通 信 論 原 理 导 引

J. C. 汉科克　著
陈　太　一　譯
曹　繒　生　校

J. C. Hancock

AN INTRODUCTION TO

THE PRINCIPLES OF COMMUNICATION THEORY

McGraw-Hill Book Co., 1961

内容簡介

本书討論通信論的基本原理。全书計分七章。第一章介紹富氏級数，富氏分析，离散和連續譜及抽样原理。第二章引入信号噪声比概念，并討論調制和检波。第三章引入概率的概念，討論离散和連續随机变量、矩、概率密度函数、自相关函数和譜密度。第四章討論确知信号和随机信号作用于綫性网絡和綫性包絡检波器的分析以及最佳系統。第五章介紹信息論的基本概念，討論离散与連續信源和信道。第六章較詳細地討論噪声。第七章在以前各章的基础上对各种通信系統进行比較，并簡要地討論雷达系統。

本书对象为高年級大学生和从事通信工作的工程技术人員。

通信論原理导引

著　者：（美国）J. C. 汉　科　克
譯　者：陈　太　一
校　者：曹　緇　生
出版者：人民邮电出版社
北京东四6条13号
（北京市书刊出版业营业许可证出字第〇四八号）
印刷者：北京市印刷一厂
发行者：新华书店

开本 850×1168 1/32　　1964年12月北京第一版
印张 8 20/32　页数 138　　1964年12月北京第一次印刷
印刷字数 227,000 字　　印数 1—3,150 册

統一书号：15045・总1429—无406

定价：（科6）1.30元

譯者的話

通信論，或非广义意义下的信息論，是无綫电电子学領域中的一个新的分支。它是在多年来通信技术发展的基础上、运用概率論数理統計等数学工具建立起来的一門新的学科。自柯捷里尼科夫，香农，維納等人从不同的角度探討通信的統計理論以来，在不到二十年的时間中，信息論得到了迅速的发展，并促进了其他有关学科的进展。

通信論的任务之一是研究通信的客观規律。由于在通信系統中所传輸的消息是随机的；系統中的噪声是随机的；甚至某些用来传送信号的信道的参量也是随机的，因而只有在把概率論数理統計应用来研究通信問題后，才能更好地理解通信的过程。

通信論的另一任务是根据和运用通信的客观規律来改进和設計通信系統。应該說，在短短的二十年中，这方面的成就是可观的。

通信論中的主要問題可归納为下面几个方面：

1．信息源統計特性的研究。

2．噪声源統計特性的研究。

3．信道統計特性的研究。

4．最佳接收理論的研究。

5．信号設計(包括調制)的研究。

通信論还是一門年青的学科，目前在上述各方面所取得的成就，还远远不能滿足实际需要。

在研究和設計最佳通信系統时，常須首先确定衡量系統性能的准則。在传輸連續消息时，常常希望接收机恢复的消息与原始消息間的均方誤差为最小，此称为最小均方誤差准則。在传輸离散消息时，常常希望錯誤概率为最小，即最小錯誤概率准則。若根据系統中传輸的信息量的多少来衡量系統的优劣，則称为信息准則。

由于所采用的准則不同，通信論在发展过程中形成了不同的学

派。

1946年苏联学者卡捷里尼可夫根据最小錯誤概率准則和最小均方誤差准則发表了离散消息和連續消息的最佳接收問題的研究成果。总地說来，他所研究的是在正态起伏噪声干扰下恒参量信道中的統計接收問題，并且沒有考慮最佳接收机的綜合問題。十多年来，統計接收理論的发展是十分迅速的，伍特瓦德把理論推广到研究随机参量信道中的最佳接收問題。密德尔頓等人又作了新的发展。

1948年香农发表了通信的数学理論。他是根据信息准則来研究最佳通信系統問題。同年維納发表了根据最小均方誤差准則研究信号的过濾与預測問題，这些著作都大大丰富了通信論的內容。

随着通信論的发展，在国內外大学的有关专业中均陆續开設通信論选修課或必修課，汉科克所著"通信論原理导引"就是这門課的教材中一本較好的著作。它較全面地介紹了通信論的几个基本方面，在系統性和教学法方面都是比較好的。

本书的一、二两章，簡要地复习了經典的通信理論，从第三章到第五章討論了通信統計理論的有关方面，最后一章則运用前面的知識来比較各种通信系統并簡要地介紹了雷达系統。

这不是一本深入探討信息論或通信系統方面的专門著作，所討論的材料是基本的，但有这样一个基础，頗有助于閱讀有关的专門书籍。在閱讀本书后，希望进一步获得有关知識时，向讀者建議几本中文参考书如下：

