

微弱信号检测方法及仪器

熊璋 著



国防工业出版社

73.412

313

51

微弱信号检测方法及仪器

戴逸松 著



·北京·

500

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

微弱信号检测方法及仪器/戴逸松著. —北京:国防工业出版社, 1994. 12

ISBN 7-118-01380-3

I. 微… II. 戴… III. ①信号检测-方法②信号检测-仪器 IV. TN911. 23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 12668 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10% 269 千字

1994 年 12 月第 1 版 1994 年 12 月北京第 1 次印刷

印数 1—2500 册

定价: 15.60 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

1015500

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄 宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾 铎		
秘 书 长	刘增德		
委 员	尤子平	朱森元	朵英贤
(按姓氏笔划为序)	刘 仁	何庆芝	何国伟
	何新贵	宋家树	张汝果
	范学虹	胡万忱	柯有安
	侯 迁	侯正明	莫梧生
	崔尔杰		

内 容 简 介

本书全面系统地阐述了在强背景噪声中微弱信号检测的基本原理、方法及仪器。全书共分三部分：第一篇介绍电噪声的基础知识，包括电路中噪声来源、统计特征、计算方法、电路中噪声性能指标；第二篇论述噪声中检测信号的基本方法，包括噪声中信号波形恢复（滤波）、信号判决、信号参量估计及信号谱估计；第三篇介绍低噪声放大器设计，以及几种典型的微弱信号检测仪器的原理及应用。

本书既系统介绍微弱信号检测的基本理论，又从技术角度介绍噪声中信号检测的方法及仪器。书中包含了本学科国内、外最新研究成果及作者多年来科研成果。

可供国防、工业、物理、化学、地质勘探、生物医学等领域中从事微弱信号检测、通信、雷达、仪器仪表、自动控制等方面的科技人员使用，也可供大专院校有关专业师生参考。

目 录

第一篇 电噪声的基础知识	1
第一章 噪声及其统计特征	1
1-1 噪声的概率分布	1
1-2 噪声的功率谱密度	4
1-3 噪声的相关函数	5
1-4 常见的电噪声统计特征	9
1-5 窄带噪声	14
第二章 噪声通过电路响应	19
2-1 噪声通过线性电路响应	19
2-2 非平稳噪声通过线性电路响应	23
2-3 噪声通过非线性电路响应	25
2-4 二极管检波器的检测性能分析	30
2-5 放大器的噪声带宽	33
第三章 放大器的噪声源及噪声性能	37
3-1 电阻中的噪声	37
3-2 双极晶体管的内部噪声	42
3-3 场效应晶体管的内部噪声	51
3-4 放大器的 E_n - I_n 噪声模型	54
3-5 放大器的噪声系数	63
3-6 复杂电路的噪声计算	68
第二篇 噪声中微弱信号的检测方法	71
第四章 噪声中信号波形的恢复	71
4-1 维纳滤波理论	72
4-2 维纳滤波器的实现	78
4-3 离散随机过程的时间序列模型	86

4-4	卡尔曼滤波和预测	88
4-5	噪声抵消系统及其性能分析	99
4-6	自适应滤波器	106
第五章 噪声中信号判决		119
5-1	单次取样的信号判决	120
5-2	二元信号判决的最佳准则	125
5-3	多次取样的确知信号判决	131
5-4	随机参量信号的判决	141
5-5	匹配滤波器及其在信号判决中的应用	145
5-6	匹配滤波器的实现	150
第六章 噪声中信号参量估计		158
6-1	最大后验概率估计	159
6-2	贝叶斯估计	160
6-3	噪声中信号振幅及相位估计	165
6-4	线性最小方差估计	168
6-5	最小二乘估计	175
6-6	估计量的性质	179
第七章 噪声中信号谱估计		184
7-1	具有观测噪声情况的周期图法	185
7-2	具有观测噪声的 $AR(p)$ 信号谱估计	192
7-3	具有观测噪声的正弦组合信号谱估计	199
7-4	最大似然谱估计	203
第三篇 微弱信号检测仪器		207
第八章 低噪声放大器		207
8-1	低噪声电子设计的基本原则	207
8-2	直接耦合方式的有源器件及工作点选择	209
8-3	噪声匹配网络及设计	217
8-4	低噪声放大器的抗干扰方法	226
8-5	国外典型低噪声前置放大器及其使用方法	231
第九章 锁定放大器		237
9-1	相关解调器的基本原理	238
9-2	相关解调器的性能分析	244

