Signals and Systems

信号与系统

王中明　编著

WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

Signals and Systems

信号与系统

王中明　编著

WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/王中明编著 .—武汉:武汉大学出版社,2019.1
ISBN 978-7-307-12553-7

Ⅰ.信…　Ⅱ.王…　Ⅲ. 信号系统　Ⅳ.TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 291127 号

责任编辑:杨晓露　　责任校对:汪欣怡　　版式设计:马　佳

出版发行:**武汉大学出版社**　(430072　武昌　珞珈山)
(电子邮件:cbs22@ whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)
印刷:武汉图物印刷有限公司
开本:787×1092　1/16　印张:22.75　字数:539 千字　插页:1
版次:2019 年 1 月第 1 版　　2019 年 1 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-307-12553-7　　定价:48.00 元

前　　言

在多年的犹豫和坚持中，终于撰写完这本教材。犹豫的是：图书馆中有如此多的相关教材，还有写此书的必要吗？在通信、电信专业，“信号与系统”是一门重要的专业课，其物理概念和分析方法几乎应用于本专业的其他所有课程中，特别是频率分析方法，在电路设计、滤波器设计、EMC（电磁兼容）、数字信号处理、高频通信中得到了广泛应用。因此，编撰一本以物理概念及分析方法在通信、电信领域中的具体应用作为重点的专业教材还是非常有必要的。

本书具有如下一些特点：

(1) 物理概念、公式的物理意义讲述细致。任何学科、任何专业，概念和公式的物理意义是最基础的，有了这些基础知识的熟练掌握，才能了解本专业，才能利用这些知识解决实际问题。

(2) 以通信、电信领域的具体应用为基础，专业针对性强。

(3) 将作者多年教学、实践中的心得体会写入了教材中，提出了很多新观点和分析思路。

(4) 将 MATLAB 仿真引入进来，解决实际问题。这里的引入不是教条式的，而是为了解决实际问题，如多次方程的根求解、DFS 变换、FIR 滤波器的频谱等，引入了 MATLAB 仿真后，分析问题更简单。

本书中 MATLAB 仿真程序简单、注释明了，不需读者新学 MATLAB 软件。相反，通过这些 MATLAB 仿真程序，可简化计算过程，使读者理解在专业课程学习中，仿真的重要性。

(5) 以信号和系统的频率特性分析为重点，以理论的物理意义和实际应用为基础，将信号和系统的频率特性直观、明了地展现在读者面前。特别是在滤波器的分析过程中，应用现有知识，将滤波器的特性简单、直观地描述出来。

(6) 简单介绍了时频变换与小波分析等新的频谱分析方法，使读者能够更全面地了解本课程的新方法、新理论。

本书还有如下不足之处：

(1) 本书中的一些物理概念和理论来源于作者的心得体会，难免会有片面之处。

(2) 因作者没有系统学习 MATLAB 软件，课本中的 MATLAB 程序的编程思想大多来源于网络案例，算法简单，许多程序还可进一步优化。

(3) 因编写工作量大、时间仓促，书中难免有不足之处，欢迎读者批评指正。

本书第 1 章、第 2 章由贾倩编写，第 7 章、第 8 章由毛五星编写。本书的出版得到了江汉大学教务处的大力资助；在编写过程中得到了很多同事的鼓励和支持。感谢各位同

仁，没有大家的支持，我是没有勇气完成这本教材的。

这本书写写停停，有三年多时间了，特别是近一年来，我几乎把所有的空余时间都花在这本书上，没有做科研，没有写文章，赶在我的第二个孩子出生前，撰写完了本书。希望两个孩子长大后看到这段文字，为爸爸感到骄傲。

