幅度调制 (QAM).....	(192)
第五节 相干载波及定时信号提取.....	(196)
一、相干载波提取.....	(196)
二、定时信号提取.....	(199)
本章小结.....	(202)
习题.....	(204)
第四章 微波接力信道	(205)
第一节 微波接力信道的构成.....	(205)
第二节 天馈线和分路系统.....	(208)
一、微波天线.....	(208)
二、馈线系统.....	(215)
三、分路系统.....	(218)
第三节 微波传播.....	(222)
一、自由空间传播损耗.....	(222)
二、菲涅耳区及其半径.....	(224)
三、平滑地面的反射.....	(226)
四、大气折射和等效地球半径.....	(230)
五、大气折射对反射点余隙的影响.....	(234)
六、球形地面上复杂地形单障碍物时余隙的计算.....	(238)
七、微波线路的分类.....	(239)
八、工程中K值和余隙 h_0 的选定	(240)
第四节 衰落及抗衰落.....	(246)
一、衰落原因及分类.....	(246)
二、分集接收.....	(248)
三、自适应均衡技术.....	(248)
第五节 射频频道频率配置.....	(250)
一、频率配置应考虑的原则.....	(250)
二、一个双向波道的频率配置——二频制和四频制.....	(252)
三、多波道收发频率集体排列.....	(253)

四、射频波道频率再用	(255)
本章小结	(256)
习题	(258)
第五章 数字微波信道的传输质量和性能估算	(260)
第一节 数字微波接力线路的假想参考电路及传输质量标准	(260)
一、假想参考电路	(260)
二、传输质量标准	(262)
三、误比特率 (BER) 和相应瞬断率在每个接力段上的分配	(265)
第二节 数字微波通信中的噪声	(266)
一、数字微波中的热噪声	(266)
二、射频干扰及干扰噪声	(271)
第三节 数字微波中的噪声分配	(273)
一、确定理论信 (载) 噪比	(274)
二、射频干扰储备量	(274)
三、设备恶化储备量	(274)
四、按噪声功率相加并以信噪比形式表示	(275)
第四节 射频干扰噪声的核算	(279)
一、同极化的邻近波道干扰 (恒定干扰)	(279)
二、前对背干扰	(280)
三、越站干扰	(281)
第五节 数字微波接力线路性能估算	(283)
一、高误码率的瞬断率指标的分配 (电话电路)	(284)
二、理论门限电平	(284)
三、实际门限电平	(285)
四、有效衰落储备	(286)
五、性能估算	(289)
第六节 数——模兼容	(293)

一、系统互联.....	(293)
二、频段共用.....	(296)
三、路由共用.....	(296)
本章小结.....	(297)
习题.....	(298)
各章习题解答.....	(298)
附 概率积分和 $Q(x)$ 函数	(300)
附 调制方式的英汉名词对照表.....	(303)

第一章 概 论

内 容 提 要

本章首先概述了信息与信号的基本含义,模拟信号与数字信号的定义,以及模-数、数-模转换问题;接着概述了通信系统的基本模型,模拟通信与数字通信的主要特点,时分多路复用原理以及数字微波接力通信系统的传输容量系列、主要技术问题与主要特点;最后介绍了数字信号最佳接收原理,并得出了二进制信号三种载波传输方式(2ASK、2FSK、2PSK)的理想误码性能。

第一节 信号概述

一、信息与信号^[注]

众所周知,通信是指信息的传递和交换。信息和通信是人类生存与发展的基础。没有信息和通信的社会是不可想象的。信息和通信对于人类社会是如此重要和普遍,首先明确它们的基本含义则十分必要。

什么是信息?信息是一个含义相当深刻的抽象概念。它是人的

注,在信息论中,信息表征信源的不定度。信息论的研究对象是广义的通信系统。系统的始端是信源。它产生信号,而它所发出的信息含于信号之中,所以,信号是信息的载体。

主观世界和客观世界变化的产物。它代表着对于受信者有意义的某一有待传送、交换、存储或提取的内容。

信号是信息的载体，是运载信息的工具。人们要想传递和交换信息，则必须先利用信号将其表示出来。例如，说出来的语言、写出来的文字、画出来的图象、编出来的电码等等，都是不同形式的信号。同一信息，可以用不同形式的信号来表示。因此，可以认为，通信的任务是传递和交换信号。