9-3 开关式相关解调器	248
9-4 锁定放大器及其性能指标	254
9-5 国外典型锁定放大器及其使用方法	260
第十章 取样积分器	270
10-1 取样积分器的基本原理	270
10-2 取样积分器的频域特性	275
10-3 模拟式取样积分器	278
10-4 国外典型取样积分器及其使用方法	282
10-5 数字信号平均器	291
第十一章 光子计数器	296
11-1 光子计数原理	297
11-2 光子计数器	301
11-3 国外典型光子计数器及其使用方法	308
11-4 光学多道分析仪	314
参考文献	315

第一篇 电噪声的基础知识

第一章 噪声及其统计特征

噪声属于电路中的随机扰动,它可能来自电路中元器件中的电子热运动,或者是半导体器件中载流子的不规则运动。噪声是限制信号检测系统性能的决定性因素,因此它是信号检测中的不利因素。对于微弱信号检测来说,如能有效克服噪声,就可以提高信号检测的灵敏度。

本章将要介绍电噪声的一些主要的统计特征,其中噪声的概率分布密度、功率谱密度及相关函数就是一些主要统计特征量。了解并掌握这些统计特征量,就可以采取方法对信号进行各种处理,从而实现从噪声中提取微弱信号。

1-1 噪声的概率分布

电路中噪声是一种连续型随机变量,即它在某一时刻可能出现各种可能数值。图 1-1 为典型的噪声电压波形。噪声电压在 t 时刻的大小,只能用概率分布密度 $p(n)$ 表示,它表示噪声电压 $n(t)$ 在 t 时刻取值为 n 的概率。

知道 $p(n)$ 后,就可以知道 t 时刻噪声电压取值在 n_1 与 n_2 之间的概率

$$P(n_1 < n < n_2) = \int_{n_1}^{n_2} p(n) dn \quad (1-1)$$

噪声属于一种随机过程,根据随机过程理论,最具有代表性的

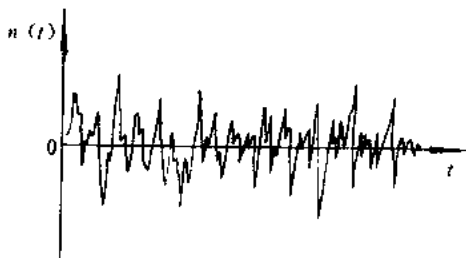


图 1-1 噪声电压波形

统计特征量为

(1)数学期望 $E[n]$

$$E[n] = \int_{-\infty}^{\infty} np(n)dn \quad (1-2)$$

(2)方差 $D[n]$

$$D[n] = \int_{-\infty}^{\infty} (n - E[n])^2 p(n)dn \quad (1-3)$$

通过简单运算,式(1-3)可以写成

$$D[n] = E[n^2] - E^2[n] \quad (1-4)$$

式(1-4)中 $E[n^2]$ 称为噪声的二阶中心矩。电路处于稳定状态时,噪声的方差和数学期望一般不再随时间变化,这时噪声电压称为广义平稳随机过程。若噪声的概率分布密度不随时间变化,则称为狭义平稳随机过程(或严格平稳随机过程)。显然,一个严格平稳随机过程一定为广义平稳随机过程,反之则不然。

电路中遇到的噪声还具有各态经历性质,就是其统计平均可以用时间平均来计算,即

$$E[n] = \bar{n} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T n(t)dt \quad (1-5)$$

$$E[n^2] = \bar{n}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T n^2(t)dt \quad (1-6)$$

由此可见,如果一个随机过程是具有各态经历的随机过程,将会给噪声计算及测量带来很大方便。因此,以后若没有特别申明,均把

电噪声看成是具有各态经历过程,自然它也是一种广义平稳随机过程。

线性电路中噪声电压的概率分布密度 $p(n)$ 一般符合高斯正态分布,即

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left[-\frac{(n-a)^2}{2\sigma_n^2}\right] \quad (1-7)$$

将式(1-7)代入式(1-2)及式(1-3),可以得到

$$E[n] = a, \quad D[n] = \sigma_n^2 \quad (1-8)$$

式中 a 为电噪声的平均值,通常 $a=0$; σ_n^2 为电噪声的交流功率, σ_n^2 越大,表示噪声越强。

式(1-7)说明电噪声在任何瞬间均可能取很大的数值(实际上,当然受到放大器的限幅),但取值越大则概率越小,取值超过 $|n| > n_0$ 的概率为

$$P(|n| > n_0) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \int_{-n_0}^{n_0} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_n^2}\right) dn \quad (1-9)$$

