

[美] F·G·斯特瑞姆勒著

INTRODUCTION TO
COMMUNICATION
SYSTEMS

Ferrel G. Stremier

Addison-Wesley Publishing Company

1977

内 容 提 要

本书原著是作者讲授通信系统已经用过几次的教材。在介绍通信系统时，重点是讨论信号设计，除了讨论模拟和数字的各种调制方式以外，还介绍了卫星遥测、雷达、广播、电视和电话系统等方面的应用。内容阐述深入浅出，理论联系实际，并引用了较多的实例，易于阅读。因而不仅是一本较好的教学参考书，也适用于工程技术人员自学阅读。

本书的读者对象是通信、广播、电视等专业的科技人员，大专院校有关专业的师生。

通 信 系 统 导 论

[美]F.G.斯特瑞姆勒 著

熊秉群 张秋霞 等译

杨自辰 黄庚年 校

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

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 1983年12月 第 一 版

印张：19 8/32 页数：308 1983年12月河北第一次印刷

字数：507 千字 印数：1—6,000 册

统一书号：15045·总2709—有5289

定价：2.95 元

序 言

这本教科书的目的是给大学生介绍通信系统，其重点是信号设计。因此，在编写方法上注意数学原理的推导，并且在只要可能的地方都附有当代通信系统的实例。此外，书中还尽力包括各种不同的应用，其范围从卫星遥测和雷达到民用广播和电话系统。

第二章和第三章是对线性系统分析所需要的一些傅里叶方法的内容进行复习，特别着重复习对以后各章有用的一些傅里叶性质。这两章的重点是复数符号法的运用及用相量与频谱表示的解释。必需的先修课程是积分学。如果读者已学过电路分析或线性系统分析课程当然是有好处的，但并不是必不可少的。

傅里叶系数的数值计算和离散的以及快速傅里叶变换越来越广泛地在计算技术和信号处理中获得应用。这些方法在第二章和第三章中都要简要地加以讨论，打算用数值方法求解的习题也在习题前边标上了字头“C”。

第四章至第七章的内容是通信系统原理的介绍。这些内容是按大学程度讲课的基础编写的，一些比较抽象的概念都配有当代实际使用的例子，以便引起学生的兴趣。因此，这几章首先是关于噪声的初步讨论，然后再进行幅度、角度和脉冲调制的讨论。这样就避免用一、两章篇幅完全去作信噪比的计算，而那种安排很难使学生感到有兴趣。

本书的第一部份是设想学生没有概率论的知识，而不用概率论讲述基本内容的方法则有助于把重点放在通信系统方面。这种处理方法到第七章结束，而从确定信号的观点来讲授的内容也在该章终止。对那些认为头几章只是一种复习的学生来说，可以把时间用于研究最后两章的内容。

第八章是介绍概率论和随机过程的内容，以这种方式把它提出来，是为了能很快地进入到概率密度函数，以及把它用来分析通信系统。第九章是在这一基础上讨论通信中某些更为高深的题材。在读完第九章后，希望学生们能对运用统计概念研究较高深的通信理论课程发生兴趣。为了引起学生们的兴趣和增添背景知识的广度，附录中包括了民用无线电及电视传输以及当代的信号压缩系统。

本书内容的组织是打算让大家在题材的选择和讲述方法上有最大的灵活性。即使第一至第三章和第八章是一个复习材料，整个材料也足够有一学期课程用的内容。如果前几章的内容都是新的，可以删去后面几章中一些可供挑选的内容和（或者）不包括概率论方面的内容来进行调整。在各章中可供挑选的材料均以★号标出。

因为本书是大学生使用的，所以书中的内容尽可能地写得完整一些，并用图或例子解释清楚。还不断地采用例题和练习题，目的是启发学生更加积极地去学习。在每章末的习题是按节号编排的，以便学生在遇到困难时可参考有关各节的内容。此外，只要有可能的地方，都用例题和习题来说明当前的一些实际问题。

