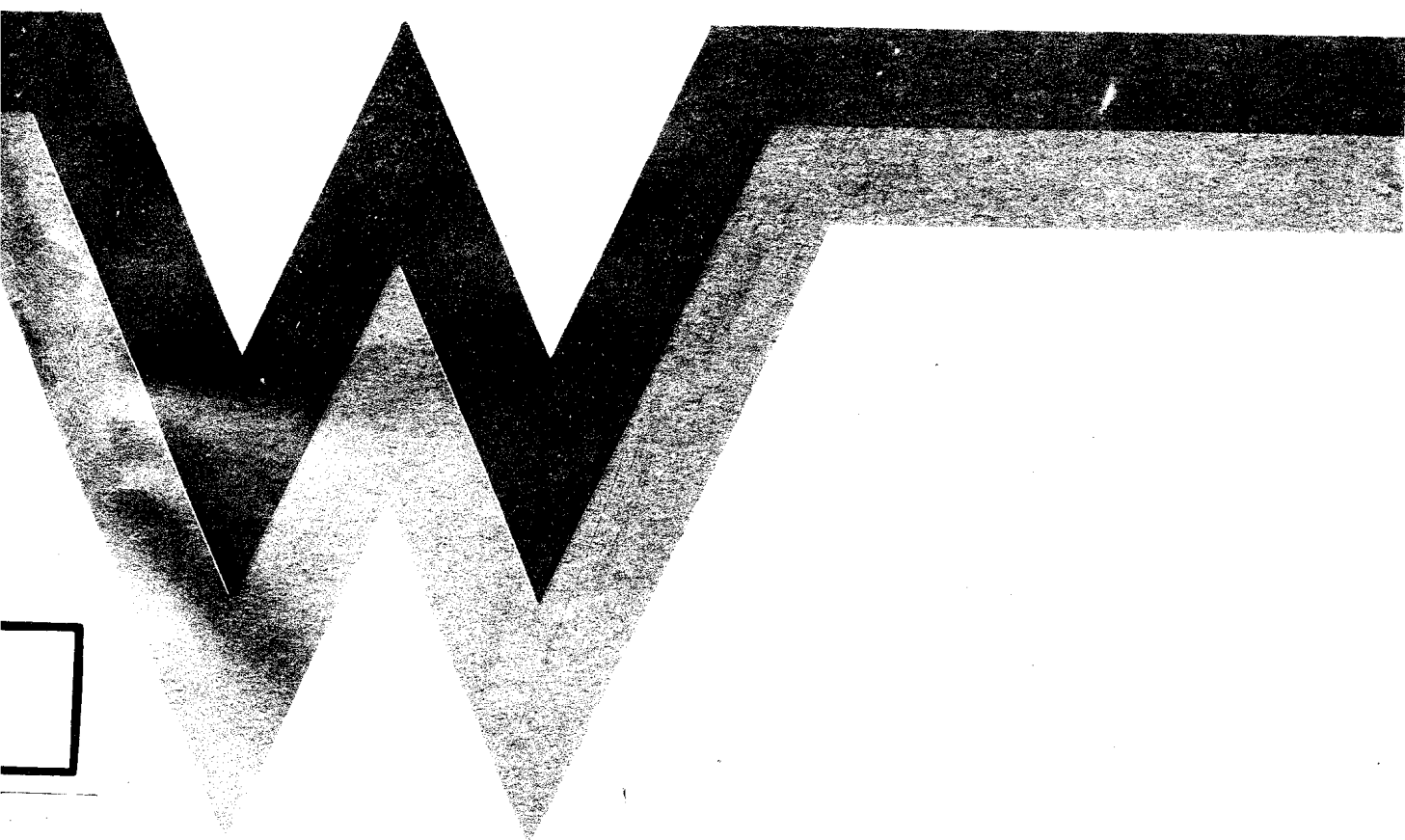


无线电信号与电路

【苏】 С. И. 巴斯卡可夫 著

钱国蕙 等译 孙圣和 校

哈尔滨工业大学出版社



无线电信号与电路

C. И. 巴斯卡可夫 著

钱 国 蕙 等译

孙 圣 和 校

*
哈尔滨工业大学出版社出版
新华书店首都发行所发行
哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*
开本787×1092 1/16 印张25.375 字数539 000

1988年10月第1版 1988年10月第1次印刷

印数 1—2 000

ISBN 7-5603-0065-0/TN·3 定价：4.05元

00000 R

译 者 的 话

《信号与系统》是工科院校无线电类专业一门重要的专业基础课程。本书是根据苏联莫斯科《高教》出版社1983年出版的《无线电信号与电路》一书翻译的。它是苏联高等学校相应课程的教科书，作者按照苏联高等及中等专业教育部制订的大纲，以他在莫斯科动力学院讲授该课的讲稿为基础而写成。无疑，这本书是我们了解与研究苏联专业教育发展现状的好材料。苏联的工科教育既重视理论分析，又注意联系实际。本书从取材到内容组织都与无线电技术的最新发展紧密相联系。本书共分两大部分：无线电信号；无线电电路与系统。对于确定性信号的描述与分析方法，信号的几何空间概念，模拟与数字信号的频谱分析以及利用频域方法和时域方法研究线性系统中信号的传输过程等基本内容，与我国现行教学大纲和教科书大体相当。此外在这本书中，对于无线电技术中经常遇到的窄带信号和随机信号进行了专门研究；还研究了信号在非线性电路和参变电路中的变换。对于近年来最新发展的有源滤波器、数字滤波器、信号形式的选取、信号的最佳（匹配）滤波以及网络综合等都设立了专章研究。这些都与我国现有教材有所不同。

