

► 普通高等学校教材

数字信号处理 (第二版)

● 陈玉东 编

地质出版社

普通高等学校教材

数字信号处理

(第二版)

陈玉东 编

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书比较系统地介绍了数字信号处理的基本理论和相应的算法原理。全书共 13 章, 内容包括离散时间信号与系统的基本概念、连续信号的采样、 $\mathcal{Z}$ 变换、离散时间系统频域分析、离散时间信号的傅里叶变换及 DFT、傅里叶变换的快速算法、离散时间系统的实现结构、数字滤波器设计 (IIR、FIR)、多采样率信号处理、平稳随机信号的基本概念及信号相关关系、其他信号变换 (Hilbert 变换和连续小波变换) 等内容。每章都有精选的例题和习题, 并附有习题答案。

本书可作为电子信息工程、通信工程、信息科学、测控技术与仪器、地球物理学等有关工科和理科专业的本科高年级学生的教材及参考书, 也可作为相关专业工程技术人员的自学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

数字信号处理 / 陈玉东编. —2 版. —北京: 地质出版社, 2014. 9

ISBN 978 - 7 - 116 - 08976 - 1

I. ①数… II. ①陈… III. ①数字信号处理—高等学校—教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 206056 号

Shuzi Xinhao Chuli

责任编辑: 王春庆

责任校对: 黄苏晔

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324514 (编辑部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010) 82324340

印 刷: 北京纪元彩艺印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 20.25

字 数: 500 千字

印 数: 1—2000 册

版 次: 2014 年 9 月北京第 2 版

印 次: 2014 年 9 月北京第 1 次印刷

定 价: 34.00 元

书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 08976 - 1

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

第二版前言

随着当今科学技术的迅速发展,信号处理技术已成为 21 世纪信息化时代打开电子信息科学的一把钥匙。信息化的基础是数字化,数字化的核心技术之一是数字信号处理。

数字信号处理是将信号以数字方式表示并处理的理论和技术。广义来说,是研究用数字方法对信号进行分析、变换、滤波、检测、调制、解调以及快速算法的一门技术学科。也有人认为:数字信号处理主要是研究有关数字滤波技术、离散变换快速算法和谱分析方法。

数字信号处理技术随着数字电路与系统技术以及计算机技术的发展而得到了迅速发展,其应用领域十分广泛,已经涵盖了工业控制、通信、娱乐、医疗、教育、环境控制、安全等领域,如手机、PDA、GPS、数传电台等。

数字信号处理主要应用于语音信号处理、图像信号处理、振动信号处理、地球物理信号处理、生物医学信号处理等。

本教材自第一版印刷以来,深受初学者的欢迎,特别适合非电子类专业的学生使用,故决定再版。本版修订了第一版中的错误,修改了部分图件,并更新了内容。

考虑到本教材内容的完整性以及知识点的系统性,本次修订保持了第一版的知识框架。从近八年的实际讲授情况来看,由于受目前高校课程设置学时数的限制,以及有些非电子类专业学生的背景知识的限制,64 学时很难能讲授完本教材的全部内容,故在实际教学中,可适当选讲一些章节。建议前十章的内容都应该讲授,后三章的内容可根据专业的实际需要适当选取。

中国地质大学(北京)苑益军副教授等在修订本书时做了部分工作,本人表示感谢。

本教材由中国地质大学(北京)2012 年度教学研究与教学改革项目(JGZHD-201204)资助。

限于本人水平,书中不妥的地方在所难免,恳切读者批评与指正。

编者

2014 年 8 月

第一版前言

兴起于 20 世纪 60 年代的数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP) 是一门横跨多门学科的技术,是现代信息技术发展的基础应用学科。自 20 世纪 70 年代采用第一块 DSP 芯片以来,数字信号处理领域已得到了很大的发展。随着 DSP 处理器速度的飞速提高以及精密性和计算能力的相应增强,数字信号处理已成为许多应用中不可或缺的一部分。它广泛应用于各种系统,从专用的军事系统、太空探索到互联网,甚至到各式各样的日用电子产品,如家庭娱乐系统,包括电视、影碟、高保真度音响系统等,不胜枚举。由于它的理论、应用和实现数字信号处理系统与计算机技术之间的紧密结合,使得数字信号处理的重要地位和地位在迅速加强和提高。

