

低噪声电路

陈其津 编
重庆大学出版社



低 噪 声 电 路

陈其津 编

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书讨论电子系统中存在的噪声问题。先分析了热噪声、散粒噪声和低频噪声等对电子系统的影响，而后介绍基本的网络噪声理论，涉及的范围包括电子系统中的元、器件、单元电路或系统电路。书中着重介绍有关放大器、变频器、振荡器和检波器的低噪声设计原理，所涉及的频率范围由低频、高频、到微波和光波等频段。

本书可作为电子技术类本科生高年级的选修课和研究生的教材，亦可供从事电子学方面工作的科技工程人员参考之用。

低 噪 声 电 路

陈其津 编

责任编辑 王孝祥

重庆大学出版社出版发行
新华书店经销
重庆大学出版社印刷厂印刷

开本：787×1032 1/16印张：19 字数：474 千

1988年 12 月第 1 版 1988年 12 月第 1 次印刷

印 数：1—3000

标准书号：ISBN 7-5624-0079-2 定价：3.78元
TN·2

序

克服干扰和噪声的影响是研制电子设备要考虑的首要问题。按照平常的概念，干扰是指来自设备外部的干扰，例如，雷电干扰、工业干扰和人为干扰等。这种干扰往往带有一定的脉冲性或周期性。噪声是指设备内部带电粒子不规则运动引起的干扰，它是随机性的。显然，要完全去掉干扰和噪声是不可能的。因而对于传输信息来说，一方面设计低噪声电路来降低设备本身的噪声，采用屏蔽等手段减少外来干扰的影响。另一方面设计合适的信号（纠错编码信号），来纠正干扰引起的差错。这些是保证高质量传输信息的有效办法。

本书着重讨论噪声的性质以及低噪声电路的分析和设计。由于电子电路复盖很宽的波段，从低频、高频、微波、一直到光波，所以本书涉及的范围很广，内容十分丰富。其中有不少新的资料，例如，光检波器、放大器和变频器的量子噪声等。

本书作者陈其津同志过去担任大学本科《无线电接收设备》课程的教学工作。在赴美国肯塔基大学任访问学者期间，埋头收集资料，孜孜不倦，编写《低噪声电路》一书，精神十分可嘉！相信本书的出版定会受到广大读者的欢迎。

徐秉铮

1987年3月于华南工学院

前 言

现代电子学领域，如通信、控制、广播、遥控遥测或其他电子系统，都存在处理微弱信号和噪声的问题。以通信系统为例，限制通信距离的不是信号电平的微弱程度，而是噪声干扰的程度。噪声也同样是其他电子系统极限性能的限制因素。对于高质量的信号传送和处理，发生器或是测量仪器，噪声更是影响质量的重要因素。因此，如何对付噪声是电子系统面临的根本问题之一。

对噪声的研究主要有以下几方面：噪声的性质，电子器件的噪声，低噪声电路的分析和设计，从系统上研究降噪的方法，以及从理论上研究如何从噪声中识别微弱信号。本书主要讨论前三个方面的内容，而着重分析和设计低噪声电路。由于电子学的应用领域已由低频、高频、微波发展到光波，因此，对噪声问题的讨论也涉及上述各个频域。传统上，对电路噪声的研究多限于热噪声、散粒噪声和 $1/f$ 噪声等。但是，由于量子器件和光波的逐渐应用，因此，本书也介绍量子噪声的一些概念。

本书内容主要分为四个部分：第一部分包括第一章和第二章内容，主要介绍噪声性质、种类和网络噪声理论；第二部分由第三、四和第五章组成，主要讨论与低频或基带频率有关的电子器件和电路的噪声，以及如何设计低噪声放大器；第三部分包括第六章到第九章的内容，讨论高频、甚高频和微波等频段应用的半导体器件、输入电路、放大器、变频器、振荡器和检波器等电路的噪声和低噪声电路的设计。某些量子器件，有关光检波、放大和变频器的极限性能也在这部分介绍；第四部分，亦即第十章，介绍噪声测量原理。为了便于讨论，有些内容并不严格按照上述部分来划分。例如散粒噪声的讨论就放在光检波这一节讨论，而有关光检波、放大和变频等内容也都放在同一节讨论。又如第九章，虽然是讨论放大器，但是，由于这些放大器主要是用于微波段的宽带放大器，它们有共同的特殊要求，工作原理也和一般的放大器不同，因此把它们和第七章的高频放大器分开讨论。