我们认为这本书作为无线电技术专业的技术理论教材，无论在深度、广度上都写得相当成功，可选为试用教材。对电类和有关信息利用的各专业的本科生及研究生，这本书也是很好的参考书。对目前正在学习《信号与系统》或者其它无线电专业课程的学生，本书在提供密切结合专业的较完整的基础理论方面会有很大帮助。

译本中尽量保持原著在叙述和编排上的特色。由钱国蕙翻译前言及第一、五、十四、十五、十六章，王宝祥翻译第二、三、四章，郑玉祥翻译第六、七、十章，蒋延龄翻译第八、九、十一、十二、十三章。由钱国蕙进行全面订正，由孙圣和校阅。为了早日将此书介绍给读者，翻译中缺点和错误在所难免，诚恳希望读者批评指正。

译 者

1984年10月于哈尔滨工业大学无线电工程系

前 言

《无线电信号与电路》课在培养无线电工程师的基本课程中占有重要地位。为了顺应科学技术的发展方向，并反映无线电电子学的基础及其理论的发展趋势，本课程集中了无线电技术领域中最重要的一些原理，并使其系统化。

本书内容符合苏联高等及中等专业教育部制订的《无线电信号与电路》课程教学大纲的要求。读者应当预先修过《专业概论》、《高等数学》、《物理》、《电路理论基础》，以及《电子仪器》等课程。

在编写本书时，作者遵循将所阐述的内容与高等学校实际教学工作紧密联系的原则。这首先是决定取材的原则和阐述的详尽程度：在本书的每一页中只给出已被教学实践证明学生在本阶段完全可以掌握的内容。具体电路方案及其比较分析都列为以后学习的专业工程课程的内容。

《无线电信号与电路》课程的特点是内容丰富，包含许多学生初次接触的概念和方法。数学研究方法在本课程中起很大作用，牢固掌握这些数学工具是完全必要的，因为它们是后续无线电技术课程设计的逻辑基础。为了将理论和实际结合，每一章都附有大量例题，以便介绍工程分析方法的特点。

本书内容与结构。本书由两大部分组成。第一部分是**无线电信号**，向读者介绍目前描述和研究信号特性所采用的方法。这里讨论了信号的分类问题、信号的空间几何表示法原理、确定性信号的频谱分析与相关分析、已调信号理论以及有限频谱连续信号的离散表示法，并较详细地阐述了描述和测量随机信号特性的方法。

第二部分是**无线电电路、设备和系统**。该部分系统地阐述了各种信号（既包括确定性信号又包括随机信号）通过线性和非线性无线电电路时发生的各种现象及其分析计算原理。特别强调了窄带选频电路的作用。讨论了给定频率特性的线性二端网络和四端网络的综合方法，以及信号通过线性参变电路的问题。研究了无惯性非线性电路，便于读者了解信号变换的最重要形式——调制、检波、倍频及变频。研究了简谐振荡的自激振荡器理论。阐述了微电子工艺的成就对无线电技术发展方向的影响。这里包括处理模拟信号的有源滤波器以及最有前途的方向之一的数字信号滤波。最后引导到确定性信号和随机信号的最佳线性滤波的理论基础。

翻开这本书，读者立即会注意到书页的编排方式。除了基本的正文内容外，书中还留有提供辅助、补充信息以及直观图示信息的边页部分。其中包括：

1. **提示。**提及有关的先修课程，例如电路理论基础和物理等课程。
2. **参考资料。**例如基本物理常数，积分表等等。
3. **短评。**用于说明各学科之间的联系，使读者注意在无线电技术和其它科学及应用领域中所采用方法的共同性。
4. **辅助图。**这些图在正文中往往未曾提到，但却是不可缺少的教学内容。利用这

种图不仅可缩短书本篇幅，而且在某种程度上能使书本叙述风格更接近生动的讲授语言。

5. 指示。为了帮助读者组织课文学习，在书页相应位置上出现下列几种符号：

■——表示在该段正文中讲述了对无线电技术有重要意义的某一原理；

●——表示此处提出新概念，建议读者记住；

▲——建议读者求解章末列出的相应习题，它能说明课文中叙述的原理。

目前，高等院校的教学特点是学习很紧张。这就要求学生安排好自己的时间。为了帮助学生做好这一点，作者十分注意内容份量的安排，便于学生领会复习。

书中每一章对应于课程讲授的一个大题目。每章分为若干节，每节大体上是一次课。每一节结构紧凑，包含一个完整的问题。

每一章的末尾有小结，指出必须牢固掌握的知识。

回答每章给出的问题是自我检查的有效方法，对学生准备考试很有益处。

希望读者在学习课程时，经常去做习题。根据各章的范围和内容的复杂程度，选编了可供学生自学的题目。

在每一章末尾还给出一些较复杂的习题。对理论无线电的方法有兴趣，并有志于科学研究的学生可以做这些题目。

本书是以作者在荣获列宁勋章和十月革命勋章的莫斯科动力学院无线电系任教时的讲稿为基础写成的。作者对自己的同事们、特别是 Н.Н.费多罗夫教授、Г.Д.洛波夫教授、А.М.尼古拉耶夫副教授、В.Н.茹科夫副教授和 В.Г.卡尔塔绍夫副教授的支持和有益建议，评论家 Н.И.奇斯佳科夫教授和 К.А.萨莫伊洛教授在本书手稿的准备过程中提出批评意见和推荐资料等帮助，表示感谢。作者感谢 И.С.哥诺罗夫斯基教授对最终手稿进行的审阅。