数字信号处理涉及的是数字形式信号及其所包含信息的表示、变换和运算等。例如,希望分解两个或多个混杂在一起的信号,或者想增强某些信号分量或一个信号模型中的某些参量等。

本书是关于数字信号处理的基础性教材,语言通俗易懂。考虑到目前我国高校本课程课时设置多为 64 学时,因此在内容安排上,主要涉及信号处理中的理论核心问题,注重对基本概念、基本理论、基本算法和基本应用的详细讲解。全书共分十三章,覆盖 DSP 基础教程的主要内容和现代数字信号处理的部分内容。第一章对信号的概念、数字信号处理的发展历史、研究对象、研究内容以及有关的前缘性问题做了简单介绍;第二章重点介绍数字信号处理的基础知识,包括离散信号和系统的描述与表征、卷积和线性常系数差分方程等;第三章阐述了 $\mathcal{Z}$ 变换;第四章介绍了连续时间信号的采样与重构以及量化误差的分析,其中最重要的内容是采样定理、混叠问题与量化误差等;第五章是离散信号的频域分析,涉及系统函数和频域响应等概念,并介绍一些不同类型的系统,如全通滤波器、线性相位滤波器和最小相位滤波器以及可逆系统等;第六章是关于离散傅里叶变换 (DFT) 及其性质,阐述一些计算有限长序列 DFT 的有效算法,如两个序列 DFT 的乘积对应于时域的围线积分等;第七章是快速傅里叶变换 (FFT);第八章讨论离散时间系统的实现结构;第九章和第十章介绍 FIR 和 IIR 滤波器的常用设计方法,尽管重点介绍低通滤波器的设计,但也简要地探讨了其他选频滤波器,如高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器的设计方法;第十一章是多采样率信号处理;第十二章概括了随机信号处理的原理;第十三章中介绍了其他几种变换。

本教材是作者近八年在讲授《数字信号处理》讲义的基础上编写而成的，并作为校本教材使用；已为电子信息工程、测控技术与仪器、地球物理等专业的高年级学生讲授过四次，反映效果良好。

清华大学电子工程系的应启珩教授和中国地质大学（北京）李金铭教授审阅了全稿，并提出了宝贵意见，作者表示十分感谢；同时也感谢中国地质大学（北京）李梅老师对该书提出的建议。

本书的出版得到了中国地质大学（北京）和教育部重点实验室——地下信息探测技术与仪器的资助。在这里，一并表示感谢。

陈玉东

2005年2月

目 录

第二版前言

第一版前言

第一章 概 论	(1)
第一节 信号的基本概念	(1)
一、信号的概念	(1)
二、信号特性	(2)
三、信号的分类	(4)
第二节 数字信号处理	(5)
一、数字信号处理的发展历史	(6)
二、数字信号处理系统的基本组元	(7)
三、数字信号处理的硬件实现	(8)
四、数字信号处理的研究领域	(9)
五、数字信号处理的主要特点	(11)
习题与思考题	(13)
第二章 离散时间信号与系统	(14)
第一节 引 言	(14)
第二节 离散时间信号	(14)
一、序列的运算	(14)
二、几种常用序列	(22)
三、序列的周期性	(24)
四、任意序列的表示	(27)
五、序列的能量	(27)
第三节 离散时间系统	(28)
一、线性系统	(29)
二、时不变系统	(30)
三、因果系统	(31)
四、稳定系统	(32)
五、可逆系统	(32)
六、线性时不变系统	(32)
七、线性时不变系统的性质	(35)
第四节 常系数线性差分方程	(38)
一、常系数线性差分方程的表达式	(38)

