

噪 声 — 测 量 — 技 术

郭挺祥 张 伦编著

人民邮电出版社

噪 声 测 量 技 术

郭挺祥 张 伦 编著
张 世 箕 审校

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书内容包括：噪声的类型、噪声的统计描述，表示电噪声的常用术语，元件和网络中的噪声、信号源噪声、通信系统（多路电话及电视）中的噪声、测量噪声常用的仪器设备及测量方法、标准噪声源的建立及辐射计技术等。书中着重讨论了测量噪声系数的几种方法，即Y系数法、3分贝法、自动法、增益控制法、连续波法、正切法、比较法，介绍了每种测量方法的适用范围、精确度，并对测量误差进行详细分析，指出提高测量精确度的途径，书中还对微波接力通信系统中的噪声测量作了专门论述。

本书可供从事微波通信、雷达、电子对抗、微波仪表和射电天文等专业的科技人员和大专院校师生参考。

噪 声 测 量 技 术

郭挺祥 张 伦 编著
张 世 箕 审校

*

人民邮电出版社出版
北京东长安街27号
天津新华印刷一厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售

*

开本787×1092 1/32 1984年2月第一版
印张：8 4/32 页数：130 1984年2月天津第一次印刷
字数：184千字 印数：1—10,500册
统一书号：15045·总2832-无6269
定价：1.00 元

前 言

电噪声测量是电子测量技术中的一个重要分支。在通信、雷达、电子器件、射电天文、电子对抗等技术领域都要涉及噪声这个共同的技术指标，尤其是在所有的接收设备中，了解并掌握噪声的来源，正确确定噪声性能（噪声系数）更是一个十分重要的课题。因此，长期以来，噪声测量一直为人们所关注并进行了广泛的研究。

本书首先简略地论述了有关噪声的若干基本知识，包括噪声的类型、噪声的统计描述、噪声测量中常用的一些术语和仪器设备及标准噪声源的建立。然后，着重介绍了测量噪声系数的几种方法，在论述每种测量方法的同时，指出了它们的适用范围及精确度限制因素，并对测量误差进行了详细分析，对于微波接力通信系统中的噪声测量问题也作了专门论述。

本书的部分内容系作者多年从事噪声测量工作的总结。书中的1.6.7.8.9章由郭挺祥编写，2.3.4.5章由张伦编写。第10章约请邮电部506厂吴冠中同志编写。全书经成都电讯工程学院张世箕教授审校。作者谨向他们表示衷心的感谢。

作者水平有限，书中缺点和错误在所难免，诚恳地希望读者批评指正。

作者

目 录

第一章 概论

- 1-1 信号和噪声 1
- 1-2 噪声研究的意义 3
- 1-3 噪声技术的研究对象及本书的内容 8

第二章 噪声的幅度起伏和能谱

- 2-1 描述噪声常用的统计学概念10
- 2-2 噪声的功率谱18
- 2-3 窄带噪声和宽带噪声22
- 2-4 正态(高斯)噪声27
- 2-5 瑞利噪声30

第三章 电路元件的噪声

- 3-1 噪声的类型33
- 3-2 电阻的噪声34
- 3-3 电子管的噪声38
- 3-4 晶体管的噪声43
- 3-5 场效应晶体管的噪声来源46

第四章 器件和设备的噪声性能参量

- 4-1 等效电压源和等效电流源48
- 4-2 资用功率和资用噪声功率50
- 4-3 资用功率增益52
- 4-4 等效噪声带宽54
- 4-5 噪声温度56

4-6	相对噪声温度	57
4-7	超噪比 (ENR)	57
4-8	噪声系数	58
4-9	有效输入噪声温度	63
4-10	工作噪声温度	64
第五章 测量噪声的常用仪器		
5-1	噪声发生器	66
5-2	连续波信号发生器	82
5-3	功率计	83
5-4	信号电平指示器	84
5-5	精密可变衰减器	84
5-6	精密固定衰减器	85
5-7	放大器	85
5-8	阻抗电桥和反射计	86
第六章 噪声系数的测量方法		
6-1	概述	88
6-2	Y 系数法	89
6-3	二倍功率法 (3 分贝法)	97
6-4	噪声系数的自动测量法	105
6-5	增益控制法	109
6-6	连续波法	117
6-7	正切法	121
6-8	比较法	126
第七章 标准噪声源和辐射计		
7-1	标准噪声源	132
7-2	辐射计	140
7-3	辐射计的灵敏度	165