由于书中有演示的例题，后面又附有练习题和答案，这些材料容易成为学生按部就班自学的指南。书中还在每章末尽力提供广泛选择的习题，并通过适当安排习题的方法来对内容的讲述水平作相当的调整。有习题解答手册可供参考，向出版者函索即寄。

在每章末列有推荐的辅助读书刊目录。所列出的书籍都经过仔细选择，对大学生来说这些书都是值得一读且不难理解的。这些书大体上是按难度增加的程度排列的。专门课题的参考文献通常在正文的脚注中给出。

本教材第四至第九章的内容，在简要复习第二至三章的基础上，并在选讲各节的多数删去以后，在麦迪逊（*Madison*）的威斯康星（*Wisconsin*）大学安排是用一学期的课程，已经讲过几学期。在讲授这些材料时，我们发现使用录像磁带演示一些通信系统并且联系其原理来讲解是有益的。

我很感激那些给我以忠告和帮助的人。我感谢我的同事们、助教和学生所提出的关于本书的严密性与清晰性所作的一些评论与建议，特别是，我要感谢 *W.P. Birkemeier* 和 *A.B. Fontaine* 教授、*R.R. Mielke* 博士、*T.J. Higgins* 和 *A.T. Tiedemann* 教授，他们对本书的一些章节提出了评论。我很感谢 *Syracuse* 大学 *David* · 郑、麻省理工学院的 *Lenard · Gould* 以及宾夕法尼亚大学的 *Fred · Haber* 等教授的帮助，给予评论和有益的批评。我也十分感谢国家海洋和大气局通过水下空间科学与工程中心的研究工作给予的支持以及研究生给予的帮助。

我还要对我的妻子的衷心支持以及帮助打字和校对原稿表示谢意。

F.G 斯特瑞姆勒 (*Stremler*)

1976年11月

于威斯康星州麦迪逊

译 序

这是一本关于介绍通信系统基本原理的教科书。在内容和体系上和一般通信系统的书籍大体相似，但它的特点是尽量避免使用较多的数学，在必要使用的地方也力求与实际应用结合起来。所以只要具有基本的高等数学知识的读者都能按该书体系自学或作为教学参考书。

书中附有较多的例题和练习题，每章末还有习题，所有这些对加深读者理解该书所讲述的内容是有益的。

书的最后还有一些附录，这对扩充有关实际通信系统的知识也有所帮助。

此外，该书对问题的叙述由浅入深，易于理解。综上所述，该书不失为一本较好的教学参考书和自学的书籍。

在翻译过程中，我们发现了一些错误，都加上了译者注予以改正。

本书是集体翻译的、参加翻译的同志有：熊秉群（序言及第六章），张秋霞（第八章），吴善培（第四章），金惠文（第三章、附录E-G），胡孝恩（第九章、附录H-I），王玉良（第二章），沈宗惠（第七章），高凤英和董秀荣（第五章），张桂芝（第一章、附录A-D）。由杨自辰、黄庚年二同志负责审校。

由于我们的水平有限，书中的错误和缺点恐难免，请读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 信号和系统	(1)
1.2 信号分类	(3)
1.3 系统的分类	(6)
1.4 通信系统的概述	(7)
1.5 小结	(10)
第二章 正交性和信号表示方式	(12)
2.1 信号与矢量	(12)
2.2 正交函数	(14)
2.3 正交函数组的选择	(21)
2.4 频率传递函数	(23)
2.5 指数傅里叶级数	(26)
2.6 复数信号及其表示法	(29)
2.7 三角傅里叶级数表示法	(33)
2.8 周期性的开拓	(37)
2.9 功率信号的帕什伐尔定理	(39)
2.10 周期信号的稳态响应	(40)
2.11 谐波的产生	(42)
2.12 傅里叶频谱与例子	(44)
★2.13 傅里叶系数的数值计算	(51)
★2.14 混淆项的影响	(54)
2.15 奇异函数	(60)
2.16 冲激响应	(66)
★2.17 傅里叶级数的收敛性	(67)
2.18 小结	(70)
习题	(72)
第三章 傅里叶变换和应用	(82)