由于噪声问题涉及电子学的各个领域，由有源和无源器件，单元电路到整机系统，由低频、高频到光波，涉及的范围很广，一些内容往往不是一本书所能详尽论述。所以，本书只能着重讨论低噪声电路的分析和设计，以及低频、高频和微波固体器件的电路。

本书可供从事电子学方面工作的工程技术人员、大专学校有关专业的教师和学生参考。

这本书的编写是和已故冯秉铨教授的导引分不开的，笔者在此表示深切的怀念。在编写的过程中得到徐秉铮教授的协助指导，周守昌教授也对本书的编写提供了宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

陈其津

一九八六年五月于肯塔基大学

目 录

第一章 噪声性能	1
§ 1-1 概述.....	1
§1-1-1 噪声定义.....	1
§1-1-2 噪声的统计特性.....	1
§ 1-2 热噪声与量子噪声.....	5
§1-2-1 热噪声.....	5
§1-2-2 热噪声的等效电路.....	8
§1-2-3 量子噪声.....	9
§ 1-3 噪声带宽、噪声电压的叠加.....	9
§1-3-1 噪声带宽.....	9
§1-3-2 噪声电压的叠加.....	13
§1-3-3 噪声电路的分析.....	13
§ 1-4 散粒噪声、 $1/f$ 噪声和额外噪声.....	15
§1-4-1 散粒噪声.....	15
§1-4-2 低频噪声($1/f$ 噪声).....	17
§1-4-3 额外噪声.....	18
§1-4-4 电容对噪声的影响.....	18
第二章 网络噪声	19
§ 2-1 概述.....	19
§2-1-1 网络噪声模型.....	19
§2-1-2 复数噪声量运算.....	20
§2-1-3 变换运算.....	21
§ 2-2 等效噪声电压与电流.....	22
§ 2-3 等效输入噪声、噪声电阻与噪声温度.....	23
§2-3-1 等效输入噪声.....	23
§2-3-2 噪声电阻与噪声温度.....	24
§ 2-4 噪声系数.....	24
§2-4-1 噪声系数定义.....	24
§2-4-2 最佳源电阻与最小噪声系数.....	25
§ 2-5 多级网络的噪声系数与噪声测度.....	26
§2-5-1 多级网络的噪声系数.....	26
§2-5-2 噪声测度.....	27
§ 2-6 噪声源相关情况.....	29
§ 2-7 反馈网络的噪声系数.....	31
§2-7-1 串联反馈.....	31
§2-7-2 并联反馈.....	33