7-4	噪声源的校准	166
第八章 信号源噪声性能的测量		
8-1	信号源噪声的特点	169
8-2	信号源噪声性能表示方法	170
8-3	调制噪声的测量原理	175
8-4	信号源调制噪声的测试系统	178
第九章 参量放大器噪声性能的测量		
9-1	概述	189
9-2	测量方法	189
9-3	测量误差的考虑	195
9-4	误差计算结果	202
9-5	两种改善精确度的测量方法	204
第十章 微波接力通信系统的噪声及其测量		
10-1	概述	210
10-2	多路电话通信中的噪声	210
10-3	多路电话通信的加权和加重	223
10-4	多路电话通信中噪声的测试	230
10-5	电视信号传输中的噪声	241
10-6	电视信号中噪声的测试	242

结束语

参考资料

第一章 概 论

1-1 信号和噪声

在任何通信系统中，信息（电话、电报、电视等）的传输总是存在信号和噪声。信号是指在编码和调制（调幅、调频和调相等）过程中所形成的有用信息。通常可以将信号分为规则信号和真实信号。规则信号是时间的确定性函数，亦称为确定性信号，它们的参量如频率、脉宽、波形等都是预知的。标准信号发生器、脉冲发生器的输出电压便是规则信号。在真实的信息传输系统中并不存在规则信号，但它对说明各种无线电电路和系统的特性却十分有用。在无线电技术发展的初期，对于研究规则信号及其对各种电路的作用曾给予了极大的注意。

真实信号则带有信息，是时间的不规则的非确定性函数，亦即它的一些参量是以不规则的、随机的、不能预知的方式随时间变化。这些特性称为随机特性并用信息函数来描述其传输信息的能力。例如，在雷达中，由目标反射的信号幅度、频率和相位都在连续不断地变化，这些变化包含着为雷达站所要搜索和分析的有用信息。在电视中、行扫描方向上和每帧画面的亮度以极不规则的方式变化，正是这些变化决定了所传送的图象内容。由此可见，真实信号总是时间的非确定性函数。信号的波形或参量都是信息接收设备所要检测的。为此，必须对电视信号、雷达信号或其它信号的各种信息函数进行详细研究，掌握了它们的特性之后，便能设计出各种各样的新型无线电设

备。

无线电电子学领域中所说的噪声是指存在于器件、电路、设备或通信信道中的不带任何信息的不规则信号，通常称为电噪声。噪声一词是从声学中借用的术语。声学噪声是一种听不懂的嘈杂刺耳、引人不快的、不和谐的声音。由于电噪声在音频范围内可以通过电声器件转换为声学噪声，故也称它为噪声。但是，电噪声占有全部无线电频率范围，所以并非所有的电噪声都能转换为声学噪声。

通信工程中常将噪声分为内部噪声和外部噪声。内部噪声是设备内部各种器件、部件产生的热噪声、散粒噪声和闪烁噪声等；外部噪声则是星体和大气辐射的自然噪声（电磁辐射噪声）以及各种电器产生的人为噪声。热噪声是有耗元件如电阻器中电子不规则运动产生的电压起伏；散粒噪声是由器件中的电子发射的不规则离散性引起的电源起伏，而器件中局部位垒的起伏则产生闪烁噪声；电磁辐射噪声本质上也是热噪声。

一般地说，噪声是有害而为人们所不希望的。这是因为噪声的存在将干扰甚至淹没掉有用信号，限制接收设备检测微弱信号的能力及降低通信质量等。但是，另一方面，在某些专门研究噪声问题的场合，噪声却是工作的对象，是观察者所需要的。例如，在射电天文，正是利用射电星所辐射的微波噪声来进行各种研究的；在电子对抗中，噪声干扰是一种主要的手段；在通信工程中，伪随机编码（类噪声）是一种很有前途的信号形式；在雷达工程中，噪声雷达则是一种十分诱人的新体制。此外，利用噪声源作为一种广谱（宽频带）信号源，在测量技术中也是一大类值得注意的新颖方法。因此，研究抑制和降低噪声以及有效地利用噪声的方法是无线电技术中的一个十分重要的课题。

1-2 噪声研究的意义

从无线电电子学发展的初期开始,噪声问题就在研究之列。早在20年代,就有人用实验证明噪声是接收微弱信号的主要限制。但是,真正逐步重视对噪声的研究还是在40年代开发短波和微波之后,才有必要和可能对噪声作深入研究。噪声的研究和测量对于测量仪器、通信、雷达等各个领域都有直接的影响。

随着现代科学技术的发展,对测量仪器的灵敏度提出了越来越高的要求。但是,任何一种测量仪器,其灵敏度的提高并不是无限制的。灵敏度最终受到测量中存在的噪声的限制,而噪声主要来自信号源和检测系统。