王中明

2018年盛夏于后官湖湖畔

物理量和函数定义表

序号	物理量或函数表达式	定　　义	首次出现章节
		第 1 章	
1	t	时间变量，为连续信号自变量，取值$[-\infty,\infty]$	1.1
2	n	离散时间变量，为离散序列自变量，取值0，±1，±2，…	1.1
3	$x(t)$	(1) 连续信号的通用表达式 (2) 在连续系统描述中，专指输入信号，即激励	1.1 1.6
4	$y(t)$	在连续系统描述中，专指输出信号，即响应	1.6
5	$x(n)$	(1) 离散序列的通用表达式 (2) 在离散系统描述中，专指输入序列，即激励	1.1 1.6
6	$y(n)$	在离散系统描述中，专指输出序列，即响应	1.6
7	$x(\cdot)$	系统(既可以是连续系统，也可以是离散系统)中激励的通用表达式	1.6
8	$y(\cdot)$	系统(既可以是连续系统，也可以是离散系统)中响应的通用表达式	1.6
9	$x'(t)$ $x''(t)$	$=\dfrac{dx(t)}{dt}$，$x(t)$ 的导数 $x(t)$ 的二阶导数	1.2
10	$x^{-1}(t)$	$=\int_{-\infty}^{t}x(\tau)d\tau$，$x(t)$ 的积分运算	1.2
11	$\Delta x(n)$	$x(n)-x(n-1)$，$x(n)$ 的前向差分运算	1.3
12	$\mathrm{Sa}(t)$	$=\dfrac{\sin t}{t}$，抽样信号	1.3
13	$\varepsilon(t)$	阶跃函数	1.4
14	$\delta(t)$	冲激函数	1.4
15	$\delta(n)$	单位序列	1.4
16	$\varepsilon(n)$	单位阶跃序列	1.4
17	$y_{zi}(t)$，$y_{zi}(n)$	零输入响应，激励为零，只由初始条件产生的响应	1.6

续表

序号	物理量或函数表达式	定　义	首次出现章节
18	$y_{zs}(t)$，$y_{zs}(n)$	零状态响应，激励为零，只由初始条件产生的响应	1.6
		第2章	
19	0_-	从时间轴左边无限接近于0的时间点	2.2
20	0_+	从时间轴右边无限接近于0的时间点	2.2
21	$h(t)$	系统冲激响应，激励为冲激函数 $\delta(t)$ 时，系统所对应的零状态响应	2.2
22	$x_1(t) * x_2(t)$	$=\int_{-\infty}^{\infty} x_1(\tau)x_2(t-\tau)\mathrm{d}\tau$，$x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 的卷积积分，简称卷积	2.2
23	$h(n)$	系统单位序列响应，当激励为单位序列 $\delta(n)$ 时，系统所对应的零状态响应	2.4
24	$x_1(n) * x_2(n)$	$=\sum_{i=-\infty}^{\infty} x_1(i)x_2(n-i)$，为 $x_1(n)$ 与 $x_2(n)$ 的卷积和，简称卷积	2.4
		第3章	
25	ω	角频率变量，取值$[-\infty,\infty]$	3.3
26	$\{1, \cos n\omega_0 t, \sin n\omega_0 t, n=1, 2, \cdots\}$	在区间$[t_0, t_0+T]$(其中 t_0 为任意起始时间，$T=2\pi/\omega_0$)上为完备正交函数集	3.2
27	$\{\mathrm{e}^{\mathrm{j}n\omega_0 t}, n=0, \pm1, \pm2, \cdots\}$	在区间(t_0, t_0+T)($T=2\pi/\omega_0$)上为完备正交函数集	3.2
28	a_n，b_n	傅里叶系数三角形式	3.3
29	$A_n \sim \omega$	为周期信号的单边幅度频谱图	3.3
30	$\varphi_n \sim \omega$	为周期信号的单边相位频谱图	3.3
31	X_n	傅里叶系数指数形式	3.3
32	$\|X_n\| \sim \omega$	为周期信号的双边幅度频谱	3.3
33	$\varphi_n \sim \omega$	为周期信号的双边相位频谱	3.3
34	$X(\omega)=\|X(\omega)\|\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi(\omega)}$	$x(t)$ 的频谱密度 $x(t)$ 的傅里叶变换	3.4
35	$\|X(\omega)\|$ $\varphi(\omega)$	$x(t)$ 的幅度谱 $x(t)$ 的相位谱	3.4
36	$\mathrm{sgn}(t)$	符号函数	3.4