3.1	整个时间坐标上的非周期函数的表示方法	(82)
3.2	频谱密度函数	(85)
★3.3	具有傅里叶变换的条件	(87)
3.4	能量信号的帕什伐尔定理	(88)
3.5	含有冲激函数的若干傅里叶变换	(89)
3.6	傅里叶变换的若干性质	(97)
3.7	某些卷积关系式	(110)
3.8	卷积的图解说明	(114)
3.9	线性系统的滤波特性	(115)
3.10	系统的带宽	(118)
3.11	无失真传输的要求	(119)
3.12	滤波器的时间响应	(120)
3.13	抽样定理	(125)
★3.14	抽样中的混淆效应	(130)
★3.15	离散傅里叶变换	(133)
★3.16	快速傅里叶变换	(141)
3.17	小结	(145)
	习题	(148)
第四章	功率谱密度	(158)
4.1	能谱密度	(158)
4.2	功率谱密度	(163)
4.3	噪声的时间平均值表示法	(172)
4.4	有限带宽白噪声	(179)
4.5	相关函数	(195)
4.6	小结	(200)
	习题	(202)
第五章	幅度调制	(208)
5.1	抑制载波的幅度调制	(208)
5.2	大载波的幅度调制 (AM)	(230)
5.3	频分制多路复用 (FDM)	(241)
5.4	单边带 (SSB) 调制	(247)

5.5	残余边带调制	(259)
5.6	各种幅度调制系统中噪声的影响	(261)
5.7	传播效应	(267)
5.8	各种AM系统的比较	(270)
5.9	小结	(271)
	习题	(273)
第六章	角度调制	(285)
6.1	调频 (<i>FM</i>) 及调相 (<i>PM</i>)	(285)
6.2	窄带 <i>FM</i>	(288)
6.3	宽带 <i>FM</i>	(293)
6.4	角度调制波形的平均功率	(308)
6.5	相位调制	(310)
6.6	宽带 <i>FM</i> 信号的产生	(312)
6.7	<i>FM</i> 信号的解调	(318)
6.8	<i>FM</i> 信号接收中的信噪比	(336)
6.9	<i>FM</i> 中的门限效应	(343)
6.10	采用去加重方法对信噪比的改善	(346)
6.11	小结	(350)
	习题	(352)
第七章	脉冲调制	(359)
7.1	脉冲幅度调制 (<i>PAM</i>)	(360)
7.2	时分制多路复用 (<i>TDM</i>)	(365)
7.3	其它型式的模拟脉冲调制 <i>PWM</i> 和 <i>PPM</i>	(376)
7.4	模拟脉冲调制的信噪比	(384)
7.5	脉冲编码调制 (<i>PCM</i>)	(388)
7.6	匹配滤波器	(399)
7.7	匹配滤波器码字检测	(406)
7.8	小结	(410)
	习题	(411)
第八章	概率和随机变量	(420)
8.1	概率	(420)

8.2	条件概率和相互独立性	(424)
8.3	随机变量和累积分布函数	(426)
8.4	概率密度函数	(430)
8.5	统计平均值	(434)
8.6	若干概率分布	(441)
8.7	直方图	(449)
8.8	随机变量的变换	(451)
8.9	联合密度函数和条件密度函数	(454)
★8.10	随机变量间的相关性	(457)
8.11	二元高斯分布	(459)
8.12	随机过程	(461)
★8.13	自相关函数和功率谱	(467)
★8.14	功率谱的数值计算	(471)
8.15	小结	(476)
	习题	(478)
第九章	信息与数据传输	(486)
9.1	信息的量度	(486)
9.2	信道容量	(491)
9.3	带宽和信噪比的最佳互换	(494)
9.4	PCM与最佳传输系统的比较	(495)
9.5	量化噪声	(496)
9.6	数字通信—基带分析	(502)
9.7	数字调制系统	(518)
★9.8	数字波形的表示法	(533)
★9.9	最佳检测算法	(536)
9.10	小结	(542)
	习题	(544)
附 录		(551)
A	选用的数学表	(551)
B	分贝	(555)
C	无线电广播波段	(556)