§2-7-3 简单的串联与并联反馈	35
-------------------------	----

第三章 器件噪声

§3-1 半导体管的噪声

§3-1-1 混合 π 型等效电路	36
-----------------------------	----

§3-1-2 噪声模型	37
-------------------	----

§3-1-3 半导体管等效输入噪声	38
-------------------------	----

§3-1-4 最小噪声系数	40
---------------------	----

§3-1-5 $1/f$ 噪声区域	42
-------------------------	----

§3-1-6 工作条件与噪声	42
----------------------	----

§3-2 场效应管的噪声

§3-2-1 场效应管噪声等效电路	42
-------------------------	----

§3-2-2 等效噪声电压	43
---------------------	----

§3-3 其他有源器件的噪声

§3-3-1 高增益半导体管	44
----------------------	----

§3-3-2 集成电路的噪声	44
----------------------	----

§3-4 传感器噪声

§3-4-1 噪声模型	47
-------------------	----

§3-4-2 并联负载电阻的影响	48
------------------------	----

§3-4-3 并联电容的影响	49
----------------------	----

§3-4-4 谐振电路的噪声	50
----------------------	----

§3-4-5 光电检测器件	50
---------------------	----

§3-5 无源器件的噪声

§3-5-1 电阻器的噪声	53
---------------------	----

§3-5-2 电容器的噪声	57
---------------------	----

§3-5-3 整流和参考二极管的噪声	57
--------------------------	----

§3-5-4 耦合变压器的噪声	58
-----------------------	----

第四章 低频电路设计

§4-1 概述

§4-2 设计程序

§4-3 有源器件的选择

§4-4 其他方面的考虑

§4-4-1 有反馈的设计	61
---------------------	----

§4-4-2 带宽与信号源	62
---------------------	----

§4-4-3 变压器耦合	63
--------------------	----

§4-4-4 输出信噪比	64
--------------------	----

§4-5 偏置与电源

§4-5-1 半导体管的偏置	65
----------------------	----

§4-5-2 共发射极电路的噪声	68
------------------------	----

§4-5-3 电源	71
-----------------	----

§4-6 设计举例

第五章 级联电路的噪声	77
§ 5-1 半导体管电路.....	77
§5-1-1 共发射极电路	78
§5-1-2 共基极电路	79
§5-1-3 共集电极电路	80
§ 5-2 半导体管级联电路.....	81
§5-2-1 概述	81
§5-2-2 共发射极级联电路	83
§5-2-3 共基极级联电路.....	87
§5-2-4 共集电极级联电路	90
§ 5-3 场效应管与半导体管组合电路.....	93
§5-3-1 共源极-共发射极电路	93
§5-3-2 共漏极-共发射极电路	95
§5-3-3 共栅极-共发射极电路	96
§ 5-4 并联、差动和反馈电路.....	97
§5-4-1 并联放大器	97
§5-4-2 差动放大器	100
§5-4-3 反馈放大器	104
§ 5-5 低噪声放大器实例.....	105
§5-5-1 共发射极级联电路	105
§5-5-2 共发射极-共基极放大器	107
§5-5-3 高输入电阻放大器	107
§5-5-4 级联反馈放大器	108
§5-5-5 差动放大器	110
第六章 高频半导体器件的噪声性能	112
§ 6-1 概述.....	112
§ 6-2 噪声源相关.....	113
§6-2-1 场效应管噪声源的相关情况	113
§6-2-2 半导体管噪声源的相关情况	121
§ 6-3 管子的内部反馈.....	126
§ 6-4 噪声调制.....	127
§ 6-5 超高频半导体器件.....	128
§6-5-1 概述	128
§6-5-2 砷化镓场效应管	129
§6-5-3 半导体管	136
第七章 低噪声高频输入电路与放大器	142
§ 7-1 概述.....	142
§7-1-1 高频电路的特点	142
§7-1-2 信噪比与噪声系数	142
§7-1-3 噪声带宽与噪声温度	145

§ 7-2 输入电路的噪声系数	147
§7-2-1 无噪声放大器的输入电路匹配	147
§7-2-2 有噪声放大器的输入电路匹配	149
§7-2-3 无线噪声与噪声系数	153
§ 7-3 输入电路的选择	155
§7-3-1 带宽与噪声系数、功率增益的关系	155
§7-3-2 接收机的最小噪声系数	157
§7-3-3 噪声系数的改善	158
§ 7-4 超高频三极管放大器	163
§7-4-1 网络的 S 参数	163
§7-4-2 用散射参数表示噪声系数和增益	165
§7-4-3 噪声系数和增益的其他表示方式	173
§7-4-4 高电子迁移率放大器件 ($HEMT$)	175
§ 7-5 隧道二极管放大器	176
§7-5-1 单级隧道二极管放大器	176
§7-5-2 隧道二极管放大器与下级放大器的耦合	177
§7-5-3 用隧道二极管降低放大器的输入电导	178
§7-5-4 可交换功率、可交换增益与噪声系数	179
§ 7-6 参量放大器	180
§7-6-1 非线性电容变频	180
§7-6-2 上变频与参量放大器	181
§7-6-3 上变频器和参量放大器的噪声	183
§ 7-7 量子放大器的噪声	185
§7-7-1 脉泽的自发射噪声	185
§7-7-2 脉泽放大器	186
§7-7-3 激光器的噪声	188
§ 7-8 低噪声放大器比较	189

第八章 调谐器的噪声.....190

§ 8-1 变频器的噪声	190
§8-1-1 概述	190
§8-1-2 场效应管变频器	190
§8-1-3 半导体管变频器	192
§8-1-4 二极管变频器	194
§8-1-5 变频器噪声系数的改善	200
§ 8-2 振荡器的噪声	207
§8-2-1 概述	207
§8-2-2 无源电路中的噪声	207
§8-2-3 持续振荡的振幅扰动	209
§8-2-4 持续振荡的相位扰动	210
§8-2-5 加性噪声、 $1/f$ 噪声与起始时间的晃动	212