续表

序号	物理量或函数表达式	定　　义	首次出现章节
37	$g_\tau(t)$	宽度为 τ 的门函数	3.4
38	$\delta_{T_s}(t)$	周期为 T_s 的脉冲函数	3.4
39	$H(\omega) = \lvert H(\omega)\rvert e^{j\varphi(\omega)}$	连续系统频率函数	3.7
40	$\lvert H(\omega)\rvert$ $\varphi(\omega)$	系统的幅度谱 系统的相位谱	3.7
41	f	频率变量，取值$[-\infty, \infty]$	3.8
42	$X(f) = \lvert X(f)\rvert e^{j\varphi(f)}$	$x(t)$ 的傅里叶变换	3.8
43	$\lvert X(\omega)\rvert$ $\varphi(f)$	$x(t)$ 的幅度谱 $x(t)$ 的相位谱	3.8
44	$E(f)$	能量谱密度	3.8
45	$\rho(f)$	功率谱密度	3.8
		第 4 章	
46	$s = \sigma + j\omega$ $= \mathrm{Re}[s] + j\mathrm{Im}(s)$	s：复频函数 $\mathrm{Re}[s]$：s 的实部　$\mathrm{Im}(s)$：s 的虚部	4.1
47	$X_b(s)$	$x(t)$ 的双边拉普拉斯变换	4.1
48	$X(s)$	$x(t)$ 的单边拉普拉斯变换	4.1
49	$H(s)$	连续系统的系统函数	4.4
50	$p_i(i = 1, 2, \cdots, m)$	系统函数 $H(s)$ 的零点	4.4
51	$s_i(i = 1, 2, \cdots, k)$	系统函数 $H(s)$ 的极点	4.4
		第 5 章	
52	$z = \lvert z\rvert e^{j}\phi(z)$	复函数 z $\lvert z\rvert$为复函数 z 的模 $\phi(z)$ 为复函数 z 的复角	5.1
53	$X(z)$	$x(n)$ 的 z 变换(双边或者单边)	5.1
54	$H(z)$	离散系统的系统函数	5.4
55	$p_i(i = 1, 2, \cdots, m)$ $z_i(i = 1, 2, \cdots, k)$	系统函数 $H(z)$ 的零点 系统函数 $H(z)$ 的极点	5.4
		第 6 章	
56	N	周期序列的周期	6.1
57	θ	序列的角频率，取值范围为$[0, 2\pi)$或$[-\pi, \pi)$	6.1