D	民用电视传输	(561)
E	传真传输	(579)
F	某些民用的预加重/去加重系统	(583)
G	互补误差函数	(586)
H	可靠通信的编码	(589)
I	贝塞尔函数表	(598)

第一章 绪 论

凡是有信息传输的地方，就有通信系统。电话、广播、电视都是通信系统常见的一些例子。一些更复杂的通信系统用于飞机、宇宙飞船的导航和操纵自动化的火车，另外一些通信系统则是用人造卫星向全球进行实况广播。此外还可以列举许多的例子。

本书的目的是分析通信系统的主要特性和讨论这些系统付诸实现的一些方法。本书的写法是从系统的观点出发而不是研究一些具体的电路和器件。这就要求用数学来描述和表示能说明这些系统的电信号（电压和电流）。

在我们的讨论中，信号的傅里叶分析法是最有用的一种方法，应用这些方法能使我们在通信系统的信号设计方面具有有价值的深入理解。本书的第一部分将就这些方法加以介绍和发挥，以后几章则从分析和应用这两方面来介绍一些通信系统。

1.1 信号和系统

广义地说，一个**系统**就是具有相互协调作用的一组物体，并把它们以企图达到某种预期目的的方式联合起来。一个系统又可以是更大系统的一个组成部分（子系统）。还可以建立起完整的系统分级，每一级都有其一定的作用范围。

一个**信号**是引起（或至少可以引起）某种作用的事件，也就是说，信号能促成动作。在能量和功率的限制下，我们特别感兴趣的是信号的概念，以及系统对给定信号的**响应**。图1.1说明信号、系统和响应的作用。尽管以前我们是首先引用系统的概念。但是使用信号以及所得到的响应的概念来描述系统的特性往往更为方便。事

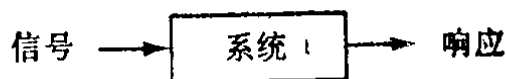


图 1.1 系统示意图

实上，一个系统有时只能用它对给定信号的响应来表示。

对我们的意图来说，是要给一个信号下定义为时间的单值函数，也就是说，对于每一个给定的瞬间（自变量）只有唯一的函数值（因变量）。这个值可以是实数，也可以是复数。在实数情况下，我们说有一个实值信号。在复数情况下，则说信号是复值信号。无论是哪种情况，自变量（时间）都是实数值。

在我们知道的一些测量信号的方法中，都需要能量或功率（不管这个能量或功率是多么小）。能量（或功率）是一个实数量，于是我们实际观察的信号也是实数值。

但是，我们观察的既然是实数值，那又为什么还用复数表示呢？这是因为在许多分析中，如果采用复数表示法，所得到的数字模型和计算常常是简单得多，甚至更为直观。由于方便的缘故，确实可以表明复数表示法有一定的优点。在全部运算完成以后，从所得到的表达式中取出其实部还是很简单的。只要能运用叠加原理，都可以使用这种方法。但将此方法应用于更为一般的情况时，我们必须小心从事。

一般说来，上述方法可以用来描述和分析各种物理过程。这里主要限于描述和分析电信号和系统。

电信号可以用数学方法描述的电压波形或电流波形。我们对“电压降”“回路电流”等问题不那么感兴趣，而对于信号的时间变量，不管它是电压还是电流，则比较有兴趣。这是因为，一个信号只不过是时间的单值函数，这种单值函数值可以用来表示在具体情况下的电压或电流，有时也有例外，特别是涉及到讨论能量和功率的时候。在这种情况下，假设有一阻值为一欧的电阻是一种能避免直接计算的简便方法，至于涉及具体的电阻数值，则只要确认有

一样的波形，就可以采用合适的比例因子来解决。以后，在给定的问题中，除非另有明确的规定，否则对所有的能量和功率都是以一欧电阻来计算。

在分析通信系统时，正弦信号起着重要的作用。对于这类信号 $f(t)$ ，可以用以下方程将它表示为时间 t 的函数

$$f(t) = A \cos(\omega t + \theta), \quad (1.1)$$

式中， A 是幅度， ω 是角频率， θ 是相位。

傅里叶信号分析法的原理是将一切信号分解为许多正弦分量之和。这就意味着用许多正弦频率来描述一个已知信号。这种分析方法的主要目的，是用这些频率来描述一个信号（和响应）的能量和功率是如何分布的。当然，描述对一个给定信号的响应也就引入了该系统的特性。