§8-2-6 振荡器噪声的改善	215
§ 8-3 光检波器、放大器和变频器的量子噪声	226
§8-3-1 散粒噪声	226
§8-3-2 光检波器的量子噪声	229
§8-3-3 线性放大器的噪声	230
§8-3-4 光变频器的噪声	231
§8-3-5 同步检波器的噪声	232
§8-3-6 量子噪声、热噪声与环境噪声的比较	234
§ 8-4 低噪声电路系统概述	236
第九章 宽带放大器	239
§ 9-1 概述	239
§ 9-2 平衡放大器	240
§9-2-1 定向耦合器	240
§9-2-2 单级平衡放大器	241
§9-2-3 噪声性能	244
§9-2-4 级联放大器	245
§ 9-3 反馈放大器	247
§9-3-1 最小正向互导条件	247
§9-3-2 宽带反馈放大器的噪声	249
§9-3-3 反馈放大器电路	256
§9-3-4 匹配反馈放大器	257
§ 9-4 分布放大器	260
§9-4-1 可用增益	260
§9-4-2 分布放大器的噪声	262
§9-4-3 分布放大器的电路	267
第十章 噪声测量	270
§ 10-1 概述	270
§ 10-2 等效噪声电压和电流的测量	270
§10-2-1 等效输入噪声电压	270
§10-2-2 噪声电压 e_n 和噪声电流 i_n 的测量	272
§ 10-3 噪声系数的测量	274
§10-3-1 正弦波测量法	274
§10-3-2 噪声发生器测量法	275
§10-3-3 其他方法	276
§ 10-4 噪声参数 F_{min} 、 $G_{s.o}$ 、 $B_{s.o}$ 和 R_n	277
§ 10-5 测量设备与误差	278
§10-5-1 测量设备	278
§10-5-2 测量误差	279
§ 10-6 高频和微波噪声测量	281
参考文献	285

第一章 噪声性能

§ 1-1 概 述

§ 1-1-1 噪声定义

噪声广义地可定义为所需信号以外的任何干扰信号。例如通过静电或电磁耦合，从系统以外的电力线来的50Hz干扰信号，电路之间的串音，无线电发射机的辐射信号，或来自荧光灯的干扰。上述干扰源大多属于人为的干扰。这类干扰可通过适当的屏蔽、滤波或电路元件的合理布置予以减小或消除。

通常，噪声是代表基本的随机噪声源，它是电系统中的器件和材料自发产生的起伏物理现象。例如，在温度高于绝对零度时，导体产生的热噪声就是典型的例子，也是本书主要讨论的内容之一。这种基本噪声不能确切地预测，也不能完全被消除，不过我们可以控制这类噪声。

噪声的重要性，在于它常常是传感器分析度的限制因素。一个通信系统能否有效地工作，噪声是主要的影响因素之一。一个系统的动态范围也受噪声的限制。噪声限制了系统动态范围的下限，而系统的其他性能，如失真度，则限制了系统动态范围的上限。此外，噪声也是控制系统和计算机系统的问题之一。例如，由于尖峰噪声的存在，使电路的设计发生困难。因为当噪声和信号混合后，噪声尖峰可能使一个电平检测器被错误地触发。

§ 1-1-2 噪声的统计特性

噪声完全是一种随机信号，它所包含的频率成分不论是振幅还是相位，都是随机的。噪声在任一瞬间的确切振幅是不能预测的。如果噪声的瞬间幅度是可以预知的，那么噪声就不是个问题了。

虽然噪声是随机的，在任一瞬间的振幅是不能预测的，但是对大量的同类随机事件进行的研究表明，它是存在一种确定的规律性的，这种规律性通常称为统计规律性。概率论及统计理论可用来定量地研究统计规律性。我们所要讨论的主要噪声，如热噪声和散粒噪声，它们的一个重要统计特性就是其瞬时幅度与时间的关系是服从高斯分布的，如式(1-1)所示[1-1]，

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1-1)$$

式中

$p(x)$ 是概率密度函数， x 是随机变量。

$\bar{x}$ 是统计平均值（或称数学期望），简称均值，它反映随机变量取值的集中位置。

$\sigma^2 = (\overline{x - \bar{x}})^2 = \overline{x^2} - (\bar{x})^2$ ，称为方差，它反映随机变量的集中程度。

$$\sigma = \sqrt{\overline{(x - \bar{x})^2}} \text{ 称为标准差或均方差。}$$

图 1-1 示出 $\bar{x} = 0$ 时的高斯分布曲线。

高斯分布说明，随机变量 x 取值大于或小于均值 $\bar{x}$ 的概率是很小的。在实际中，人们往往对随机变量的绝对值超过某些给定值的概率感兴趣。表 1-1 给出均值为零的高斯分布在变量为不同数值