如果我们用直流放大器去测量一个很小的恒定电压,便可发现,提高放大器的增益能够检测越来越小的电压。但是,随着放大器增益的提高,电表读数的不规则起伏也变得越来越明显。最后,当单次读数的量值与电表不规则起伏的量值可以比拟甚至更小时,便很难或者不能正确给出被测电压的大小。不过,若能事先进行一系列实验去确定电表的零点和起伏的大小,那么,仍然可以在一定的精确度范围内估算出电压的大小。

设没有信号时,电表的读数为 N_i ,这里, $i = 1, 2, \dots, n$, 为取样值的序号。输入给定的信号时,电表的读数变为 $S_j(v)$, 这里, $j = 1, 2, \dots, n$ 为另一列取样点的序号。对两次取样取平均得:

$$\langle N \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (1.1)$$

$$\langle S(v) \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i(v) \quad (1.2)$$

可以认为, 当 n 很大时, 平均值 $\langle N \rangle$ 和 $\langle S(v) \rangle$ 趋于某一确定的数值。由此可得输入电压的净作用为:

$$\langle V(v) \rangle = \langle S(v) \rangle - \langle N \rangle \quad (1.3)$$

根据实验数据, 可以估算单次读数偏离其平均值 $\langle S(v) \rangle$ 大于 $\langle \Delta S^2(v) \rangle^{\frac{1}{2}}$ 的概率, 这里, $\langle \Delta S(v) \rangle = \langle S(v) \rangle - S_i(v)$ 。物理学中指出, 起伏的大小对平均值的偏离遵从正态分布。实际上, 单次读数偏离平均值大于几倍 $\langle \Delta S^2(v) \rangle^{\frac{1}{2}}$ 的概率是很小的。因此, 通常取单次读数的偏差为 $(1 \sim 3) \langle \Delta S^2(v) \rangle^{\frac{1}{2}}$, 即单次读数 $S_i(v)$ 给出 $\langle S(v) \rangle \pm (1 \sim 3) \langle \Delta S^2(v) \rangle^{\frac{1}{2}}$ 。

用经过这样校准的仪器来测量电压 u 并求得单次读数 $S_i(v) = \langle S(v) \rangle$, 则可以认为

$$u = v + \delta v \quad (1.4)$$

其中

$$\frac{\delta v}{v} = \frac{\langle \Delta S^2(v) \rangle^{\frac{1}{2}}}{\langle S(v) \rangle - \langle N \rangle} \quad (1.5)$$

我们将比值 $\frac{\delta v}{v}$ 的倒数称为信噪比 S/N , 电表单次读数的相对精确度可用 $\frac{N}{S}$ 来表征。噪声研究的目的在于提供计算 1.5) 式的基础以及讨论信噪比对系统参量的依赖关系。这类研究是测量仪器研究中的一个主要内容。例如, 1912 年就有人分析了起伏对检流计的影响。近年来, 像超导量子干涉器件 (SQUID) 一类的超高灵敏度的测量仪器之所以受到很大的注意, 是因为在理论上和实验上都证明它具有极低的固有噪声。因此, 它所

能达到的测量精确度是以往常规测量仪器所不及的。可以断言,任何高灵敏度测量仪器的发展都必需对噪声问题进行深入的研究。

噪声研究在通信技术中的重要意义更是为大家所熟悉的。在通信技术发展的早期阶段,主要使用中、长波。在这个频率范围内,机外自然噪声很大,因此限制通信设备检测微弱信号能力的主要因素不是设备的内部噪声。随着短波通信的应用,又开辟了微波通信。这时,外部噪声急剧减小,机内噪声上升为限制通信设备检测微弱信号能力的主要因素。在这种情况下,如何进行可靠的通信便成为人们注意的重点。通信理论研究已经证明,对于具有一定平均发射功率的通信系统,在存在随机噪声的条件下,单位时间内可传输的最大信息量即传输容量 C 为:

$$C = B \ln \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right) \quad (1.6)$$

式中, P_S 为单位带宽的信号功率; P_N 为单位带宽的噪声功率; B 为通路带宽。

可见, P_N 越小, C 越大。

研究信号和噪声在通信系统中的行为,比较各种通信体制的抗干扰能力,研究强噪声背景下的微弱信号接收如累积、最佳滤波以及相关接收技术等已成为信息论中的一些重要方面。

实际通信线路中噪声的计算和测量,在通信工程的设计、调试和维护中都是必不可少的。天线参量和天线馈电系统的配置、发射机功率、增音站或中继站的设置等问题都必须考虑线路中各种噪声的来源和大小以及它的影响程度。

从雷达作用距离的公式中,也可以明显地看到噪声的影

响。

$$r_{\max} = a \sqrt[4]{\frac{P'_s}{F}} \quad (1.7)$$

式中, P'_s 为雷达发射机的发射功率; F 为雷达接收机的噪声系数; a 为比例系数, 它由发射天线的有效面积、接收天线的有效面积、目标的有效面积以及接收机的等效噪声带宽所决定。