通信的方式很多，如书信通信、电话通信、电报通信等。而现代通信则主要是指“电通信”（包括光通信），即以“电信号”作为其传递与交换对象的通信。电通信的突出优点是，能使信号在任意通信距离上实现快速、有效，而又准确可靠的传递，因而成为现代社会的主要通信方式。本书将要讨论的通信系统，正是这种电通信系统。

通信系统中所传输的信号种类很多，如电话信号、电视信号、电报信号等。这些不同种类的信号都是随时间变化的，而且都是以其某个参量（振幅、相位或频率）随时间的变化来载荷信息的。根据信号载荷信息参量的取值情况，我们可将信号分为两大类：模拟信号与数字信号。

二、模拟信号

若信号的某一载荷信息的参量可以取无限多个连续变化的数值，则称其为模拟信号。

例如电话机输出的语声电压信号，其幅度随发话人语声大小而连续变化，所以被称为模拟电话信号，如图 1-1 所示。又如，调频广播信号，其载荷信息的参量是频率，该信号的频率随音频调制信号大小成正比变化，如图 1-2 示，所以也是模拟信号。再如，脉冲宽度调制（PWM）信号，是用其脉冲宽度载荷信息的，其脉冲宽度正比于模拟调制信号的大小，如图 1-3 示，所以同样是模拟信

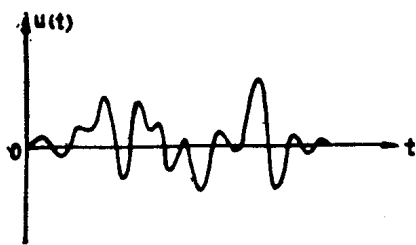


图 1-1 模拟电话信号

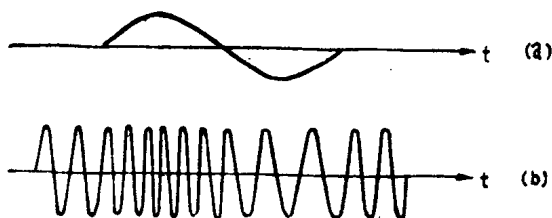


图 1-2 调频信号

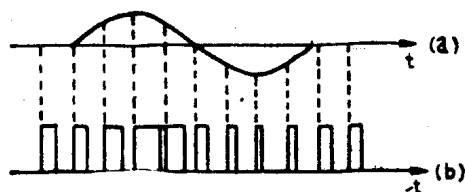


图 1-3 脉宽已调信号

号。

模拟信号的参量取值是连续的，且常常与其所代表的消息相对应。在时间域上，它可以连续，也可以离散。如图 1-4 所示。其中，图 1-4(b)是图 1-4(a)的脉冲抽样信号，或称为脉冲幅度调制(PAM)信号。应当注意，PAM信号虽然是离散时间信号，但因其幅度取值随着原模拟信号连续变化，所以仍是模拟信号。