二、迭代求解系统的单位采样响应	(40)
习题与思考题	(43)
第三章 $\mathcal{Z}$ 变换及其性质	(45)
第一节 引 言	(45)
第二节 $\mathcal{Z}$ 变换	(45)
一、有限长序列的 $\mathcal{Z}$ 变换	(46)
二、右边序列的 $\mathcal{Z}$ 变换	(47)
三、因果序列的 $\mathcal{Z}$ 变换	(47)
四、左边序列的 $\mathcal{Z}$ 变换	(47)
五、双边序列的 $\mathcal{Z}$ 变换	(48)
六、 $\mathcal{Z}$ 变换收敛域的性质	(53)
第三节 $\mathcal{Z}$ 反变换	(53)
一、观察法	(53)
二、围线积分法	(54)
三、部分分式法	(59)
四、幂级数展开法	(62)
第四节 $\mathcal{Z}$ 变换性质	(64)
一、线性性	(64)
二、时移性	(65)
三、指数序列相乘性	(65)
四、 $X(z)$ 的微分	(66)
五、复序列的共轭	(67)
六、复序列共轭的翻褶	(67)
七、序列的卷积	(68)
八、序列相乘	(70)
九、初值定理	(71)
十、终值定理	(71)
十一、帕塞瓦尔定理	(72)
习题与思考题	(74)
第四章 连续时间信号采样与量化误差	(76)
第一节 引 言	(76)
第二节 连续时间信号的采样	(76)
一、周期采样	(76)
二、理想采样	(78)
三、采样信号的频域表示	(79)
四、被采样信号的重构	(82)
五、实际采样讨论	(84)

第三节 量化误差分析	(88)
一、量化原理	(88)
二、量化误差分析	(92)
习题与思考题	(96)
第五章 变换域分析	(97)
第一节 引 言	(97)
第二节 离散时间傅里叶变换	(97)
一、系统对复指数序列的稳态响应	(97)
二、离散时间傅氏变换	(98)
三、离散时间傅氏变换的对称性	(99)
第三节 $\mathcal{Z}$ 变换与拉普拉斯变换、傅里叶变换的关系	(101)
一、 $\mathcal{Z}$ 变换与拉氏变换之间的关系	(101)
二、序列的 $\mathcal{Z}$ 变换和傅氏变换之间的关系	(103)
第四节 系统的变换域分析	(104)
一、系统函数与频率响应	(104)
二、理想频率选择性滤波器	(106)
三、系统的稳定性和因果性	(107)
四、可逆系统	(108)
五、有理函数系统的单位冲激响应	(109)
六、有理函数系统的频率响应	(110)
七、相位失真和延迟	(113)
八、线性相位系统	(114)
九、最小相位系统	(119)
十、全通系统	(119)
习题与思考题	(124)
第六章 离散傅里叶变换	(126)
第一节 引 言	(126)
第二节 傅里叶变换的四种形式	(126)
一、时间和频率皆连续的傅氏变换	(126)
二、时间连续、频率离散的傅氏变换	(127)
三、时间离散、频率连续的傅氏变换	(127)
四、时间和频率皆离散的傅氏变换	(128)
第三节 周期序列的离散傅里叶级数展开	(130)
一、周期序列的特性	(130)
二、周期序列的傅氏级数展开系数	(131)
第四节 离散傅里叶级数的性质	(133)
一、线性性	(134)
二、序列移位	(134)