有关本书的意见请寄：Москва, К—51, Неглинная ул., 29/14, изд—во «Высшая школа»。

作 者

绪 论

苏联对加速科学技术的发展给予足够的重视。无线电技术是重要的科学技术领域之一，其成就直接促进社会物质和文化水平的提高。

无线电技术 作为一个科学技术领域，它的任务是：

- 1) 研究无线电频段的电磁振荡和电磁波的产生、放大、发射与接收原理。
- 2) 如何实际应用电磁振荡和电磁波传送、保存和变换信息。

在无线电技术发展的初期，自 1895 年 A.C.波波夫发明无线电以来，首先有效地解决了在数百米或数千米距离内利用长波通信的问题。现在无线电技术的应用范围大大扩展了。无线电通信、电视、无线电控制、无线电定位、无线电导航以及生物学、医学和地球物理学中的无线电技术方法等，这些还远未包括无线电技术的全部领域。

研究无线电技术物理基础的科学称为**无线电物理学**。无线电物理学是应用科学的一个分支，它与量子力学、固体物理等基础学科有密切的联系。

无线电技术渗透到相邻领域（电子学、计算技术），形成了更广阔的科学技术领域，统称**无线电电子学**。

无线电技术与无线电电子学在苏联获得全面发展。在无线电技术基础理论方面，苏联学者作出巨大贡献，他们是 Л.И.曼杰尔施塔姆，И.И.帕帕列克西，В.А.福克，А.И.贝尔格，В.А.卡切尔尼可夫院士等。

读者在《专业概论》课程中学过，利用无线电的方法将消息从信源传送到接受者是通过**无线电信道**实现的。信道的基本单元是发射机、接收机以及传播电磁波的物理介质。传播介质可以是自由空间，也可以是专用技术设备——波导、电缆或其它传输线。

来自原始消息源的**信号**在信道的发射端借助于麦克风、电视摄像机等其它类似设备变换成电振荡。这种电振荡频率太低，不能直接激励起电磁波。因此，在无线电技术中采用信号传输的方法，其原理就是利用专门的设备，用含有原始消息的低频振荡去控制大功率的**载波振荡**的参量，载波振荡的频率在无线电频段上。信号的这种变换过程称为载波振荡的**调制**。

已调信号由发射天线辐射出去，同时，被激励的电磁波在接收机天线中感应出微弱的无线电信号。经过选频滤波和放大之后，对接收到的信号应进行**解调（检波）**——与调制相反的过程。结果在接收机输出端产生复现被传送的原始消息的振荡。

从上述的最简单的信道功能原理可以看出，沿无线电信道传输消息伴随着各种**信号变换**。这些变换是利用相应的物理系统——**无线电电路**实现的。每种无线电电路对信号实现某种处理，其特性完全由该物理系统的内部结构决定。在本课程中将要研究的有放大器、选频滤波系统、波形变换电路、调制器、检波器以及其它各种电路。

在任何实际无线电信道中，除了有用信号外不可避免存在着**干扰**。干扰的来源是多种多样的——来自电路元件中电子的热运动，设备的接触不良，载波频率相近的邻近信

道的影响以及空间存在的宇宙射线噪声等等。无线电技术能抑制干扰的有害影响并保证高度准确地传输信息的能力称为**抗干扰性**。建立良好的抗干扰系统是现代无线电技术的主要任务之一。有一个以概率方法为基础的分支称为**统计无线电技术**，它是专门研究抗干扰系统的设计理论和实际问题的。实现高度抗干扰性的最有效途径之一是采用完善的信号调制形式，特别是利用消息的**抗干扰编码**方式。

综上所述，在《无线电信号与电路》课程中研究下列基本问题：

1. 各种信号和干扰的特性以及它们的数学描述方法。
2. 完成各种无线电电路作用的各种物理系统的特性。
3. 无线电电路中信号变换的分析方法以及基本电路构成方法。
4. 按指定性能要求设计电路的方法。

目前，无线电技术是应用科学中发展最快的学科。它的最新发展应当是向更高频率的电磁波段过渡。例如，过去主要用于雷达的超高频段（CBQ）开始广泛用于电视、通信、遥测信道。载波在可见光和红外波段的激光通信线路已获巨大进展。

无线电和电子学组件发展速度很快。如果说传统的无线电电路几乎都是线性电路和非线性电路的组合，那么现在集中研究和实用化的则是**功能部件和系统**，它们利用固体（半导体、介质和磁性材料）中特殊的波和振荡进行信号处理。微电子工艺的产品也大量应用在无线电技术领域。价廉、可靠与高速的集成电路对无线电技术许多领域都产生巨大影响。微电子学有可能使无线电信号的处理和变换过渡到广泛采用原理上崭新的**数字方法**。