续表

序号	物理量或函数表达式	定　　义	首次出现章节
58	W_N^{kn}	$=e^{-j\frac{2\pi k}{N}n}$，$k=0,1,\cdots,N-1$；角频率$\frac{2\pi}{N}$为倍数的复指数单频序列	6.2
59	$X_k=\|X_k\|e^{j\varphi_k}$	X_k 为周期序列 $x(n)$ 的离散傅里叶级数，或 $x(n)$ 的频谱 $\|X_k\|$为 $x(n)$ 的幅度谱和 φ_k 为 $x(n)$ 的相位谱	6.2
60	$x(n)\leftrightarrow X_k$	离散傅里叶级数(DFS)变换对	6.2
61	$X(e^{j\theta})$ $=\|X(e^{j\theta})\|e^{j\varphi(\theta)}$	$X(e^{j\theta})$ 为 $x(n)$ 的离散时间傅里叶变换(DTFT)，或 $x(n)$ 的频谱密度 $\|X(e^{j\theta})\|$为 $x(n)$ 的幅度谱 $\varphi(\theta)$ 为 $x(n)$ 的相位谱	6.3
62	$R_L(n)$	长度为 L 的单位矩形序列	6.3
63	$X(k)=\|X(k)\|e^{j\varphi(k)}$	$X(k)$ 为有限长序列 $x(n)$ 的离散傅里叶变换(DFT) $\|X(k)\|$称为有限序列 $x(n)$ 的幅频特性 $\varphi(k)$ 称为有限序列 $x(n)$ 的相频特性	6.4
64	$g_N(n)$	$=\varepsilon(n)-\varepsilon(n-N)$，长度为 N 的矩形脉冲序列	6.4
65	$x((n-m))_N$	表示对长度为 N 的有限长序列 $x(n)$ 进行圆周右移 m 运算	6.4
66	$H(e^{j\theta})$ $=\|H(e^{j\theta})\|e^{j\varphi(\theta)}$	$H(e^{j\theta})$ 为离散系统的频率函数 $\|H(e^{j\theta})\|$为系统的幅频特性 $\varphi(\theta)$ 为系统的相频特性	6.5
67	$y_{ss}(n)$	系统的稳态响应	6.5
68	δ_p	滤波器带通容限	6.6
69	θ_p	滤波器通带截止频率	6.6
70	δ_s	滤波器阻带容限	6.6
71	θ_s	滤波器阻带截止频率	6.6
72	dB	分贝	6.6
73	θ_c	-3dB 带通截止频率	6.6
		第 7 章	
74	$\boldsymbol{r}(t)$	状态矢量	7.3
75	$\boldsymbol{x}(t)$	输入矢量	7.3
76	$\boldsymbol{y}(t)$	输出矢量	7.3

目　　录

第 1 章　信号与系统的基本概念

信号与系统的概念广泛出现在各种领域中，例如通信、计算机、物联网、电气控制、空气动力学、声学、生物工程、图像处理等领域，这些概念的相关思想和分析方法在这些领域中起着重要作用，虽然在不同领域中所出现的信号和系统的物理性质各不相同，但都具有两个基本共同点：

(1) 信号可用一个或多个独立变量的函数来描述，且该函数包含了有关现象性质的信息；

(2) 系统总是对给定的信号作处理并产生输出信号。

本章将会讲述信号、系统的基本概念，以及信号与系统的相互关系。

1.1　信　　号

1.1.1　信号的定义

信号是运载消息的工具，是消息的载体。从广义上讲，它包含光信号、声信号和电信号等。例如，古代人利用点燃烽火台而产生的滚滚狼烟向远方军队传递敌人入侵的消息，这属于光信号；当我们说话时，声波传递到他人的耳朵，使他人了解我们的意图，这属于声信号；遨游太空的各种无线电波、四通八达的电话网中的电流等，都可以用来向远方表达各种消息，这属于电信号。而以光纤为传输媒介的主干网中，传输的是光信号。人们通过对光、声、电信号进行接收，才知道对方要表达的消息。

随着科学技术的发展，特别是电子技术的发展，人们将各种消息如图像、文字、声音等都转换为电信号(或光信号)进行处理、传输、存储，如手机、电视机、计算机等，所处理的主要是电信号。