三、对偶性	(134)
四、周期卷积	(135)
第五节 有限长序列的离散频域表示——离散傅里叶变换	(137)
第六节 离散傅里叶变换的性质	(138)
一、线性性	(139)
二、对偶性	(139)
三、对称性	(139)
四、共轭对称性	(139)
五、循环移位	(140)
六、DFT 的帕塞瓦定理	(142)
七、循环卷积	(142)
八、用离散傅氏变换实现有限长序列的线性卷积	(144)
九、用 DFT 计算线性卷积的重叠相加法	(148)
第七节 对 DTFT 采样	(151)
一、用频率域采样点重构有限长序列	(152)
二、用频率域采样点重构函数 $X(z)$	(153)
第八节 用 DFT 对连续时间信号逼近的讨论	(155)
一、频率分辨力与信号最高频率之间的关系	(156)
二、频谱泄漏现象	(157)
三、栅栏效应	(158)
习题与思考题	(158)
第七章 快速傅里叶变换	(160)
第一节 引言	(160)
第二节 概况	(160)
第三节 基 2FFT 算法	(161)
一、按时间抽取的 FFT 算法	(161)
二、按频率抽取的 FFT 算法	(165)
习题与思考题	(168)
第八章 离散时间系统的实现	(170)
第一节 引言	(170)
第二节 数字网络	(170)
第三节 FIR 系统的结构	(172)
一、直接型	(173)
二、级联型	(173)
三、线性相位滤波器	(173)
四、快速卷积结构	(174)
五、频率采样型	(175)

第四节 IIR 系统的结构	(176)
一、直接型	(176)
二、级联型	(178)
三、并联型	(178)
四、转置型	(179)
五、全通滤波器结构	(180)
第五节 系统格型结构	(180)
一、FIR 格型结构	(181)
二、IIR 格型结构	(184)
习题与思考题	(185)
第九章 FIR 数字滤波器的设计	(186)
第一节 引 言	(186)
第二节 数字滤波器设计的基本概念	(186)
一、设计步骤与要求	(186)
二、绝对指标	(187)
三、相对指标 (dB)	(187)
四、设计思路	(188)
第三节 用窗函数法设计线性相位 FIR 滤波器原理	(189)
第四节 各种常见窗函数	(194)
一、矩形窗	(194)
二、三角形窗 (Bartlett)	(196)
三、汉宁窗 (Hanning)	(196)
四、海明窗 (Hamming)	(198)
五、布拉克曼窗 (Blackman)	(199)
六、凯泽窗 (Kaiser)	(200)
七、窗函数法的设计步骤	(202)
第五节 频率采样设计法	(206)
一、直接设计法	(206)
二、最优设计法	(208)
习题与思考题	(211)
第十章 IIR 数字滤波器的设计	(212)
第一节 引 言	(212)
第二节 常用模拟低通滤波器	(212)
一、模拟滤波器的技术指标	(213)
二、幅度平方函数法	(214)
三、巴特沃斯低通逼近	(215)
第三节 由模拟滤波器设计 IIR 数字滤波器	(223)

第四节	冲激响应不变法	(224)
一、	映射原理	(224)
二、	具体实现与改进	(225)
三、	适用范围	(226)
第五节	双线性变换法	(228)
一、	映射原理	(228)
二、	常数 c 的选择	(229)
三、	映射效果	(230)
四、	具体实现	(231)
第六节	IIR 滤波器设计的频率转换法	(232)
第七节	模拟频带转换法设计	(233)
一、	模拟低通滤波器映射成数字低通滤波器	(233)
二、	数字带通滤波器	(238)
第八节	数字域频带转换法设计	(240)
第九节	在数字域设计 IIR 数字滤波器	(242)
第十节	FIR 和 IIR 滤波器的比较	(242)
	习题与思考题	(243)
第十一章	多采样率信号处理	(244)
第一节	引言	(244)
第二节	多采样率信号处理系统的基本单元	(244)
一、	减采样和增采样信号的时域表示	(244)
二、	减采样和增采样信号的变换域表示	(245)
三、	基本单元的网络结构	(248)
第三节	抽取滤波器和内插滤波器	(250)
一、	抽取滤波器	(250)
二、	内插滤波器	(251)
三、	有理数倍采样率转换	(252)
四、	采样率变换的多级实现	(254)
第四节	多相分解	(259)
一、	多相分解表示	(259)
二、	减采样和增采样滤波系统的多相结构	(260)
第五节	多采样率信号处理应用举例	(263)
	习题与思考题	(266)
第十二章	随机信号分析	(268)
第一节	引言	(268)
第二节	随机过程、随机信号及其描述	(268)
一、	随机过程与随机信号的基本概念	(268)
二、	随机信号的描述	(270)