可以相信，随着各相近科学技术领域的进展，无线电技术领域将获得更广阔的发展。

前 言

绪 论

第一部分 无线电信号

第一章 无线电信号一般理论基础	(1)
1.1 无线电信号的分类.....	(1)
1.2 信号的动态表示法.....	(5)
1.3 信号理论中的几何方法.....	(9)
1.4 正交信号理论.....	(13)
第二章 信号的频谱表示法	(22)
2.1 周期信号和傅立叶级数.....	(22)
2.2 非周期信号的频谱分析、富立叶变换.....	(27)
2.3 傅立叶变换的基本性质.....	(34)
2.4 不可积信号的频谱密度.....	(37)
2.5 拉普拉斯变换.....	(41)
2.6 拉普拉斯变换的基本性质.....	(44)
第三章 信号的能谱、相关分析原理	(49)
3.1 信号的互频谱密度、能谱.....	(49)
3.2 信号的相关分析.....	(54)
3.3 离散信号的自相关函数.....	(59)
3.4 两个信号的互相关函数.....	(63)
第四章 已调信号	(68)
4.1 调幅信号.....	(68)
4.2 调角信号.....	(75)
4.3 脉冲内调频信号.....	(83)
第五章 有限频谱信号	(91)
5.1 有限频谱信号的数学模型及其特性.....	(91)
5.2 卡切尔尼可夫定理.....	(94)
5.3 窄带信号.....	(99)
5.4 解析信号与希尔伯特变换.....	(104)
第六章 随机信号的理论基础	(114)
6.1 随机变量及其特性.....	(114)
6.2 随机变量系统的统计特性.....	(120)
6.3 随机过程.....	(126)

第七章 随机过程的相关理论	(135)
7.1 平稳随机过程的频谱表示法.....	(135)
7.2 随机过程的微分与积分.....	(140)
7.3 窄带随机过程.....	(146)

第二部分 无线电电路、设备和系统

第八章 确定性信号作用于线性非时变系统	(158)
8.1 物理系统及其数学模型.....	(158)
8.2 线性非时变系统的脉冲特性、过渡特性和频率特性.....	(161)
8.3 线性动态系统.....	(167)
8.4 频谱法.....	(175)
8.5 算子法.....	(181)
第九章 确定性信号作用于频率选择系统	(190)
9.1 频率选择网络的模型.....	(190)
9.2 宽带输入作用下的频率选择网络.....	(197)
9.3 窄带输入作用下的频率选择网络.....	(202)
第十章 随机信号作用于线性非时变电路	(215)
10.1 随机信号通过线性非时变系统的频谱分析法.....	(215)
10.2 无线电设备中的起伏噪声源.....	(223)
第十一章 非线性无线电电路中的信号变换	(233)
11.1 无惯性非线性变换.....	(233)
11.2 简谐外激励下无惯性非线性元件中电流的频谱成分.....	(237)
11.3 非线性谐振放大器和倍频器.....	(240)
11.4 简谐信号和的无惯性非线性变换.....	(243)
11.5 幅度调制, 调幅信号的检波.....	(246)
11.6 平稳随机信号作用于无惯性非线性电路.....	(251)
第十二章 线性参变电路中信号的变换	(257)
12.1 信号通过电阻性参变电路.....	(257)
12.2 电路中参变电抗元件的能量关系.....	(262)
12.3 参量放大原理.....	(266)
12.4 时变动态系统.....	(273)
12.5 简谐信号作用于具有随机特性的参变系统.....	(278)
第十三章 线性无线电技术网络综合的理论基础	(258)
13.1 线性无源二端网络输入阻抗的解析性质.....	(258)
13.2 无源二端网络的综合.....	(289)
13.3 四端网络的频率特性.....	(293)
13.4 低通滤波器.....	(297)

13.5	滤波器的实现	(302)
第十四章	具有反馈的有源电路和自激振荡系统	(309)
14.1	具有反馈的线性系统的传递函数	(309)
14.2	具有反馈的电路的稳定性	(314)
14.3	有源 RC 滤波器	(318)
14.4	简谐振荡自激发生器, 小信号状态	(322)
14.5	简谐振荡自激发生器, 大信号状态	(329)
第十五章	离散信号, 数字滤波原理	(339)
15.1	离散脉冲序列	(339)
15.2	周期性信号的离散化	(343)
15.3	Z 变换理论	(347)
15.4	数字滤波器	(350)
15.5	用算法实现数字滤波	(355)
15.6	线性数字滤波器的综合	(361)
第十六章	信号的最佳线性滤波	(370)
16.1	已知波形信号的最佳线性滤波	(370)
16.2	匹配滤波器的实现	(375)
16.3	随机信号的最佳滤波	(381)
附 录		(385)
参考文献		(389)

第一部分 无线电信号

第一章 无线电信号一般理论基础

“信号”这一术语不仅经常出现在科学技术领域里，而且也经常出现在日常生活中。在不特别追究术语的严密性时，人们常把信号、消息、信息这几个概念等同视之，通常这不会引起误解，因为“信号”一词来自拉丁文术语“*signum*”——“记号”一词，它含意很广。但在着手系统研究无线电技术理论时，应尽可能使信号概念的含义准确。按照惯例，人们将用于描述、记录和传输消息的任何对象的物理状态随时间变化的过程叫做信号。在人类活动的实践中，消息与包含在其中的信息是紧密联系不可分割的。