表 1-1 列出在不同 n_0/σ_n 值下超过 n_0 的概率。

表 1-1 高斯噪声的峰值超过 n_0 的概率

超过 n_0 的概率 $P(n > n_0)$	0.1	0.01	0.001	0.0001	0.00001	0.000001
n_0/σ_n	1.645	2.576	3.291	3.890	4.417	4.892

由表 1-1 可见,任何瞬间电路噪声值基本上是在 $\pm 4\sigma_n$ 之间,这在噪声测量中有一定实用价值,例如,用示波器观察噪声波形时,能够看到的最大噪声电压峰峰值 V_{P-P} 可以认为是有效值 σ_n 的 4×2 倍。于是,被测噪声电压有效值 $\sigma_n = V_{P-P}/8$ 。上述结果也说明,测量噪声电压时,测量放大器的动态范围必须大于 3 至 4 倍的被测噪声有效值,否则噪声峰值可能被限幅,使测量带来误差。

1-2 噪声的功率谱密度

电噪声测量及计算主要关心的是噪声功率。由于噪声中包含各种频率分量,因此噪声的功率谱密度也是它的一个主要的统计特征量。

设噪声电压 $n(t)$ 的功率为 P_n , 在频率为 f 与 $f+\Delta f$ 之间的功率为 ΔP_n , 则噪声的功率谱密度定义为

$$S_n(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\Delta P_n}{\Delta f} \quad (1-10)$$

功率谱密度也可用 $S_n(\omega)$ 来表示, 其中 ω 为角频率。知道噪声的功率谱密度后, 噪声功率即可以表示为

$$\begin{aligned} P_n &= \int_{-\infty}^{\infty} S_n(f) df \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_n(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (1-11)$$

根据式(1-10), 功率谱密度的单位为 V^2/Hz 或 A^2/Hz 。其次, 一般放大器中输出噪声受放大器带宽(f_1, f_2)限制, 因此计算输出功率时式(1-11)的积分上下限应改为 f_1 及 f_2 。低噪声放大器的基本要求是在信号频带范围内尽量降低输出噪声功率谱密度, 而且放大器的带宽是限制在能使信号的特征频谱分量通过即可, 过宽的带宽不会增加有用的信息量, 反而会降低输出信噪比。

工程应用中, 为计算方便, 经常采用单边功率谱密度。这是因为正频率与负频率的功率谱密度对称, 故定义单边功率谱密度为

$$\begin{aligned} F_n(f) &= 2S_n(f), \quad f > 0 \\ F_n(f) &= 0, \quad f < 0 \end{aligned}$$

这样, 噪声功率即为

$$P_n = \int_0^{\infty} F_n(f) df \quad (1-12)$$

电路中遇到的噪声一般具有平坦的功率谱密度, 称白噪声(见图 1-2)。实际上, 严格的白噪声是没有的, 因为白噪声意味着具有无限大的噪声功率。图 1-2 给出典型的电阻热噪声仅在 $10^{13} \sim 10^{14}$

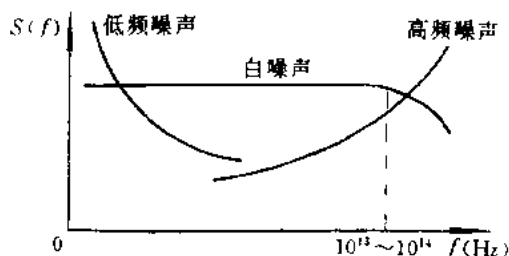


图 1-2 电阻热噪声的功率谱密度曲线

Hz 内具有白噪声性质。在电路中,还会遇到另一类噪声,其 $S_n(f)$ 不是常数,称有色噪声。像电子器件中经常存在的 $1/f$ 噪声,其功率谱密度 $S_n(f) \sim 1/f$,这种噪声有很强的低频成分,称为低频噪声或红噪声。以后还可以遇到晶体管在 f 很大时的噪声,其功率谱密度 $S_n(f) \sim f^2$,这种噪声有很强的高频成分,称为高频噪声或蓝噪声。

应该指出,放大器噪声可能有白色高斯噪声(白噪声且具有高斯概率分布),也可能有白色非高斯噪声(白噪声且具有非高斯概率分布),还可能有既非白色,又非高斯分布的噪声。线性电路中噪声一般是高斯白噪声,仅在很高频或很低频时才可能可出现有色噪声,而非线性电路(例如:高斯噪声经检波后输出)一般为非高斯噪声,常见的有瑞利分布、莱斯分布等,后面将予以介绍。

1-3 噪声的相关函数

噪声虽然是一种随机过程,即各时刻取值是随机的,但两个不同时刻的噪声值仍存在一定的关系。研究噪声(或指一般随机过程)在不同时刻取值之间的相关性,也是电噪声的一个主要统计特征。