一、在随机信号理論方面，可参看：

兰宁、白亭著：自动控制中的随机过程（涂其冽譯，科学出版社）。

二、在网絡分析方面，可参看：

錢学森著：工程控制論（科学出版社），

兰宁、白亭著：自动控制中的随机过程。

三、在基本信息論方面，可参看：

蔡长年、汪潤生著：信息論（人民邮电出版社），

张宏基：信息論基础（北京科学教育出版社）。

四、在通信系統方面，可参看：

柯捷里尼可夫著：潛在抗干扰理論（黃均鋆譯，科学出版社）。

最后，由于时間仓促，水平有限，誤譯之处，敬請讀者指正。全部譯稿由曹緖生同志校閱，汪漱玉同志校閱了其中两章，一併致謝。

譯者

一九六四年三月

前　言

在过去十年中，电机工程系的訓练計划經历了重大的变化。不多几年之前复頻率的概念还仅对研究生讲授。运算微积、网絡綜合和許多其它題目也是这样。但在今天，这些題目却形成了电机工程系二、三年級許多必修課的核心。現在我們正目睹着进一步的变化。有些課題如概率論、非确知时間函数、噪声和基本信息論，正在設法納入大学本科計划。今天，某些学校要求一門二年級水平的概率論課程，但仍有些学校把概率概念的介紹作为由工程教师讲授的工程課程的一部分。本书是以大学本科水平介紹概率方法、噪声和信息論的基本概念的一次尝試。

这不是一本通信系統方面的专著，所討論的材料是基本的。虽然例子和应用偏重于通信方面，但可同样应用到其它有关領域。

本书开始簡短地复习富氏級数、富氏变换、离散和連續譜，幷給出适当的例子。重点放在頻率搬移。把抽样作为富氏变换的应用提出幷着重于抽样信号重建时引入的誤差类型。第二章把調制和检波作为頻率变换的例子来处理，从初等观点介紹信号噪声比的概念，而暂不詳細討論噪声源；然后把这些概念应用于通信系統的簡化信号噪声比的分析，把相干对非相干检波作为重点。不仅討論了常用的通信系統（如調幅和調頻），还提出脉冲調制作为抽样的一种应用。这一章以脉碼調制結束。

第三章应用样本空間方法介紹了概率的概念。所討論的題目包括离散和連續随机变量、統計独立、矩、概率密度函数、自相关函数和譜密度。引用了很多例子来闡明理論的含义。第四章是由复习应用富氏变换的稳态电路分析开始，然后討論了輸入为非确知时、綫性网絡的輸入—輸出关系問題。还考虑了綫性包絡检波器。这一章最后討論了最佳綫性系統，其中包括匹配滤波器和最小均方誤差系統。

第五章介紹信息論的基本概念。討論了离散和連續信息源及信道。本章在比較各通信系統的信息效率时援引了第二章中的許多材料。第六章較詳細地討論了噪声的概念。討論噪声源时側重于簡单噪声模型。并討論了噪声系数、有用增益和最佳噪声电路。

在第七章中把第二、四和五章中的材料連系到一起。在信号噪声比的基础上，对各种通信系統做了比較。討論了雷达系統。还討論了雷达方程、虛警和检測問題。本章以空对地导航雷达的多普勒回波譜的研究結束。

J. C. 汉科克

目　　录

第一章　頻率域和时間域

1.1 引　　言

通信系統的用途是传送信息。一个完整的系統包括发射机、传送信息的信道和用以恢复信息的接收机。信道可能是象电話系統中的一对导綫，常用于电視传輸的同軸电纜或波导，或者是无綫电传輸中的大气层。往往有通常被叫做噪声的不需要的扰动，在信道或接收机前級迭加到发送的信号之上。不幸的是在系統中这些地方，信号电平常常是很微弱的，噪声电压虽然很小，却有信号的同一数量級。結果接收机恢复信息可能发生困难，因而存在着从不需要的干扰中分辨出发送信号来的問題。

例如发送的信息是一个宽度为 Δt 的矩形脉冲，恢复后的脉冲可能有如图 1.1-1 所示的波形。若調整系統的参数使所得到的結果如图中第一种情况，則要識别待恢复的信息是不困难的。但在第二种情况噪声淹沒了信号，在时間域中进行检测是困难的。但我們知