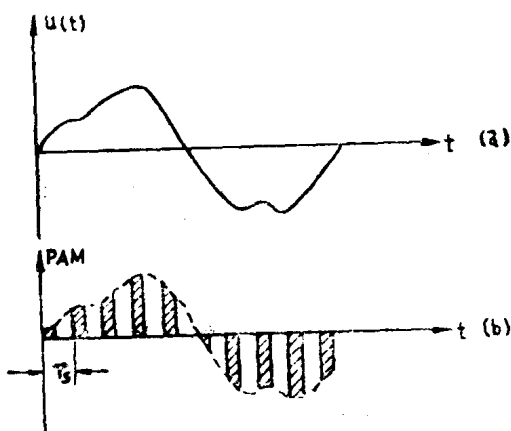


图 1-4 连续模拟信号与离散模拟信号

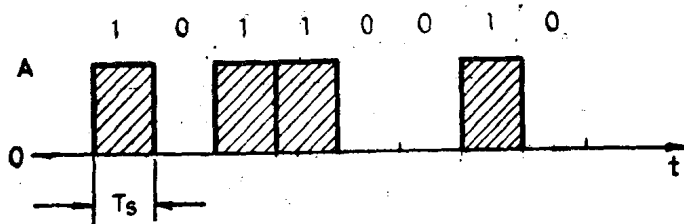
三、数字信号

若信号的某一载荷信息的参量只能取有限个离散的值，则称其为数字信号。

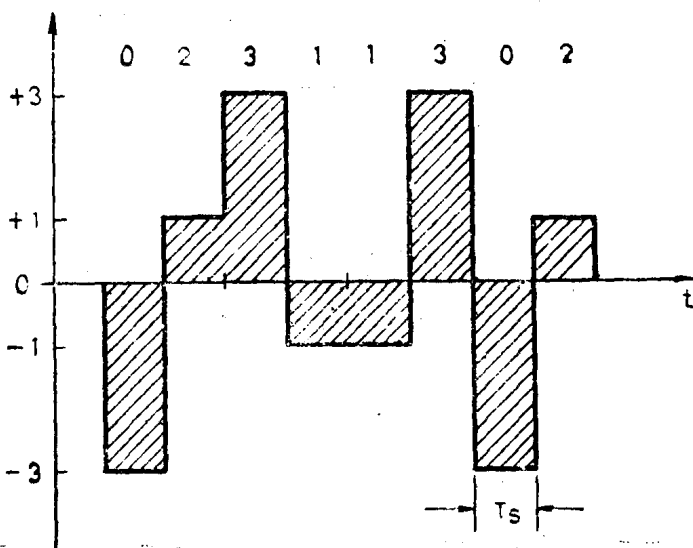
图 1-5 示出几种数字基带信号^{〔注〕}波形，它们都是用其幅度参量载荷信息的。可以看出，图 1-5(a)信号的幅度取值只有 0、 A 二个离散数值，所以称为二进制信号。二进制信号在数学上，可以用二进制数字 0、1 组成的序列来描述，又称为二元信号。同样，图 1-5(b)信号的幅度取值为 3、1、-1、-3 四个离散数值，故被称为四进制信号或四元信号。

被数字基带信号调制的载波信号称为数字频带信号。图 1-6 示出几种数字频带信号波形，它们分别是用其载波的幅度、频率、相位参量来载荷信息的。其中，图 1-6(a)为二进制幅移键控信号，简记为 2ASK 信号，图 1-6(b)为二进制频移键控信号，简记

注：未对载波调制的待传信号称为基带信号，未对载波调制的数字待传信号称为数字基带信号。它们所占的频带称为基带，基带的高限频率与低限频率之比通常远大于 1。



(a) 二进制信号

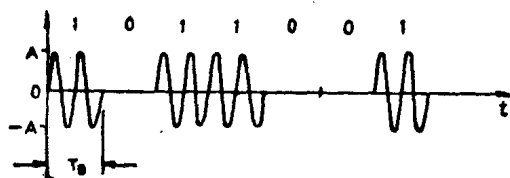


(b) 四进制信号

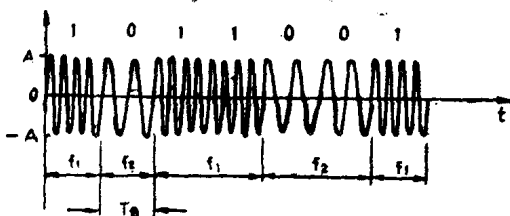
图 1-5 数字基带信号波形

为2FSK信号；图1-6(c)为二进制相移键控信号，简记为2PSK信号。

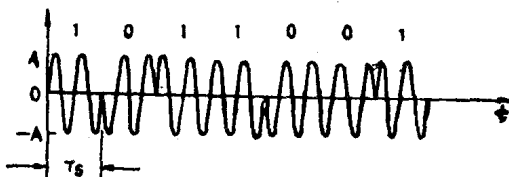
数字信号的参量变化常常不直接与所代表的信息变化相对应。不仅参量取值离散有限，而且在时间域上常常也是离散的。从表面看，图1-5所示信号在时间域上是连续的，如脉冲的持续时



(a) 2ASK 信号



(b) 2FSK 信号



(c) 2PSK 信号

图 1-6 数字频带信号波形

间是 T_s 。但是，由于每个码元^{〔注〕}的时间间隔 T_s 是固定的，信号的幅度参量只在一些确定的离散时刻发生跃变；而在系统中，信号真正起作用的有效时间（如接收机判决时刻）常常是在一些离散时刻，如码元脉冲的前沿、后沿或中心时刻等。所以，实质上它们都是离散时间信号。也就是说，它们只在一些离散时刻上有定义（或起作用）。离散时间信号的一个共同特点是，其载荷信息的参量可以用一个离散时间序列 $f(nT_s)$ 来表示。例如，图 1-5(a) 所示数字