第三节 平稳随机信号	(273)
第四节 平稳随机信号通过线性系统	(276)
第五节 平稳随机信号的各态遍历性	(277)
第六节 确定信号的相关函数	(280)
一、相关函数的定义	(281)
二、相关函数和线性卷积的关系	(282)
三、相关函数的性质	(283)
四、相关函数的应用	(284)
习题与思考题	(285)
第十三章 其他信号变换法	(287)
第一节 引言	(287)
第二节 希尔伯特变换	(287)
一、连续时间信号的希尔伯特变换	(287)
二、离散时间信号的希尔伯特变换	(289)
三、因果信号的希尔伯特变换	(290)
四、因果信号的频谱实部与虚部希尔伯特变换	(293)
五、希尔伯特变换的性质	(294)
第三节 连续小波变换简介	(296)
一、连续小波变换	(296)
二、小波变换的条件	(297)
三、时频的分析窗口	(297)
四、逆变换公式	(299)
五、逆变换公式的讨论	(300)
习题与思考题	(302)
参考文献	(303)
习题答案	(305)

第一章 概 论

科学技术的不断进步,计算机的飞速发展,现代通讯与互联网的迅速崛起,构筑了现代信息高速公路,使我们进入高度信息化、数字化时代。因此,大量的数据与信号需要及时传输,并进行有效处理以获取有用信息。数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)就是通过数字的方式,研究如何正确而快捷地处理信号,最大限度地提取蕴含在数据与信号中的有用信息。它所涉及的概念和技术,最早可追溯到17世纪、18世纪的数值计算,最近可影响到诸如现代声学、语音通信、声呐、雷达、遥感图像、核科学、生物医学工程、地球探测与信息技术,乃至日用家电中的信号处理。数字信号处理是一门横跨多门学科的应用科学,有其自身独特的计算方法和理论,同时又处在不断改进与发展中。

第一节 信号的基本概念

一、信号的概念

信号是传递信息的函数,是信息的载体,是反映信息的物理量,如光、电、声、位移、速度、加速度、力、温度、颜色等。根据反映信息的物理量不同,信号可分为光信号、电信号、声信号、位移信号等,这些信号有的是相关的,有的是独立的,各有其不同的性质。但是,它们都有一种共同的表现形式,即在一定的条件下,其物理量值都随时间变化。如果以时间为横坐标,以物理量值为纵坐标,便可以得到一种变化的图形,这就是我们所说的信号波形。在一般情况下,信号所含的信息总是寄寓于变化的波形之中。