一、噪声的自相关函数

自相关函数指一个随机过程在不同时刻 t_1 及 t_2 取值的相关性,定义为

$$R_n(t_1, t_2) = E[n(t_1)n(t_2)] \quad (1-13)$$

对于具有各态经历的平稳随机过程,则统计平均(或称集平均)又可用时间平均表示,而且由于统计特征量与时间起点无关,故可以令 $t_1 = t, t_2 = t - \tau$, 则 $R_n(t_1, t_2) = R_n(t, t - \tau)$, 简记为 $R_n(\tau)$ 。于是, 平稳随机过程的噪声自相关函数为

$$\begin{aligned} R_n(\tau) &= E[n(t)n(t - \tau)] \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T n(t)n(t - \tau) dt \end{aligned} \quad (1-14)$$

电噪声的自相关函数具有下列重要特性:

- (1) $R_n(\tau)$ 仅与时间差 τ 有关, 而与计算时间 t 的起点无关。
- (2) $R_n(\tau)$ 随 τ 的增加, 逐渐衰减, 表示在时间上相关性逐渐减少。特别是对零均值噪声, 可以证明当 $\tau \rightarrow \infty$ 时, $R_n(\tau) \rightarrow 0$ 。
- (3) $R_n(\tau)$ 是一种偶函数, 即 $R_n(\tau) = R_n(-\tau)$, 因此自相关函数又可以写为

$$\begin{aligned} R_n(\tau) &= E[n(t)n(t + \tau)] \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T n(t)n(t + \tau) dt \end{aligned} \quad (1-15)$$

- (4) 当 $\tau = 0$ 时 $R_n(\tau)$ 具有最大值, 且

$$R_n(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T n(t)n(t) dt = E[n^2]$$

特别当 $E[n] = 0$ 时, $R_n(0) = D[n] = \sigma_n^2$

噪声的功率谱密度 $S_n(\omega)$ 及自相关函数 $R_n(\tau)$ 都是描写随机过程的十分重要的统计特征量, 称为二阶统计特征。这两个统计特征量对于一个高斯过程来说是完全足够(高斯过程的高阶统计量为零), 但对于非高斯过程则是不够的。近年来, 人们已开始注意对高阶统计量研究, 以便检测非高斯信号。

平稳随机过程理论中, 自相关函数 $R(\tau)$ 及功率谱密度 $S(f)$ 之间具有重要关系(为一般起见, 下标 n 省略), 这就是著名的维纳-辛钦(Wiener-Khinchine)定理^{[1]、[2]、[3]}, 即二者满足傅里叶变换关系, 采用复数表示法写为

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

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1-17)$$

则式(1-16)及(1-17)成立的条件为

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(f) df < \infty \quad \text{及} \quad \int_{-\infty}^{\infty} |R(\tau)| d\tau < \infty$$

这对电路噪声来说,一般均能满足。

由于 $R(\tau)$ 及 $S(f)$ 均为偶函数,故上式又可写成

$$R(\tau) = 2 \int_0^{\infty} S(f) \cos \omega\tau df$$

$$S(f) = 2 \int_0^{\infty} R(\tau) \cos \omega\tau d\tau$$

二、噪声的互相关函数

与自相关函数类似,两个不同的随机过程 $x(t)$ 和 $y(t)$ 之间也可能有某种相关性。例如,双极型晶体管的基极电流噪声与集电极电流噪声均来自半导体内部噪声源,因此二者必然相关。为此,可用互相关函数来描述两个随机过程的相关性,其定义为

$$R_{xy}(t_1, t_2) = E[x(t_1)y(t_2)] \quad (1-18)$$

对于具有各态经历的平稳随机过程,则 $R_{xy}(t_1, t_2)$ 可以写成 $R_{xy}(\tau)$, 其中 $t_1 = t, t_2 = t - \tau$, 其互相关函数可表示为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t - \tau) dt \quad (1-19)$$

同理

$$R_{yx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t - \tau)y(t) dt \quad (1-20)$$

互相关函数具有下列重要特性:

(1) $R_{xy}(\tau)$ 仅与时间差 τ 有关,而与计算时间 t 的起点无关。

(2) $R_{xy}(\tau) = R_{yx}(-\tau)$

(3) $|R_{xy}(\tau)| \leq \sqrt{R_x(0)R_y(0)}$, 当两个随机过程互不相关时,则一定有 $R_{xy}(\tau) = R_{yx}(\tau) = 0$ 。例如,被检测信号与系统的观察噪声