如图 1.1.1 所示，麦克风将人的声音转换为随时间变化的电压信号。信号中的电压值反映了人的声音高低变化情况。

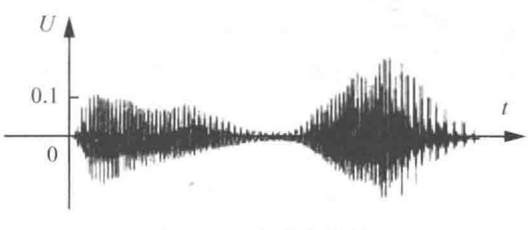


图 1.1.1　声音信号

图 1.1.2 所示信号为调频收音机所接收到的调频信号。信号的频率值反映了所收到的声音高低变化情况。

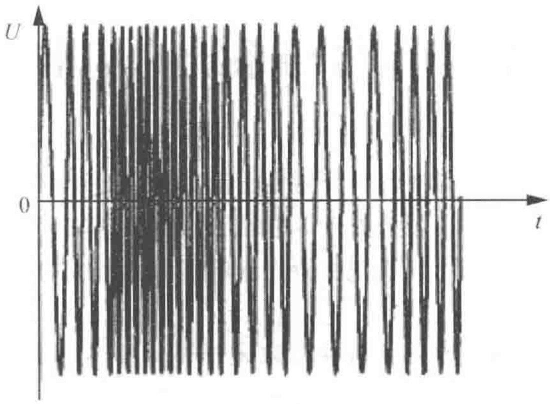


图 1.1.2　调频收音机收到的调频信号

而图 1.1.3 为数字信源产生的随机数字信号。信号中的电压值只有高和低两个电平，高电平表示数据“1”，低电平表示数据“0”，每个电平持续固定时间 T。所传输的数据为“0100111001…”。

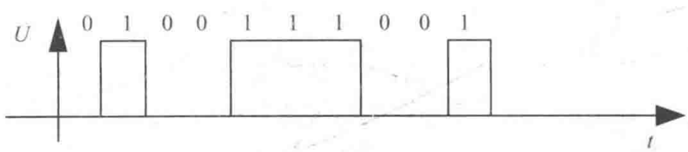


图 1.1.3　数字信源发送的数字信号

这些信号都有一个共同特点，即信号所对应的函数值都随时间 t 的变化而变化。本书中研究的信号其自变量为时间 t。

需要指出的是，信号的自变量不一定是(或不只是) 时间 t，如空气中的压强不仅与季节相关(时间) 还有高度相关。而电阻的阻值只与温度的高低相关。

信号按物理属性分为电信号和非电信号。它们可以相互转换。电信号容易产生，便于控制，易于处理。本书中所讨论的主要是电信号，即随时间变化的电压或电流信号。

1.1.2　连续信号和离散信号

在本书中主要以两种基本信号作用研究对象，即连续信号和离散信号。

1. 连续信号

在连续的时间范围内($-\infty < t < \infty$) 有定义的信号称为连续时间信号，简称连续信号。这里的“连续”指函数的**定义域时间是连续**的，但可含间断点，值域可连续也可不连

续。图1.1.4(a)为值域连续(取值在-1到1之间)的连续信号，图1.1.4(b)为值域不连续(取值只能是1或-1)的连续信号。

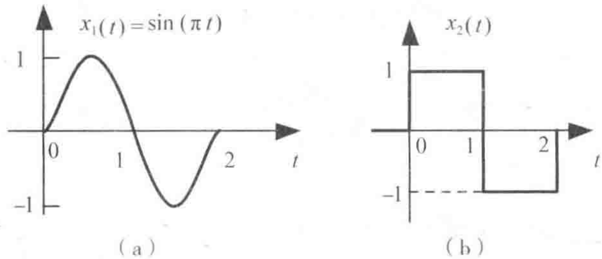


图1.1.4　连续信号

本书中连续信号自变量为 t $(-\infty<t<\infty)$，用 $x(t)$ 表示，简称为函数。对于连续信号，其描述方式一般有两种：

(1) 表示为时间的函数。如振幅为1、频率为2500Hz的单频信号 $x(t)=\cos5000\pi t$。

(2) 用图形表示即信号的波形。频率为2500Hz的单频信号。

其图形如图1.1.5所示，横坐标为时间变量，纵坐标为信号值。

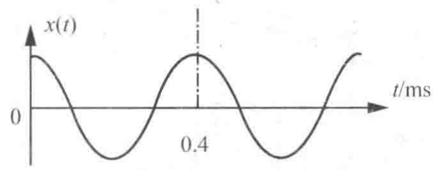


图1.1.5　$x(t)=\cos5000\pi t$ 信号的波形

2. 离散信号

仅在一些离散的瞬间才有定义的信号称为离散时间信号(如取样信号)，简称离散信号。这里的“离散”指信号的**定义域时间是离散的**，它只在某些规定的离散瞬间给出函数值，其余时间无定义。