图1-1是“您好”的音频信号;图1-2是一实测地震信号波形,它具有两个不同的反射层。由于电信号具有便于测量、传送、转换与处理等优点,因此非电信号通常总是先

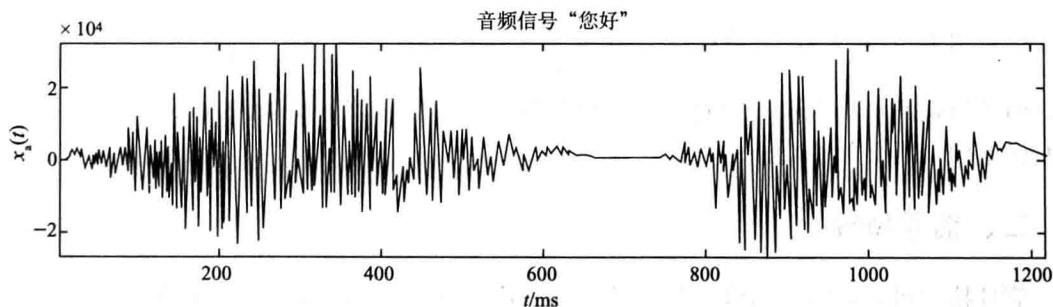


图1-1 音频信号波形举例

转换为电信号再进行处理。例如，在地球物理勘探中，不同的物理作用具有不同的物理场，在重力作用的空间有重力场；天然或人工建立的电（磁）力作用的空间有电（磁）场；波动传播的空间有波场等。在实际测量中，先通过专门仪器将上述信号变为电信号再经过放大等手段处理后测得。由于组成地壳的不同的岩土介质往往在密度、弹性、电性、磁性、放射性以及导热性等方面会存在差异，这些差异将引起相应地球物理场的局部变化，通过观测这些地球物理场得到信号，经处理后给出所需要的结果，获得有用信息；然后结合已知地质资料进行分析研究，推断出地下岩土介质的性质和环境资源等状况，从而达到解决地质问题的目的。

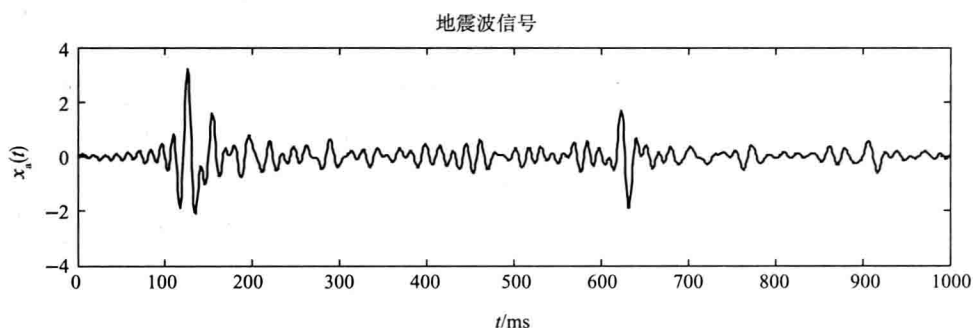


图 1-2 地震信号波形举例

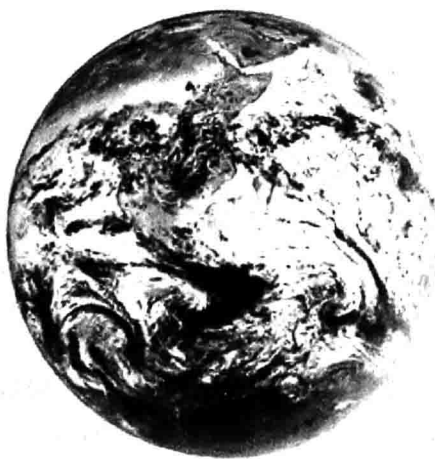


图 1-3 图像信号：地球

在数学上，信号可以表示为一个或多个独立变量的函数。例如，在重力勘探中，沿剖面的重力场强分布可表示为随空间 x 变化的函数，记为 $g(x)$ ；静止图像信号可表示为亮度（或称灰度） f 随二维空间坐标 (x, y) 变化的函数，记为 $f(x, y)$ ，如图 1-3 所示，是从卫星上拍摄的地球概貌图；活动图像信号可表示为亮度 f 随二维空间坐标 (x, y) 和时间 t 变化的函数，记为 $f(x, y, t)$ 等。本书讨论范围仅限于一个独立变量的函数，而且为了方便，以后总以时间表示自变量，尽管在某些具体应用中，自变量不一定是时间。例如，在重力、磁法、电法勘探以及放射性测量中，我们所关心的是它们随空间的变化