(峰值)时的概率，其中

$$t = x/\sigma, t_0 = x_0/\sigma$$

当均值为零，即 $\bar{x} = 0$ ，方差 σ^2 为

$$\sigma^2 = \overline{x^2} = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx$$
$$\sigma = \sqrt{\overline{x^2}}$$

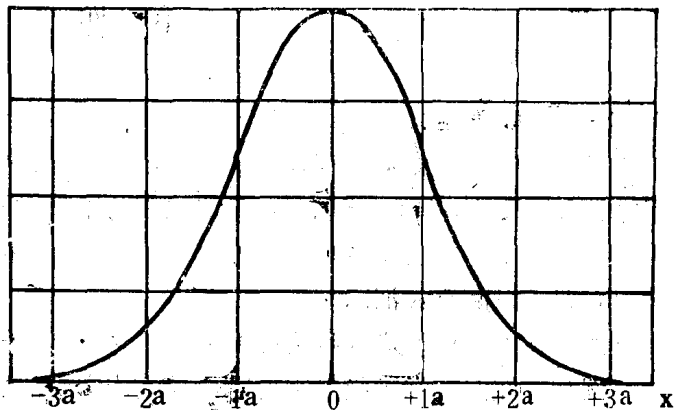


图 1-1 高斯分布的密度函数

表 1-1

t_0	$P(t > t_0)$
1.0	0.317
2.0	0.0455
3.0	0.0027
4.0	0.00006
4.5	0.000006

此时方差等于随机变量 x 的均方值，标准差为 x 的均方根值。

再看 $t_0 = x_0/\sigma$ ，如果 $t_0 = 1$ ，即 $x^0 = \sigma$ ，也就是说，随机变量的绝对值 $|x_0|$ 等于均方根值的概率是 0.317， $|x_0|$ 比均方根值大一倍的概率是 0.0455，余此类推。将要讨论的主要噪声，如热噪声和散粒噪声，就具有上述特性。所以这些噪声的峰值超过其均方根值三倍时的概率是很小的。均值 $\bar{x}$ 就代表噪声的直流分量，方差 σ^2 代表噪声电压（或电流）消耗在 1 欧姆电阻上的交流平均功率，标准差则代表噪声电压（或电流）的有效值。

我们感兴趣的主要噪声过程属于平稳随机过程和各态历经过程。平稳随机过程是指它的概率密度函数与时间起点无关，即

$$p\{x(t)\} = p\{x(t-t_0)\} \quad (1-2)$$

上式说明平稳随机过程的统计特性与所选取的时间起点无关，这是有实际意义的。例如，我们测量一个电阻的热噪声统计特性，不论在什么时候进行，其结果都是相同的。又如离开热阴极的电子数目不依赖于人们进行观察的时间。这样就使研究噪声的问题简化了。

各态历经性是指对平稳随机过程的一个样本函数取时间均值（观察时间足够长），从概率意义上讲，就趋近于该过程的统计（集合）均值。也就是说，可使“统计平均”化为“时间平均”。例如，

$$x(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt \quad (1-3)$$

$$\sigma^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [x(t) - \overline{x(t)}]^2 dt \quad (1-4)$$

就可使计算问题简化。

随机变量的另一个有用的数字特征是相关系数 C ，它的定义如下：

$$C = \frac{\overline{XY}}{\sqrt{\overline{X^2} \cdot \overline{Y^2}}} \quad (1-5)$$

式中的 X 和 Y 是两个随机变量。两个随机变量的均值定义和一个变量的相似，即

$$\overline{XY} = \iint XY p(X, Y) dX dY \quad (1-6)$$

如果 $\overline{XY} = 0$ ，则两个随机变量 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 是不相关的。若 $\overline{XY} \neq 0$ ，那么两个随机变量是相关的。对于 $|C| = 1$ 的情况，则两个随机变量是完全相关的。

对于两个随机变量部分相关的情况，即 $|C| < 1$ ，我们可以把变量 Y 分为两部分，一部分是和 X 完全相关，以 aX 表示，另一部分与 X 完全不相干，以 Z 表示，这样有

$$Y = aX + Z \quad (1-7)$$

这里 $\overline{X} = \overline{Y} = \overline{Z} = 0$ ，以及 $\overline{XZ} = 0$ 。如果 C 是两个变量的相关系数，则有

$$a = C \left(\frac{\overline{Y^2}}{\overline{X^2}} \right)^{1/2} \quad (1-8)$$

$$\overline{Z^2} = \overline{Y^2} (1 - C^2) \quad (1-9)$$

以上关于相关系数的叙述，对以后讨论噪声问题是有用的。因为在以后将要遇到的一些有源器件，如半导体管、场效应管，或一些电路系统，它们往往有多个噪声源。而这些噪声源中，有些常常又是部分相关的。