如图1.1.6(a)所示，信号仅在一些离散时刻 $t_n(n=0,\ \pm1,\ \pm2,\cdots)$ 才有定义，其余时间无定义。相邻离散点的间隔 $T_n=t_{n+1}-t_n$ 通常取等间隔 T，离散信号可表示为 $x(nT)$，简写为 $x(n)$，则图1.1.6(a)可简化为图1.1.6(b)。

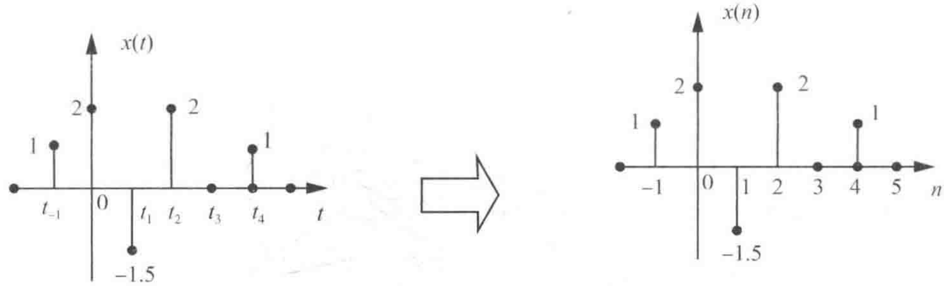
本书中离散时间信号的自变量为 n（n 为整数，取值为0，±1，±2，$\cdots$），用 $x(n)$ 表示，简称为序列，其中 n 称为序号。

离散序列描述有三种形式：

(1) 函数表示。如序列 $x(n)=2^n$。

(2) 图形描述。如图1.1.6(b)所示，描述了一个离散序列。

(3) 列举形式。图1.1.6(b)描述序列的列举形式为

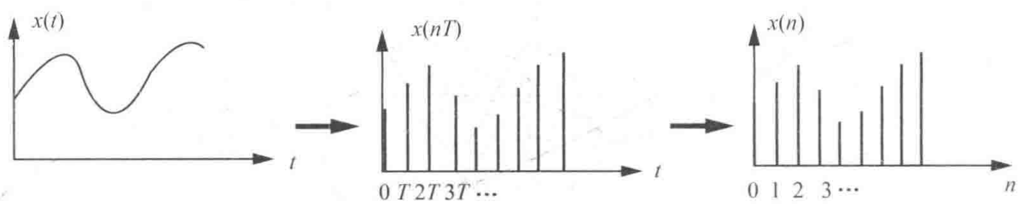


（a）离散序列（自变量为时间t）　（b）离散序列$x(n)$

图 1.1.6　离散序列

$$x(n)=\{\cdots,\ -1,\ \underset{\uparrow}{\overset{n=0}{2}},\ -1.5,\ 2,\ 0,\ 1,\ 0,\ \cdots\}$$

连续信号和离散信号可相互转换。如单片机、计算机等数字设备处理连续信号时，需先将其转换为离散信号，当单片机在检查环境温度时，先要将温度传感器的连续信号进行取样，取样时间间隔为 T，经过取样后，单片机所处理的就是离散的信号了，具体过程如图 1.1.7 所示。