与物质和场一样，信息也是自然科学的最重要的范畴

建立在“消息”和“信息”概念基础上的问题范围极广，这些问题引起了许多工程师、数学家、语言学家的注意。在四十年代，香农完成了科学新方向——信息论的最初研究。

信息论所涉及的问题已远远超过“无线电信号与电路”课程范围，因此本书将不讨论信号的物理形式与其包含的消息之间的关系，更不讨论包含在消息中（最终是在信号中）的信息估值问题。

1.1 无线电信号的分类

在着手研究任何新的对象或现象之前，总要对它们进行分类。下面我们确定信号分类的准则，并定义一些重要的术语。

信号及其数学模型 作为物理过程的信号，可以借助于仪器和装置进行观察，例如电子示波器、伏特计、接收机等等。但这种实验方法有其固有的缺点。实验现象往往具有局部性、个别性，缺乏一般性，而只有通过一般性才能判断对象的基本特性，予测条件变化后应得到的结果。

为了对客观信号进行理论研究和计算，应给出信号的数学描述方法，或者用现代科学语言说，应当建立被研究信号的数学模型。

● 数学模型

信号的数学模型表现为以时间为自变量的函数关系。以后，信号的数学模型将用拉丁字母符号 $s(t)$, $u(t)$, $f(t)$ 等表示。

大多数情况下无线电信号的携带者是电磁振荡

在系统研究现象的过程中，最重要的一步是选择模型（这里指的是物理信号）。首先数学模型可以从信号携带者的具体性质中抽象出来。在无线电技术中同一个数学模型可同样有效地描述电流、电压、电磁场场强等等。

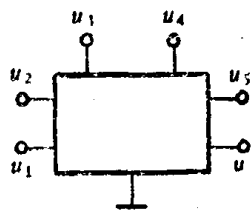
数学模型方法的第二个重要方面是：所选的模型应尽可能描述信号最重要的客观特性，同时忽略许多次要的特征。例如在绝大多数情况下选择精确的函数式描述观察到的电振荡是非常困难的。但是，如果掌握了整个系统的全部知识，研究人员就可以从已有的信号模型库中选用在该具体情况下能最好描述物理过程又最简洁的模型。因此，选择模型在某种程度上是一种创造性的过程。

● 实数信号与复数信号

描述信号的函数可取实数值也可取复数值，因此，以后我们会经常提到信号的实数模型和复数模型。选用那一种方法，全由数学上的方便与否决定。

利用数学模型可以对信号进行比较，确定其相同点和不同点，最终对其进行分类。

一维信号与多维信号 典型的无线电信号是任何电路两端的电压或支路中的电流。这种写成单一时间函数的信号通常称为一维信号。本书主要研究一维信号。但有时也讨论下面形式的多维信号



$$\vec{V}(t) = \{v_1(t), v_2(t), \dots, v_N(t)\},$$

它是由一维信号的某种集合形成的。整数 N 称为该信号的维数（借用线性代数的术语）。

例如多端网络端钮上的电压系可作为多维信号概念的一个例子。

必须指出，多维信号是多个一维信号的有序集合。因此，在一般情况下，分量次序不同的两个信号彼此不相等：

$$\{v_1, v_2\} \neq \{v_2, v_1\}.$$

在利用计算机分析复杂系统的功能时采用多维信号模型特别合适。

$u(t) = U_0 \cos \omega_0 t$ 公式作为确定性信号的模型

▲ 解题 13.14



随机信号的典型波形图

确定性信号与随机信号 另一种信号的分类原则是：按能否准确预测任意时刻信号的瞬时值进行区分。

如果根据数学模型可以实现这种预测，则将此信号称为**确定性信号**。建立数学模型的方法是多种多样的——数学公式、计算算法，以至文字描述。

严格说来，在自然界中确定性信号是不存在的。消息源和周围物理对象之间相互影响是不可避免的，而且是无法准确预测

的，还有杂乱无章的热起伏的存在——这一切迫使我们必须把实际的信号看成是时间的随机函数，因此称之为随机信号

在无线电技术中，随机振荡通常呈现为干扰，它妨碍从接收信号中提取有用信息。与干扰作斗争，提高接收机的抗干扰性是无线电技术的中心任务之一。

“随机信号”的概念似乎使人感到自相矛盾。其实并不如此。例如，将射电望远镜对准宇宙辐射源，那么接收到的信号呈现随机起伏，但它带着天体的各种信息。

确定性信号和随机信号之间没有明确的界限。通常在干扰电平显著低于已知形式的有用信号电平时，采用比较简单的确定性信号模型就十分适宜。

近几十年为研究分析随机信号特性，在数学的概率论和随机过程理论的数学运算基础上发展了统计无线电方法，它有许多特殊性质。本书在第六、七两章将对这一问题进行全面的讨论。

脉冲信号 在无线电技术中脉冲是一类重要的信号。脉冲是一种只在有限时间区段中存在的振荡，分为视频脉冲(图1.1,a)和射频脉冲(图1.1b)。两种基本脉冲形式之间的区别如下，如