等，但可以把它们沿剖面的变化看成是独立时间变量的函数。所以，时间函数 $x(t)$ 是本书所讨论信号的数学模型。

二、信号特性

信号特性可以从时间特性和频率特性两方面来描述。信号的时间特性是从时间域对信号进行分析。例如，信号是时间的函数，它具有一定的波形。早期的信号波形分析，只是

计算信号波形的最大值、平均值、最小值；随后发展到波形的时间域分析，如出现时间的先后、持续时间的长短、重复周期的大小、随时间变化的快慢以及波形的分解和合成；现在已发展到对随机波形的相关分析，即波形与波形的相似程度等。信号的频率特性是从频率域对信号进行分析，例如任一信号都可以分解为许多具有不同频率（呈谐波关系）的余弦分量，而每一余弦分量则以它的振幅和相位来表征。图 1-4 表示信号 $x(t)$ 的波形 [图 (a)] 分解 [图 (b)、(c)]、频谱的幅度 [图 (d)] 和频谱的相位 [图 (e)]。其中，振幅频谱表征该信号所具有哪些谐波分量的振幅；相位频谱表征各谐波分量在时间原点所具有的相位。振幅频谱和相位频谱合在一起可以确定该信号的分解波形和合成波形。例如从图 1-4 所示的频谱中可见，在 $\omega_0 = 2\pi f_0$ (f_0 为频率) 和 $2\omega_0$ 处有两条谱线，其幅度相同，而相位都为零。说明该信号分解为两个谐波，一个谐波的角频率为 ω_0 ，另一个为 $2\omega_0$ ，它们的振幅相等，相位都为零。因此根据这些参数就可绘出该信号的分解波形和合成波形。可见，时域和频域反映了对信号的两个不同的观测面，即两种不同观察和表示信号的方法。图 1-5(a) 和 (c) 就是从这两个不同观测面来观察和表示信号的。从时域上观察，其波形图 $x(t)$ 如图 1-5(a) 所示，它是由若干个谐波组成的，这些谐波的波形如图 1-5(b) 所示。从频域上观测，其频谱如图 1-5(c) 所示，图中给出的信号频谱是和图 1-5(b) 中的谐波一一对应的。总之，信号的时间特性和频率特性有着密切的联系，不同的时间特性将导致不同的频率特性。