注：数字信号的信号单元叫码元。如不特别说明该信号在系统中的位置，一般是指数字传输信道中传送的数字信号。

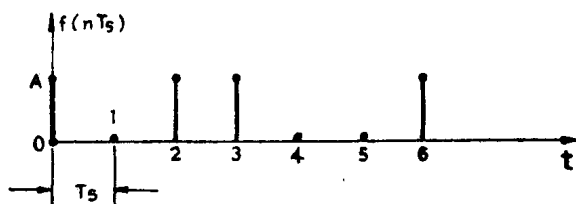


图 1-7 离散时间序列

信号的幅度参量可以用图 1-7 所示的离散时间序列来表示。

需要说明，有些数字信号在时间域上也可以是连续的。例如，在电报通信中，电传打字机输出的电报信号就是时间连续的数字信号。对于国际五单位电码表的电传机，按下字符 *F* 键后，输出电脉冲波形如图 1-8 所示。此信号的特点是：幅度取值只有二种，即有电流或无电流；信号的幅度跃变在任何时刻都可能出现，这是由于发报员按键的时间是随机出现的。故称此信号为时间连续幅度离散的连续数字信号。

我们所讨论的数字信号是指时域离散的数字信号。这种信号在数学上可以用一个取值离散有限的数字序列来表示。该数字序列通常被称为数字信号的抽象代码，简称信号代码或代码。二进制信号的代码是二进制数字 0、1 组成的序列；多进制信号的代码是多进制数字组成的序列。在图 1-5 和图 1-6 中，所示数字信号波形的上方分别标出了它们的信号代码。

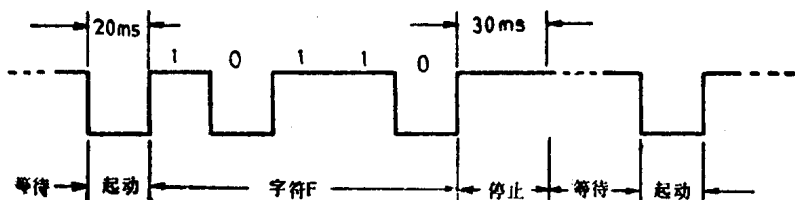


图 1-8 电传电报信号

四、模-数、数-模变换

任何信息,既可以用模拟信号表示,也可以用数字信号表示。这就决定了模拟信号与数字信号之间,必然能够进行相互变换。把模拟信号变换为数字信号的过程,称为模-数变换(A/D);把数字信号还原为其对应的模拟信号的过程,称为数-模变换(D/A)。

模-数变换,又叫信号编码。其方法很多。脉冲编码调制,简称脉码调制(PCM)就是广泛采用的一种方法。详细论述 PCM 原理不是本书的任务。但是,以 PCM 为例,简单说明一下模-数、数-模变换过程,对于不了解 PCM 原理的读者则十分必要。

1. 模-数变换过程

(1) 抽样

抽样是把连续模拟信号变换为离散模拟信号的过程。这种变换过程应以不丢失信息为前提。著名的奈奎斯特($Nyquist$)抽样定理为这种变换提供了理论根据。该定理指出:一个频带限在 F_m Hz以下的连续信号 $f(t)$,可以用时间每隔 $T \leq \frac{1}{2F_m}$ 秒的抽样值序列唯一地确定。

上述定理证明如下。

假定连续信号 $f(t)$ 的频带限制在 $0 \sim F_m$ Hz内,如图1-9(a)、(b)所示。将信号 $f(t)$ 和周期性冲激序列 $r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT)$ 相乘,得到的乘积函数 $f_s(t)$ (如图1-10(a)所示)是均匀间隔为 T 秒的冲激序列,如图1-9(e)所示。这些冲激的强度分别等于 $f(t)$ 在相应瞬时上的抽样值,

$$\begin{aligned} \text{即} \quad f_s(t) &= f(t) \cdot r(t) = f(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t-nT) \end{aligned}$$