上面介绍的均值和方差是描述随机过程的重要特征，但它们还不能反映出随机过程的内在联系，而自相关函数（相关函数）则可用来描述随机过程的内在联系的特征。自相关函数 $R(t_1, t_2)$ 定义为

$$R(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [x_1 - \overline{x(t_1)}][x_2 - \overline{x(t_2)}] p_2(x_1, x_2; t_1, t_2) dx_1 dx_2 \quad (1-10)$$

上式反映了 $x(t)$ 在任意两个不同时刻取值之间的相关程度。

平稳随机过程的一维概率密度与时间无关，它的二维概率密度只与 t_1, t_2 的时间间隔有关，而与时间的起点无关，它的相关函数也只是与时间间隔有关，而与时间的起点无关，设 $\tau = t_2 - t_1$ ，则相关函数可表示为

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1 x_2 p_2(x_1, x_2, \tau) dx_1 dx_2 \quad (1-11)$$

对于各态历过程有

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) X(t + \tau) dt \quad (1-12)$$

如果令 $\tau = 0$ ，则

$$R(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt \quad (1-13)$$

可以看到, $R(0)$ 代表噪声电压 (或电流) 消耗在 1 欧姆电阻上的总平均功率。而方差 σ^2 为

$$\sigma^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [x(t) - \bar{x}(t)]^2 dt \quad (1-14)$$

如前面指出, 方差 σ^2 代表噪声电压 (或电流) 消耗在 1 欧姆电阻上的交流平均功率。

相关函数的重要性还在于它和平稳随机过程的功率谱密度之间的关系。这可由维纳-辛钦定理来说明, 即

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1-15)$$

上式的 $S(\omega)$ 是平稳随机过程的功率谱密度, 它说明平稳随机过程的功率谱密度就是其相关函数的傅里叶变换。为此

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (1-16)$$

上式给出了从频率角度来描述过程统计规律的数字特征和从时间角度描述过程统计规律的数字特征之间的联系。它们对随机噪声和通信系统的分析都是很有用的。

如果噪声过程的功率谱密度为

$$S(\omega) = S_0 \quad (1-17)$$

上式的 S_0 为常数, 则称这种随机噪声过程为白噪声过程。例如, 以后要讨论的热噪声就是白噪声。白噪声过程的相关函数为 [1-2]

$$R(\tau) = S_0 \delta(\tau) \quad (1-18)$$

式中的 $\delta(\tau)$ 是单位脉冲函数。可以看到这相关函数意味着过程的任一点是和过程的其他点不相关的。图 1-2 (a)、(b) 示出白噪声过程的功率谱密度和相关函数。

如果过程是

$$\begin{aligned} S(\omega) &= S_0, \quad |\omega| \leq 2\pi\Delta f \\ &= 0, \quad \text{其他频率} \end{aligned} \quad (1-19)$$

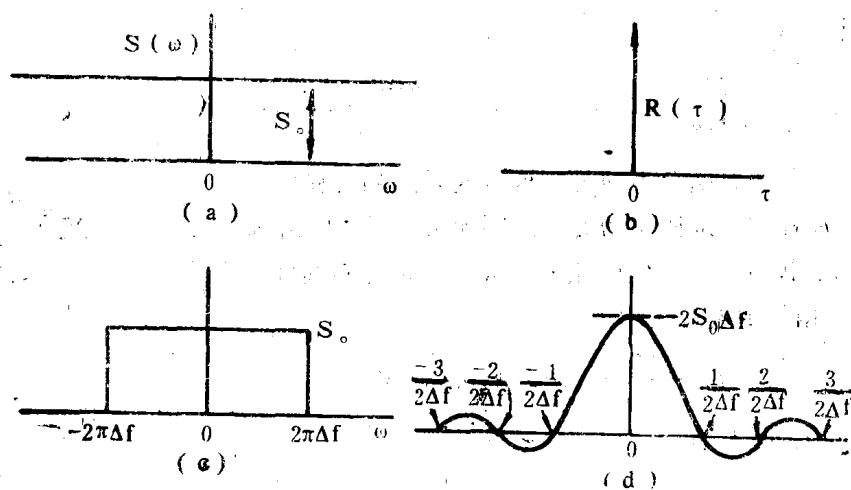


图 1-2 白噪声和有限通带白噪声的谱密度与相关函数

则称为有限带宽的白噪声过程, 如图 1-2 (c) 所示。这种过程的相关函数为

$$R(\tau) = 2\Delta f S_0 \frac{\sin(2\pi\Delta f \tau)}{2\pi\Delta f \tau} \quad (1-20)$$