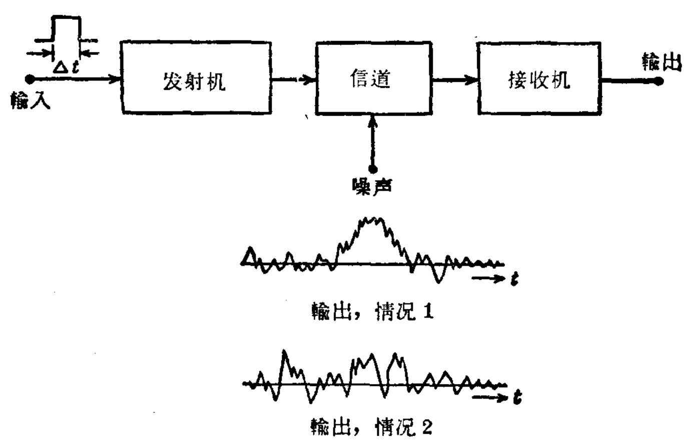

图 1.1-1　通信系統

道与每个时間函数相联系，有着許多惟一地相关的頻率。对于許多类型的信号来說，信号恢复問題可由这些頻率的知識而得到簡化，特别是当噪声的頻率和信号的頻率不同时，尤其如此。

为了有效地处理問題，工程师不仅要熟悉时間域中的分析，他还必須能在頻率域中进行工作。分析不能完全局限于上升时間、突峰等等，还应該把这些量和带寬联系起来。一般說来，頻率域是工程問題的一个重要方面。

在这一章中将复习一下当时間函数可以表达成一个数学显函数时，从时間域变换到頻率域的方法。变换可用熟知的富氏級数或和它密切相联系的富氏变换来完成。其次将应用这些方法于典型的通信信号，从而确定对系統带寬的要求。然后把能量和譜密度与富氏級数及富氏变换联系起来。最后将討論在通信系中日益起作用的抽样問題，并側重在工程近似方面。

1.2 离 散 譜

若时間函数 $f(t)$ 是周期的并满足特定条件，则在頻率域中可用无穷多个正弦分量来表示它，其中每个分量与基頻諧和地相关。每个頻率分量的大小和相对相位由 $f(t)$ 的富氏級数展开式确定。任何定义在 0 到 T（这儿 T 是周期）区間的时間函数 $f(t)$，如满足下列条件

$f(t)$ 是周期的，即 $f(t)=f(t+T)$；

$f(t)$ 具有有限个不連續点；

$\int_{-T/2}^{T/2}|f(t)|dt$ 存在，

则可用富氏級数展开。函数 $f(t)$ 的富氏級数展开式常写成下列形式：

$$f(t)=\frac{a_0}{T}+\frac{2}{T}\sum_{n=1}^{\infty}(a_n\cos n\omega_0 t+b_n\sin n\omega_0 t) \qquad (1.2\text{-}1)$$

其中
$$a_n=\int_{-T/2}^{T/2} f(t)\cos n\omega_0 t dt \tag{1.2-2}$$
$$b_n=\int_{-T/2}^{T/2} f(t)\sin n\omega_0 t dt \tag{1.2-3}$$
$$a_0=\int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \tag{1.2-4}$$

ω_0 为基頻，即 $\omega_0=2\pi/T$。在对頻率分量的大小感兴趣时，往往采用富氏級数的指数形式比較方便。把正弦和余弦的指数形式代入(1.2-1)式，得到

$$f(t)=\frac{a_0}{T}+\frac{2}{T}\sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{a_n}{2}(e^{jn\omega_0 t}+e^{-jn\omega_0 t})+\frac{b_n}{2j}(e^{jn\omega_0 t}-e^{-jn\omega_0 t})\right] \tag{1.2-5}$$

或
$$f(t)=\frac{a_0}{T}+\frac{2}{T}\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{a_n+jb_n}{2}e^{-jn\omega_0 t}+\frac{a_n-jb_n}{2}e^{jn\omega_0 t}\right) \tag{1.2-6}$$

令 c_n 为复数
$$c_n=a_n-jb_n,\quad c_{-n}=a_n+jb_n \tag{1.2-7}$$
按定义，则(1.2-6)式簡化成
$$f(t)=\frac{1}{T}\sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t} \tag{1.2-8}$$

其中
$$c_n=\int_{-T/2}^{T/2} f(t)e^{-jn\omega_0 t}dt \tag{1.2-9}$$

从(1.2-8)式可見，**一个周期时間函数包含了与基頻諧和地相关的所有頻率(正頻率和負頻率)**，每个分量的大小等于$|c_n/T|$。虽然負頻率是虛拟的，但可通过把一正弦波表为二矢量之和来考虑它們，其中一个矢量順时針向旋轉，另一个逆时針向旋轉。若正弦波的頻率是 ω_0 弳/秒，則一个矢量以 ω_0 弳/秒的速度旋轉，另一个矢量以 $-\omega_0$ 弳/秒的速度旋轉。于是一个可实現的正弦波包含了一个正頻率分量和一个負頻率分量。为了說明上述原理的应用，将討論两个例子。