1.2 信号分类

在任何给定情况下，表示一个信号的最有用的方法与要研究的信号类型有关。在此讨论几种对我们很有用的分类方法。

能量信号、功率信号

能量信号是一个脉冲式的信号，它通常只存在于有限的时间间隔内，即使信号存在于无限时间内，至少其能量的主要部分是集中在有限的时间间隔内。

对于电的系统，信号是一个电压或一个电流。电压 $e(t)$ 在电阻 R 上所消耗的瞬时功率为

$$p = |e(t)|^2 / R, \text{ 瓦}, \quad (1.2)$$

对电流 $i(t)$ 来说则为

$$p = |i(t)|^2 R, \text{ 瓦}. \quad (1.3)$$

在各种情况下，瞬时功率都与信号大小的平方成正比。电阻为一欧时，这二个方程具有相同的形式。因此，在信号分析中，通常习惯于认为与给定信号 $f(t)$ 有关的瞬时功率是：

$$p = |f(t)|^2, \text{ 瓦。} \quad (1.4)$$

尽管在式(1.4)中量纲似乎是不正确的,但是在采用这种表示法时,通常总意味着要用一个适当的电阻去乘或去除它,从而才有正确的量纲。

在采用上述表示方法时,信号在时间 (t_1, t_2) 之间所消耗的能量是

$$E = \int_{t_1}^{t_2} |f(t)|^2 dt, \text{ 焦耳。} \quad (1.5)$$

我们规定**能量信号**是指式(1.5)是有限值时的信号,即使积分的时间间隔是无限长也是如此,即

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty \quad (1.6)$$

几个能量信号的例子示于图1.2中。

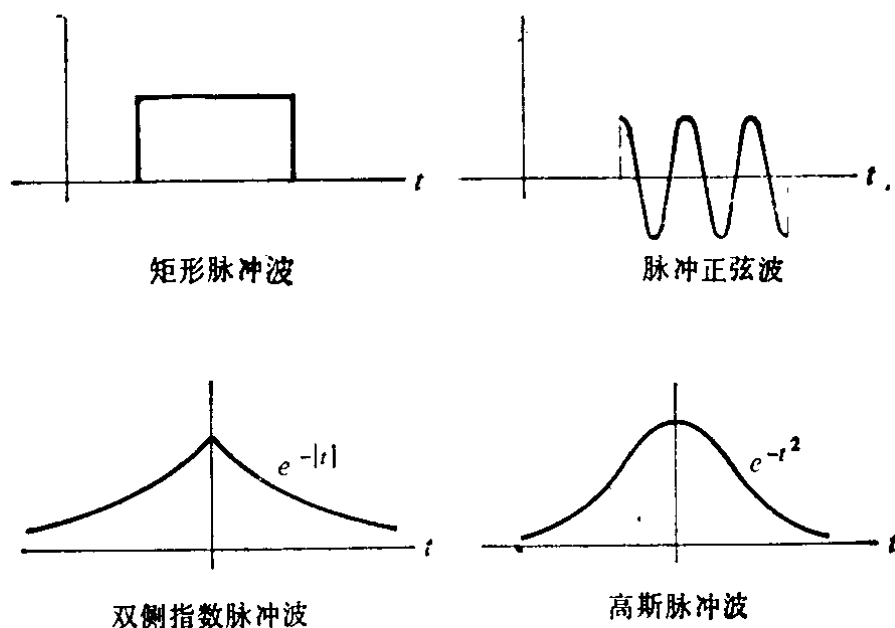


图 1.2 几种能量信号

信号 $f(t)$ 在时间间隔 (t_1, t_2) 内所消耗的平均功率是

$$p = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |f(t)|^2 dt, \quad (1.7)$$