如图 1-2(d) 所示。由图可见 $\tau \rightarrow \infty$ 时, $R(\tau)$ 为零。但通常在经过几个 $1/\Delta f$ 秒后, 可近似地把 $R(\tau)$ 看成零。为此, 有限带宽为 Δf 的白噪声过程, 在几个 $1/\Delta f$ 秒范围内是相关的, 而在几个 $1/\Delta f$ 秒范围外可近似地认为是不相关的。

知道了过程的功率谱密度, 则随机过程的均方值即可求得

$$\overline{X^2(t)} = \int_0^\infty S(f) df \quad (1-21)$$

在实际应用中, 功率谱密度是比较容易测得的。设一个平稳随机信号 $X(t)$ 加到一个具有传递函数为 $H(f)$ 的任意线性系统, 系统的输出信号为 $Y(t)$ 。若 $S_x(f)$ 和 $S_y(f)$ 分别为 $X(t)$ 与 $Y(t)$ 的功率谱密度, 则有

$$S_y(f) = S_x(f) |H(f)|^2 \quad (1-22)$$

而输出信号 $Y(t)$ 则为

$$\overline{Y^2(t)} = \int_0^\infty S_x(f) |H(f)|^2 df \quad (1-23)$$

假如线性系统是一个放大器, 那么 $\overline{Y^2(t)}$ 可用一个平方律检测器测得。如果放大器是尖锐地调谐在频率 f_0 点, 那么 $S_x(f) \approx S_x(f_0)$, 且 $S_x(f)$ 值可由 $\overline{Y^2(t)}$ 的测量值求得。这样

$$Y^2(t) = S_x(f_0) \int_0^\infty |H(f)|^2 df = S_x(f) H_0^2 \Delta f_0 \quad (1-24)$$

式中的 $H_0 = H(f_0)$ 是系统中间频带的响应值。而 Δf_0 是系统的有效带宽。 H_0 和 Δf_0 都可用信号发生器来确定。

在这一节里我们简要地介绍了有关噪声的主要统计特性, 如热噪声和散粒噪声的瞬时幅度与时间的关系是服从高斯分布的, 而方差、相关函数以及功率谱密度是分析噪声时经常用到的一些随机函数的数字特征。在以后的分析中还会遇到一些其他特性, 如瑞利分布等, 这里就不赘述了。

§ 1-2 热噪声与量子噪声

§ 1-2-1 热噪声

经常遇到的噪声类型主要有三种, 它们是热噪声、低频噪声和散粒噪声。量子噪声可归入散粒噪声类型。热噪声是遇到最多的, 所以这里首先讨论它。

热噪声是导体中的电荷载流子受到热激励而产生的随机振动。这种载流子运动和分子的布朗运动相似。对布朗运动的研究, 预示出热噪声的存在。1927年约翰逊(J. B. Johnson)首先观察了热噪声, 接着奈奎斯特(H. Nyquist)在1928年提出了理论分析。所以热噪声有时又叫约翰逊噪声或奈奎斯特噪声。

在温度高于绝对零度的导体中, 电子处于随机运动状态, 这种运动(摆动)和温度有关。由于每个电子带有 $1.59 \times 10^{-19} C$ 的电荷, 所以当电子在材料中作随机运动时, 形成很多小的电流涌。虽然在导体中由这些运动产生的平均电流为零, 但瞬间是有电流起伏的, 这使得导体两端有电位差存在。

导体中的热噪声功率 P_i 为

$$P_i = k T \Delta f$$

(1-25)

式中

$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ W s / } ^\circ\text{K}$, 是玻兹曼常数,

T ——导体中的温度, 单位: $^\circ\text{K}$,

Δf ——被测系统的噪声带宽, 单位: Hz 。

在室温为 290°K 和带宽为 1 Hz 的情况下, 由式 (1-25) 可求得有效热噪声功率 P_i 为 $4 \times 10^{-21} \text{ 瓦}$ 。相对于 1 W 功率来说为 -204 dB 。

由式 (1-25) 求得的噪声功率是由载流子的热激励产生的, 但是, 还有其他噪声存在于一个导体中, 不过这里就不讨论了。在一个电阻元件中, 热噪声是代表噪声的最低电平。