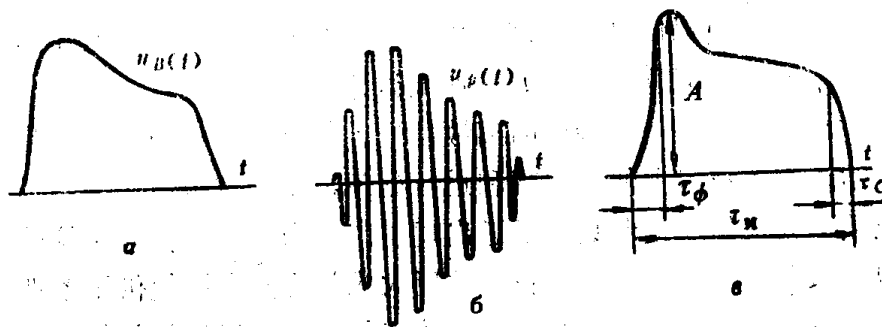


图 1.1 脉冲信号及其特性

a—视频脉冲； b—射频脉冲； b—脉冲的参数

果用 $u_B(t)$ 表示视频脉冲，则相应的射频脉冲为 $u_p(t) = u_B(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ (频率 ω_0 和初相位 φ_0 是任意的)。这里 $u_B(t)$ 称为射频脉冲的包络，而函数 $\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ 是它的充填振荡。

“视频脉冲”术语之形成是因为这种振荡首先用在电视技术中

通常，特别是在工程计算中利用简单的表示脉冲波形的数字参数代替描述脉冲“精细结构”的完整数学模型。因此，对于形状近似梯形的视频脉冲(图1.1b)，确定其幅度(高度) A 是合理的。在脉冲的时间参数中最重要的是持续时间 τ_n 。此外还常常需要知道脉冲前沿时间 τ_ϕ 和后沿时间 τ_c 。

在无线电技术中，脉冲电压的幅度从零点几微伏至几千伏变化，而持续时间短至零点几毫微秒。

模拟信号、离散信号与数字信号 在结束信号分类原则的简

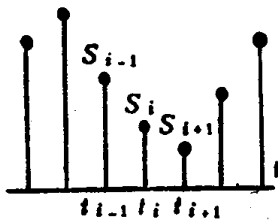
脉冲
●
●
视频脉冲与射频脉

述时，还要指出，普通产生信号的物理过程都是这样进行的：在每一瞬时信号的值都可以测量出来。这类信号通常称为模拟（连续）信号。术语“模拟信号”是从计算技术借用的：为了求解微分方程，创造了模拟计算机。

一维模拟信号宜用图形（波形图）表示，图形可以是连续的，也可以包含间断点。

早期无线电技术中只用模拟信号。利用模拟信号的特性成功地解决了一系列技术课题（无线电通讯、电视等）。并且利用当时达到的技术手段，模拟信号的产生、接收和处理都很简便。

对无线电系统要求的增长和应用的多样化促使人们寻求新的设计原理。在许多场合下采用离散信号的脉冲系统取代了模拟系统。最简单的离散信号数学模型 $s_n(t)$ 就是在时间轴的点 $\{t_i\}$ ($i=1,2,3,\dots$) 上确定的信号取样值 s_i 的集合。通常对每个信号离散化间隔 $\Delta = t_{i+1} - t_i$ 是恒定的。



离散信号模型

与模拟信号相比，离散信号的优点之一是：不需要在所有时刻连续复现信号。因此，可以用同一信道，将不同来源的消息传送给不同的用户，形成多路时分通讯。

显然，模拟信号随时间变化越快，取样间隔就应当越小。这个基本的重要问题将在第五章详细讨论。

```

1 1 1 0 0 1 0 1 1
1 0 1 1 1 0 0 1 0
0 1 0 0 1 1 0 0 0
1 0 0 1 1 0 0 1 1
. . . . .

```

数字信号样本序列

数字信号是一类特殊的离散信号。其特点是样值以数字形式表示。为了技术上便于实现和进行处理，采用位数有限的，通常位数不太大的二进制数。最近出现了广泛采用数字信号系统的趋势。微电子学和集成电路技术的巨大成就为此发展提供了条件。

应当注意，任何离散信号或数字信号（这里说的是信号——物理过程，而不是数学模型）在本质上都是模拟信号。因此慢变化的模拟信号 $s(t)$ 可以用相应的离散形式表示，即用宽度相等、高度正比于取样点的 $s(t)$ 值的矩形视频脉冲序列表示（图 1.2,a）。但是也可以换一个方法处理，即保持脉冲高度不变，而使脉宽相应于取样值变化（图 1.2,b）。

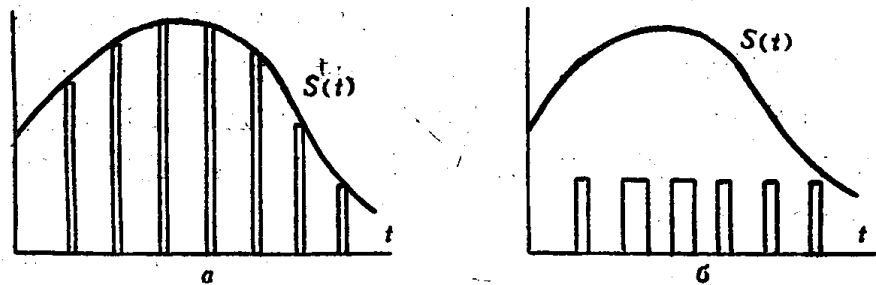
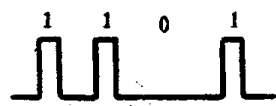