如果式(1.7)的右侧当时间间隔趋近于无穷大时,其值是有限的但不为零,即

$$0 < \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |f(t)|^2 dt < \infty, \quad (1.8)$$

则信号 $f(t)$ 具有一定的平均功率，因而称为 **功率信号**。

周期信号、非周期信号

一个 **周期信号** 是指在一不变的时间长度之后，其波形是完全重复的一种信号。因此，只要有一个数值 T 能使

$$f(t+T) = f(t), \quad (\text{在所有 } t \text{ 时}), \quad (1.9)$$

这个信号 $f(t)$ 就是周期信号。满足式(1.9)的最小正数 T 称为 **周期**。因此，周期确定着 $f(t)$ 所经历的一个整周的持续时间。如果周期信号在一个周期内的能量为有限值，这个周期信号就是 **功率信号**。因此，平均功率只需要在一个整周期内来进行计算。

一个信号，如果没有能满足式(1.9)的 T 值，我们就称这个信号为 **无周期信号** 或 **非周期信号**。在周期信号与非周期信号之间的模棱两可情况是“**殆周期信号**”。这后一种信号是由二个或多个的周期信号组成，这些信号的周期是无公度（不成比例）的*。这样一个信号的例子是

$$f(t) = \sin t + \sin \sqrt{2} t. \quad (1.10)$$

这个函数所以成为殆周期函数，是因为式中右边的每一项虽然都是周期函数，但对于 $f(t)$ 却没有一个确切的周期 T 来重复表示它自己。

随机信号、确定信号

随机信号 是指在它实际出现以前总具有某种程度不确定性的一种信号，这样一种信号可以看成是一群彼此各不相同的信号集合。如果我们（随机地）选取其中一个信号，那么这个信号很可能是规定得很清楚的，譬如说是有固定频率但初始相位不定的正弦信号。可是，如果我们再从这个集合中选取第二个正弦信号，那就不能肯定有相同的初始相位。在另外一些情况下，即使我们已经观察

* 两个周期有公度是指两个周期的比值可以表示为两个整数之比。

了这些信号过去的数值，也不能预断它的未来值。这种随机信号的一个例子是当无线电收音机由于大气干扰和电路内部引起噪声而使收听电台中断时的输出信号。

非随机信号或确定信号是一种没有不确定数值的信号。几乎在所有情况下，对这类信号都可以写出明确的数学表达式。本书的前一部分所要讨论的就是非随机信号。随着新的分析方法的提出，我们将会知道某些随机信号也是能够处理的。

1.3 系统的分类

从数学上讲，一个系统是用来表示输出函数 $g(t)$ 和输入函数 $f(t)$ 之间关系的规律，即

$$g(t) = \mathcal{T}\{f(t)\}, \quad (1.11)$$

式中， $\mathcal{T}\{\}$ 表示规则*，这个规则可以用代数运算、微分和（或）积分的方程等来表示。对于二个链接的系统，第一个系统的输出构成第二个系统的输入，于是就形成了一个总系统

$$g(t) = \mathcal{T}_2\{\mathcal{T}_1\{f(t)\}\} = \mathcal{T}\{f(t)\}. \quad (1.12)$$

象信号分析那样，我们发现，根据系统的某些基本特性对系统进行分类是方便的。现对那些很有用的系统分类方式讨论如下。

线性系统、非线性系统

如果一个系统是线性的，那就能应用叠加原理，即如果

$$g_1(t) = \mathcal{T}\{f_1(t)\} \text{ 和 } g_2(t) = \mathcal{T}\{f_2(t)\},$$

则

$$\mathcal{T}\{a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t)\} = a_1 g_1(t) + a_2 g_2(t), \quad (1.13)$$

式中 a_1 、 a_2 是常数。一个系统，如果它满足式 (1.13)，那就是线性系统的，否则是非线性系统的。

时不变系统或时变系统

* 这里所用的符号是“ $\mathcal{T}$ ”的手写体。后面几章还会采用其它的手写体字母来表示某些具体的运算符号。