下面根据热动力学来推导式 (1-25), 即奈奎斯特定律。

假设一个电阻与一个电容并联, 如图 1-3 所示。这个系统有一个自由度*, 它对应于一种可以存储能量的状态。按能量的均配理论, 这个自由度的平均能量为 $\frac{1}{2} k T p$ 。这里 p 是普朗克系数。经典上把能量的均配理论应用到一个热平衡系统, 对系统过程的每一个自由度相应有一平均能量 $\frac{1}{2} k T$ 。这个推导是基于以下假设, 即能量分布是均匀的。但是, 被量子力学理论, 能量分布不是均匀的, 而是被量化了的。由此导致对每一个自由度的平均能量表示式作出修改, 即把 $\frac{1}{2} k T$ 改为 $\frac{1}{2} k T p$, 其中 p 与被贮存的能量的频率有关。

设上述平均能量贮存在电容器 C 内, 并且为 $\frac{1}{2} C \overline{V^2}$, 显然

$$\frac{1}{2} C \overline{V^2} = \frac{1}{2} k T p$$

所以

$$\overline{V^2} = \frac{k T}{C} p \quad (1-26)$$

再看电阻, 它是噪声的来源, 它可用戴维宁等效电路表示, 即以电阻和一个电压源 e 串联来表示, 如图 1-3 (b) 所示。如以功率谱密度 $S(f)$ 来表示噪声分布, 可得

$$\overline{e^2} = \int_0^\infty S(f) df \quad (1-27)$$

由电路分析可知

$$V = \frac{e(f)}{(1 + 4\pi^2 f^2 C^2 R^2)^{1/2}} \quad (1-28)$$

* 在一个电路中, 自由度的数目是指在这系统中的能量可以被贮存的方式。它是直接和系统处理自然复数频率的数目相等的。

均方电压值为

$$\overline{V^2} = \int_0^\infty \frac{S(f)}{1 + 4\pi^2 f^2 C^2 R^2} df \quad (1-29)$$

为了便于推导, 先假设 $S(f)$ 和频率无关, 则 $S(f) = S$ 。将式 (1-26) 代入上式可得

$$\begin{aligned} \frac{kT_p}{C} &= S \int_0^\infty \frac{1}{1 + 4\pi^2 f^2 R^2 C^2} df \\ &= \frac{S}{4CR} \end{aligned}$$

由此可得*

$$S = 4kTRp \quad (1-30)$$

式中

$$p = \frac{hf}{kT} \left\{ \frac{1}{e^{hf/kT} - 1} + \frac{1}{2} \right\} \quad (1-31)$$

其中 f 是频率, $h = 6.624 \times 10^{-34} \text{Js}$, 是普朗克常数。

如果 $hf \ll kT$, 则 p 可展成

$$p = 1 + \frac{1}{12} \left(\frac{hf}{kT} \right)^2 \quad (1-32)$$

这结果和上面假设 S 与频率无关相违背。不过由表 1-2 可以看到, 在室温下, 在整个无线电频谱范围内, p 值与 1 的差别是很小的, 所以上述假设还是可以成立。

从式 (1-25) 可以看到噪声功率是和带宽成正比的。在一频带中, 每 1Hz 带宽具有相同的噪声功率。例如从 1Hz 到 2Hz 的噪声功率和从 1000Hz 到 1001Hz 的噪声功率是相同的。

表 1-2

$p-1$ 与温度和频率关系

频率	1°K	300°K
0	0	0
10^8Hz	7×10^{-10}	8×10^{-16}
10^9Hz	10^{-8}	8×10^{-9}
10^{10}Hz	0.1	8×10^{-7}
10^{11}Hz	4	8×10^{-5}
10^{12}Hz	49	8×10^{-3}

这也是热噪声又被称为“白噪声”的原因。“白”的意思指噪声是由很多频率成分组成, 有如白光是由很多颜色组成一样。由分析可知, 其噪声—频率特性是平坦的。不过白光是每一波长包含有相同的能量, 而并非每赫芝带宽有相同的能量。

热噪声可说是任何检测系统分析度的最终限制。即使一个放大器可做到没有噪声, 但是信号源的电阻仍然会存在噪声。

式 (1-25) 可以另一种更有用的形式表达, 即

$$p_i = kT\Delta f = \frac{e^2}{4R} \quad (1-33)$$

*物理书里式 (1-31) 中的 hf 表示为 $h\nu$ 。