图 1.2 模拟信号的离散化

a—改变脉冲高度； b—改变脉冲宽度

应当指出，如果保证视频脉冲的面积正比于模拟信号在取样点的值，那么上述两种将模拟信号离散化的方法是完全等效的。

同样也可利用视频脉冲序列将取样值表示为数字形式。对于这一过程，二进制是最理想的。例如可用高电平代表 1，用低电平代表 0。离散信号及其特性将在第十五章详细研究。



1.2 信号的动态表示法

在无线电技术许多问题中要求采用信号的特殊表示形式。不仅需要给出信号“现在”的瞬时值信息，而且还要给出它在整个时间轴上的表现，包括“过去”的和“将来”的。

动态表示法原理 利用顺序时刻出现的基本信号的总和可以近似描述实际信号。如果各个基本信号持续时间趋于零，那么在极限情况下自然可以得到原始信号的准确表示。由于强调了过程随时间展开的特点，故将这种描述信号的方法称为动态表示法。

基本信号可任意选择，但广泛采用的动态表示法有下列两种：在第一种方法中，利用阶跃函数作为基本信号，每经相等的时间间隔 Δ 产生一个阶跃，其高度等于在时间间隔 Δ 内信号的增量（图1.3a）。

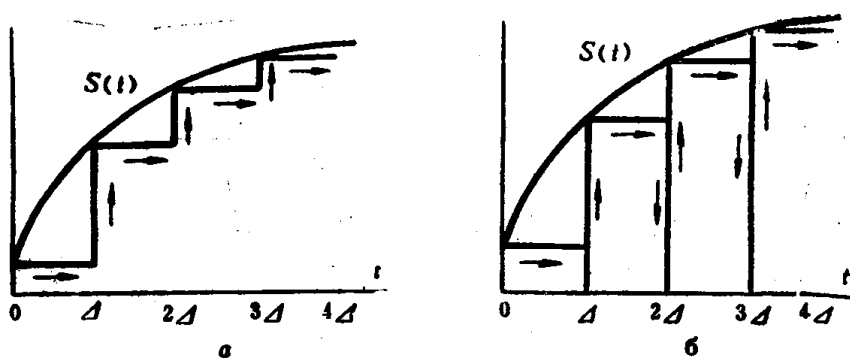


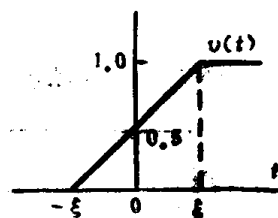
图 1.3 信号的动态表示法（箭头表示每个基本单元随时间变化的路线）

在第二种动态表示法中，利用矩形脉冲作为基本信号。这些脉冲前后毗连，形成内接或外切于曲线的序列（图1.1,6）。

下面进一步研究用于第一种方法的基本信号特性。

接通函数 假设信号的数学模型由下列等式给出，即

$$v(t) = \begin{cases} 0, & t < -\xi \\ 0.5(t/\xi + 1), & -\xi \leq t < \xi \\ 1, & t > \xi \end{cases} \quad (1.1)$$



这种函数描述了某一实际对象从“0”状态到“1”状态的过渡过程，并且这一过程在 2ξ 时间内按线性规律完成。如果 ξ 趋于

零, 则在极限情况下从一个状态到另一个状态的过渡将瞬时完成。这种极限下的信号的数学模型叫做接通函数或海维赛德函数。

接通函数或海维赛德函数

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 0.5, & t = 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

奥列维·海维赛德 (1850—1925) 英国物理学家

利用函数 $\sigma(t)$ 可方便地描述电路中的各种开关过程。

一般接通函数可以在时间上相对原点位移时间 t_0 , 位移后的函数为

$$\sigma(t - t_0) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ 0.5, & t = t_0 \\ 1, & t > t_0 \end{cases} \quad (1.3)$$