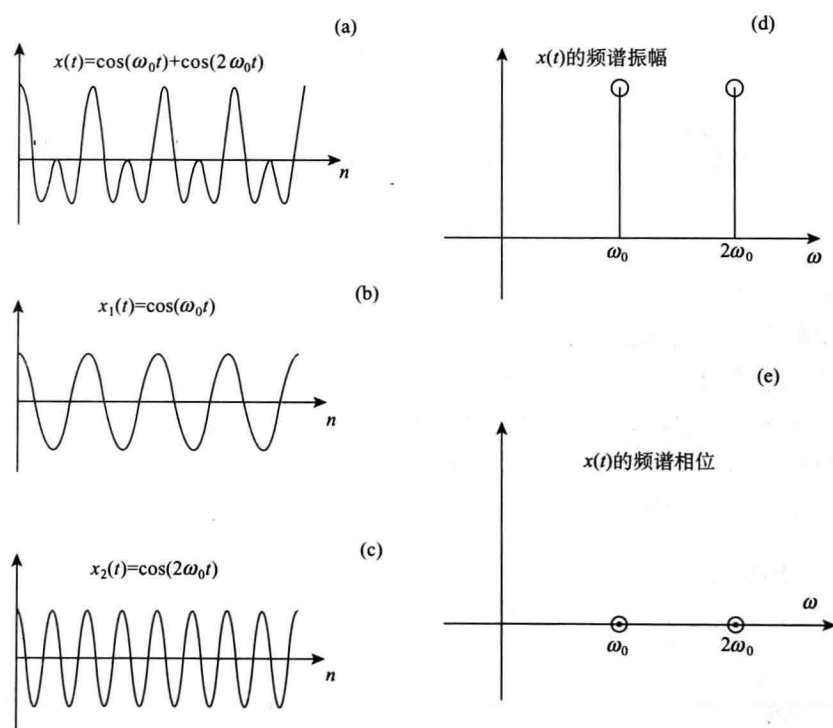


图 1-4 信号分解举例

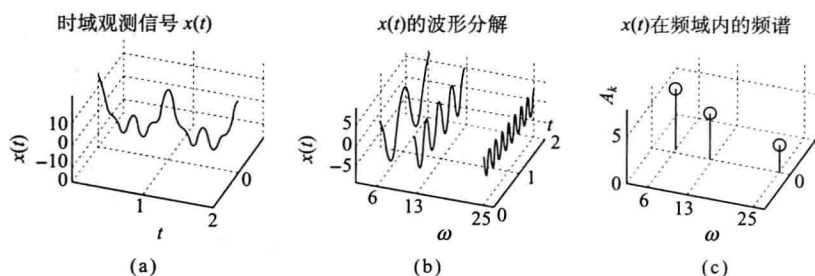


图 1-5 两种不同观测信号的方法

三、信号的分类

前面已经指出, 时间函数 $x(t)$ 是信号的数学模型。按照 $x(t)$ 的不同性质, 在工程上往往有以下几种分类方法。

(1) 按照 $x(t)$ 是否可以预知, 通常把信号分为**确定信号**和**随机信号**两大类。确定信号预先可以知道它的变化规律, 是时间 t 的确定函数。例如, 正弦信号和各种形状的周期信号都是确定信号。随机信号不能预知它随时间变化的规律, 不是时间的确定函数。例如, 半导体载流子随机运动所产生的噪声、从目标反射回来的雷达信号 (其出现的时间与强度是随机的) 以及放射性元素的衰变等都是随机信号。所有的实际信号在一定程度上都是随机的, 因为我们不能预知在未来时间实际信号将是什么样的。但是在一段时间内由于它的变化规律比较确定, 可以近似为确定信号。因此, 为了便于分析, 我们首先研究确定信号, 在此基础上根据随机信号的统计规律再研究随机信号。

(2) 按照 $x(t)$ 的自变量 t 是否能连续取值, 通常又把信号分为**连续时间信号**和**离散时间信号**两类。连续时间信号的自变量, 可以连续取值, 除了若干个不连续点外, 在任何时刻都有定义, 记为 $x(t)$, 如图 1-6(a) 所示。当幅值为连续这一特定情况下又常称为**模拟信号**。实际上连续时间信号与模拟信号常常通用, 用以说明同一信号。离散时间信号的自变量 n 不能连续取值, 即仅在一些离散时刻 ($n=0, \pm 1, \pm 2 \cdots n$ 为整数) 有定义, 我们常用 $x(n)$ 表示, n 表示这个数在该序列中的次序, 例如 $x(-1)$ 、 $x(0)$ 、 $x(1)$ 、 $x(2)$ 等, 因此, $x(n)$ 是一个数字序列, 简称为**序列**。为了形象起见, 用一个上端带小圆圈 (或实心圆点) 的垂直线段来表示其数值大小, 如图 1-6(b) 所示, 有时也称这种图

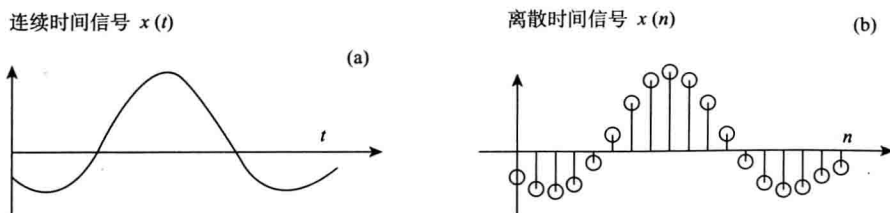


图 1-6 连续时间信号和离散时间信号