例 1.2-1

一个周期等于 T 的周期时間函数 $f(t)$ 規定如下：

$$f(t)=0 \qquad 0\leqslant t<t_1$$
$$f(t)=E \qquad t_1\leqslant t\leqslant t_2$$
$$f(t)=0 \qquad t_2<t\leqslant T$$

立即可知，$f(t)$ 在頻率域中可用頻率为 0，$1/T, -1/T, 2/T, -2/T, \cdots$，等分量表示。

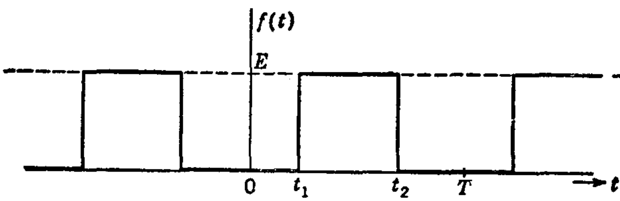

图 1.2-1 周期脉冲列

它的一般項是 n/T，其中 $-\infty<n<\infty$。在計算每个頻率分量时可先求 c_n；于是

$$c_n=\int_{t_1}^{t_2} Ee^{-jn\omega_0 t}dt \qquad (1.2\text{-}10)$$

或

$$c_n=\frac{E}{n\omega_0}\left(\frac{e^{-jn\omega_0 t_2}-e^{-jn\omega_0 t_1}}{-j}\right)$$

令脉冲寬度等于 Δt，我們有

$$t_2=t_1+\Delta t$$

故，

$$c_n=\frac{E}{n\omega_0}e^{-jn\omega_0 t_1}\left[\frac{1-e^{-jn\omega_0\Delta t}}{j}\right] \qquad (1.2\text{-}11)$$

若将 $e^{-jn\omega_0\Delta t/2}$ 括出来，則括号內的項可看出是 $\sin n\omega_0\Delta t/2$ 的指数形式。于是

$$c_n=E\Delta t\frac{\sin n\omega_0\Delta t/2}{n\omega_0\Delta t/2}e^{-j(n\omega_0 t_1+n\omega_0\Delta t/2)} \qquad (1.2\text{-}12)$$

現在可以把 $f(t)$ 的富氏級数的全指数形式写成

$$f(t)=\frac{E\Delta t}{T}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\frac{\sin n\omega_0\Delta t/2}{n\omega_0\Delta t/2}e^{j(n\omega_0 t-\varphi)} \tag{1.2-13}$$

其中
$$\varphi=n\omega_0\left(t_1+\frac{\Delta t}{2}\right) \tag{1.2-14}$$

因为每个频率分量的电压振幅等于 $|c_n/T|$，故有时希望繪出 $|c_n|$ 和頻率的关系曲綫。因为仅有离散頻率(即 n/T)，故所繪結果常称为綫状譜。

如将
$$|c_n|=E\Delta t\frac{\sin n\omega_0\Delta t/2}{n\omega_0\Delta t/2} \tag{1.2-15}$$

繪出，即得图 1.2-2。$|c_n|$ 的零点在$\frac{\sin n\omega_0\Delta t/2}{n\omega_0\Delta t/2}$为零处求得，即当