（a）连续温度信号　（b）取样　（c）离散信号

图 1.1.7　连续信号转换为离散信号的过程

连续信号与离散信号统一表示为 $x(\cdot)$，可表示连续信号也可表示序列。

1.1.3　模拟信号和数字信号

模拟信号的**信号值是连续变化的**，如温度、湿度、压力、长度、电流、电压等，通常又把**模拟信号称为连续信号**。

而数字信号的**信号值是离散的**，如计算机中的二进制信号，通常**将数字信号称为离散信号**。

从定义看，连续信号和离散信号的划分依据是**自变量**时间 t 是连续还是离散的，而模拟信号与数字信号的划分依据是**信号值**是连续还是离散的。在实际处理的信号中，模拟信号的自变量 t 是连续的，信号值也是连续的，因而可以将**模拟信号称为连续信号**；而数字信号的自变量 t 是离散的，信号值也是离散的，因而可以将**数字信号称为离散信号**。如我们学过的《模拟电路》以模拟信号(或连续信号) 作为分析对象；而《数字电路》以数字信

号(或离散信号)作为分析对象。

1.1.4　信号的分类

根据信号的不同特点，可将信号进行不同的分类：除了连续信号和离散信号，模拟信号与数字信号外，还可以分为确定信号和随机信号，周期信号和非周期信号，能量信号和功率信号，离散信号和随机信号等。

1. 确定信号和随机信号

可以用确定时间函数表示的信号，称为确定信号或规则信号，即信号的值与定义域时间一一对应。

若信号不能用确切的函数描述，它在任意时刻的取值都具有不确定性，只可能知道它的统计特性，如在某时刻取某一数值的概率，这类信号称为随机信号或不确定信号。电子系统中的起伏热噪声、雷电干扰信号就是两种典型的随机信号。图1.1.8为示波器观察到的收音机接收到的噪声信号，每个样本值($\xi_1(t)$，$\xi_2(t)$，$\xi_3(t)$，…)是不相同的。

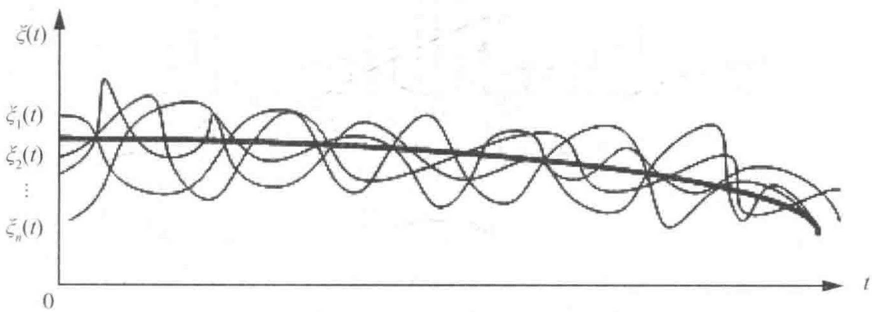


图 1.1.8　收音机中的随机信号

现实生活中大多数信号是随机的，如：大气温度的变化，人的声音信号，计算机发送的二进制信号等，这些信号是无法提前预测的，不能用具体的函数或图形表示，但可用统计特性来描述，如用概率密度或概率等来描述。

在“信号与系统”这门课程中，随机信号与确知信号的分析方法基本一致，本书中主要讨论确定信号。

2. 周期信号和非周期信号

幅值随时间重复变化的信号称为周期信号，可分为连续周期信号和离散周期序列。

连续周期信号 $x_T(t)$ 的周期为 T(T 为正数)，则满足：

$$x_T(t)=x(t+mT)\quad (m=\pm1,\ 2,\ 3,\ \cdots) \tag{1.1.1}$$

如图 1.1.9 所示为周期正弦信号和方波信号，其周期分别为 2 和 T。

周期序列 $x_N(n)$ 的周期为 N(N 为正整数)，则满足

$$x_N(n)=x(n+mN)\quad (m=\pm1,\ 2,\ 3,\ \cdots,\ N\text{ 为正整数}) \tag{1.1.2}$$