这里介绍的接通函数的定义方法并不是唯一可能的方法。例如形成序列 $u_n(t)$ 的函数

$$u_n(t) = \frac{1}{1 + \exp(-nt)}$$

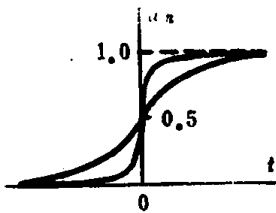


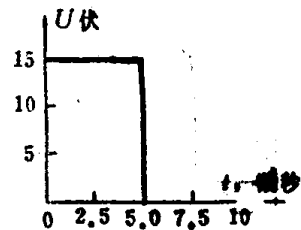
图 6

随着序数 n 的增加, 越来越精确地趋于在 $t = 0$ 时跃变至 1 的间断信号。

在理论无线电技术中广泛利用接通函数描述间断信号, 特别是脉冲信号。

例 1.1 矩形脉冲信号 v 的持续时间为 5 微秒, 幅度 15 伏, 脉冲前沿与时间原点重合。试写出该信号的解析式。

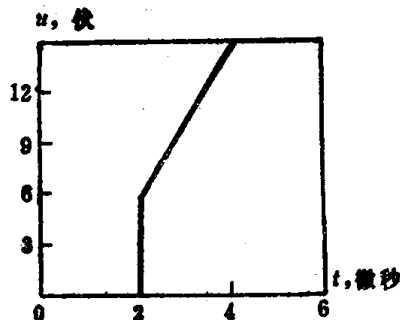
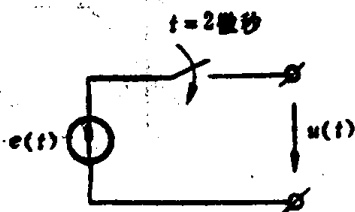
$t = 0$ 时的电平跳变可写成函数 $v(t) = 15\sigma(t)$ 。为了使脉冲能在 $t_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ 秒时结束, 就必须再减去一个滞后 t_0 时间的接通函数, 故 $v(t) = 15\sigma(t) - 15\sigma(t - 5 \cdot 10^{-6})$ 伏。



例 1.2 有一随时间线性增长的电动势 $e(t) = 3.0 \cdot 10^6 t$ 伏, 在 $t_0 = 2$ 微秒时通过理想开关接通外电路。试写出该系统输出端电压的数学模型。

当时间 t 小于 2 微秒时, 输出电压为零。因此

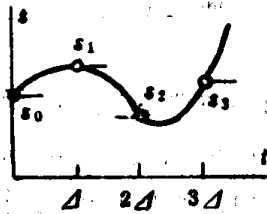
$$u(t) = 3.0 \times 10^6 t \cdot \sigma(t - 2 \cdot 10^{-6}) \text{ 伏}$$



▲ 解题 1,2

也可以用另一种方法描述这个过程，即将其描述为在开关接通瞬间出现的接通脉冲和线性增长的脉冲之和：

$$u(t) = [6 + 3 \cdot 10^6(t - 2 \cdot 10^{-6})] \sigma(t - 2 \cdot 10^{-6}) \text{ 伏}$$



利用接通函数对任意信号的动态表示法 讨论某信号 $s(t)$ ，假设 $t < 0$ 时 $s(t) = 0$ ，且对应于时间序列 $\{\Delta, 2\Delta, 3\Delta, \dots\}$ 的信号值序列为 $\{s_1, s_2, s_3, \dots\}$ 。如果 $s_0 = s(0)$ 为起始值，那么在任意时间 t 信号的当前值可近似为下列阶跃函数的总和：

$$s(t) \approx s_0 \sigma(t) + (s_1 - s_0) \sigma(t - \Delta) + (s_2 - s_1) \sigma(t - 2\Delta) + \dots$$

$$= s_0 \sigma(t) + \sum_{k=1}^{\infty} (s_k - s_{k-1}) \sigma(t - k\Delta)。$$

如果时间间隔 Δ 趋向于零，则离散变量 $k\Delta$ 可用连续变量 τ 代替，增量 $(s_k - s_{k-1})$ 变为微分 $ds = (ds/d\tau) d\tau$ ，这样便得到任意信号的动态表达式：

$$s(t) = s_0 \sigma(t) + \int_0^{\infty} \frac{ds}{d\tau} \sigma(t - \tau) d\tau \quad (1.4)$$

例 1.3 信号 $s(t)$ 在 $t < 0$ 时为零， $t > 0$ 时按抛物线规律变化 $s(t) = At^2$ 。试求该信号之动态表达式。

本题中 $s_0 = 0$ ， $ds/d\tau = 2A\tau$ ，因此 $s(t) = 2A \int_0^{\infty} \tau \sigma(t - \tau) d\tau$

上式表明，构成这一信号的每一基本阶梯的高度随时间线性增长。

在转入第二种以短脉冲作为展开单元的动态表示方法之前，应引入一个重要的新概念。

δ -函数 研究下式给定的矩形脉冲：

$$v(t; \xi) = \frac{1}{\xi} \left[\sigma\left(t + \frac{\xi}{2}\right) - \sigma\left(t - \frac{\xi}{2}\right) \right] \quad (1.5)$$

这个脉冲的特点是：不管参数 ξ 取什么值，脉冲面积总是 1，

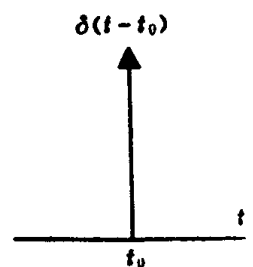
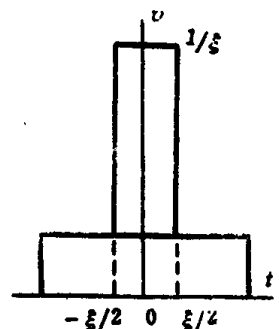
$$\Pi_v = \int_{-\infty}^{\infty} v dt = 1$$

如果 v 是电压，则 $\Pi_v = 1$ 伏·秒。

如果使 ξ 趋向零，并且在缩短脉冲宽度的同时保持其面积不变，则其高度无限增长。当 $\xi \rightarrow 0$ 时这种函数序列的极限称为 δ -函数或狄拉克函数：

$$\delta(t) = \lim_{\xi \rightarrow 0} v(t; \xi) \quad (1.6)$$

δ -函数是非常有趣的数学工具。除了在 $t = 0$ 以外它处处为零（通常说法是：它集中于点 $t = 0$ ），但是其积分值为 1，



δ -函数的符号表示法