$$\frac{n\omega_0\Delta t}{2}=k\pi,$$

其中　$k=1,2,\cdots,\infty$。于是

$$\frac{n}{T}=\frac{k}{\Delta t} \tag{1.2-16}$$

注意满足这个关系所要求的n值不一定要是整数，故在$n/\Delta t$处可以是也可以不是諧波。

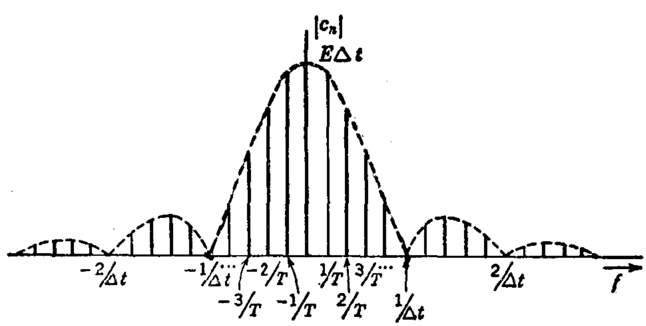

图 1.2-2　周期脉冲列的頻譜

从这个例子，值得指出几个重要的結果：

1．因为$|c_n|$和t_1无关，故将$f(t)$作时間平移，并不会影响各频率的振幅。

2．任何給定分量的頻率仅和周期T有关，并非脉冲寬度Δt的函数。

3．譜的包絡是熟知的$\sin x/x$形式。

4．若以譜的第一个零点之間的距离作为頻譜寬度的量度，则时間函数的带寬是脉冲寬度Δt的函数，而和周期无关。

前面这个例子中求得的电压譜的物理解释是很重要的。譜基本上决定了为了很好地重現或恢复所要求的信号带寬，此外它还有助于解决从一个不需要的信号中分辨出所需要的信号的問题。例如設不需要信号是随机噪声，可以証明它有一个在所有頻率相当平坦的电压頻譜。若把这个非所需信号迭加在例1.2-1所給的脉冲信号上，根据前述結果，需要用怎样的滤波器来从噪声中区分出脉冲信号是很明显的。只让$0, 1/T$，$-1/T$，$2/T$，$-2/T$，$\cdots n/T$等頻率通过的滤波器将滤除絕大部分噪声而让信号通过。这一类滤波器由于它的齿状通带特性而称为梳齿滤波器。若波形的周期很大，则使得各諧波之間的間隔很小；或者如果周期不太稳定，从实用观点来看，梳齿滤波器的設計和結构可能是不够满意的。也許下一个选择是一个能通过最高頻率約为$1/\Delta t$赫的低通滤波器。关于各种滤波器的相对优缺点，将在第四章中討論。

例 1.2-2

为了进一步說明富氏級数的某些有用性质，考虑下列周期时間函数：

$$
\begin{aligned}
f(t) &= 0 & -T/2 \leqslant t < -\Delta t/2 \\
f(t) &= E\cos\omega_1 t & -\Delta t/2 \leqslant t \leqslant \Delta t/2 \\
f(t) &= 0 & \Delta t/2 < t \leqslant T/2
\end{aligned}
$$

計算c_n，我們有

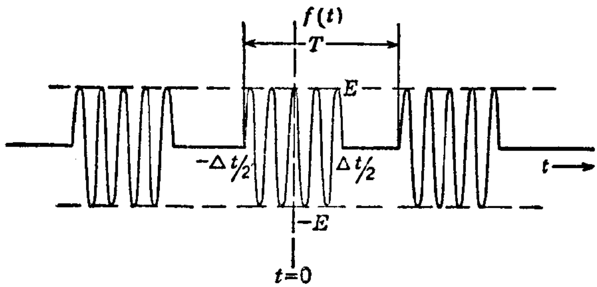

图 1.2-3 脉冲射频波

$$c_n=\int_{-\Delta t/2}^{\Delta t/2} E\cos\omega_1 t e^{-jn\omega_0 t}dt \qquad (1.2\text{-}17)$$

經計算后可得

$$c_n=\frac{E}{2}\left[\frac{e^{j(n\omega_0-\omega_1)\Delta t/2}-e^{-j(n\omega_0-\omega_1)\Delta t/2}}{j(n\omega_0-\omega_1)}+\right.$$

$$\left.+\frac{e^{j(n\omega_0+\omega_1)\Delta t/2}-e^{-j(n\omega_0+\omega_1)\Delta t/2}}{j(n\omega_0+\omega_1)}\right]$$

或

$$c_n=\frac{E\Delta t}{2}\left[\frac{\sin(n\omega_0-\omega_1)\Delta t/2}{(n\omega_0-\omega_1)\Delta t/2}+\frac{\sin(n\omega_0+\omega_1)\Delta t/2}{(n\omega_0+\omega_1)\Delta t/2}\right] \qquad (1.2\text{-}18)$$

在求各頻率分量的量值时，我們首先观察到当 $n\omega_0\simeq\omega_1$ 时，(1.2-18)式的第二項变成可以忽略不計；而在 $n\omega_0\simeq-\omega_1$（假設 ω_0 很大）时第一項可以忽略不計。(1.2-18) 式的形式除了把 $n\omega_0$ 换成 $(n\omega_0-\omega_1)$ 和 $(n\omega_0+\omega_1)$ 外和例 1.2-1 中所得到的譜完全一样。故等于把原来的譜在頻率上进行平移。本例的頻率分量和它們的量值如图 1.2-4所示，其中 c_n 不是复数。若把时間函数在时間上移动使得它对 $t=0$ 不再保持对称时，对应于这个移动，c_n 将含有一个附加相位項。另外，若需估計譜的寬度，仍可选择譜的两个第一零点間的距离。因此，用以放大脉冲射頻信号的放大器的带寬应取为$2/\Delta t$赫。故一个 1 微秒的射頻脉冲周期序列大約要求 2 兆赫的带寬。