上式表明, 噪声系数同发射机功率 P'_s 以及收、发天线的有效面积具有同等重要的地位。这就是说, 降低接收机的噪声相当于提高发射功率, 或者说在一定的发射功率下降低接收机的噪声便能增大雷达的有效作用距离。显然, 努力降低接收机的噪声是增大雷达作用距离的重要环节。在此过程中, 噪声测量是基本的测量之一。

在近代极低噪声接收系统中, 用于卫星通信的地面站接收设备和行星雷达是最突出的代表。在卫星通信中, 由于受到卫星上转发器功率的限制, 保证可靠通信的手段之一是降低地面站接收设备的噪声。为了保证在足够宽的频带内得到的话音或图象有足够大的信噪比, 国际无线电咨询委员会规定: 采用调频体制时, 接收机输入端的载波信噪比 $\frac{S_c}{N_c}$ 不能低于 8~10 分

贝。载波信噪比由地面站天线增益 G 和接收系统的总噪声温度 T_R 以及载波带宽 B_c 所决定, 即

$$\frac{S_c}{N_c} \propto \frac{G}{a_0 k T_R B_c} \quad (1.8)$$

式中, a_0 为自由空间的损耗; k 为玻尔兹曼常数。因此, 卫星通信地面站上行线路的一个重要参量规定为: 当天线仰角为 5° 时, G/T_R 值大于 40.7 分贝。为了实现这一指标, 标准地面站都建造大型抛物面天线和采用噪声温度低达 20K 的致冷参量放

大器作为前端。

行星雷达可以用于深空研究，例如，通过测量地球到金星的距离可推算出天文单位和提高天文常数的精确度。行星雷达的性能用质量因子给出：

$$M = \frac{P_s G A}{T'_R f^{\frac{1}{2}}} \quad (1.9)$$

式中， P_s 为发射机功率； G 为天线增益； A 为天线有效面积； T'_R 为系统的噪声温度； f 为频率。过去的十多年间，由于系统的噪声温度及其它因素的改进，使质量因子提高了3~4个数量级。目前，测量金星相对于地球位置已准确到10公里以下。

各种接收设备中噪声研究的目的，就是为了确定噪声对系统性能的影响，分析噪声的来源并寻求改善噪声性能的途径。

实现低噪声接收设备的前提是发展低噪声器件及电路，这是不言而喻的。最近十多年来，由于半导体技术的进展，涌现出许多新型低噪声器件，如肖特基二极管、变容二极管、隧道二极管、耿氏二极管、低噪声微波晶体管等，使混频器、前置放大器的噪声系数大大降低。新的微波电路结构又进一步改善了部件的噪声性能。以往，点接触二极管混频器的噪声系数大约在10分贝左右，近年来，采用肖特基表面势垒二极管以及镜像抑制和镜像回收电路，使混频器的噪声系数下降至4~5分贝。隧道二极管放大器及行波管放大器的噪声系数通常也可做到5~6分贝以下。目前，用变容二极管做成的致冷和常温参量放大器已在实践中获得广泛应用。使用小型致冷机致冷的参量放大器的噪声系数低至20K，同时也出现30~50K的常温参量放大器。常温参量放大器不需要复杂庞大的致冷系统，已成为参量放大器的一种很有前途的研究方向。近年来，双极晶体管和场效应晶体管的发展，特别是亚微米栅金属半导体场效应

晶体管 (MESFET) 的出现, 已研制出微波低噪声晶体管放大器, 其使用频率可达20千兆赫, 噪声系数可达1分贝左右。由于微波低噪声晶体管放大器不需要泵源、结构简单、使用方便, 故性能上超过了行波管放大器和隧道二极管放大器, 甚至成为常温参量放大器的主要竞争者。很显然, 噪声研究和测量在低噪声器件的发展中起着十分重要的作用。

由上述可见, 噪声研究和测量对于无线电工程中各种电子设备的整机、部件和器件的研制都极有意义。

1-3 噪声技术的研究对象 及本书的内容

目前, 噪声问题的研究已成为一个独立的技术分支, 研究的内容十分广泛, 涉及到许多不同的领域, 从而受到人们越来越大的重视。

归纳起来, 噪声技术所要研究的基本问题大致有以下几个方面:

1. 研究噪声的类型和来源;
2. 对放大接收设备的噪声性能进行定量描述和测量;
3. 对发射设备的噪声辐射进行分析和测量;
4. 深入研究噪声源的原理、构成、性能及其在通信、雷达、导航、电子对抗和其它微波设备上的应用;
5. 噪声计量标准的建立、传递和对比;
6. 噪声测试系统的原理和设计以及测试方法、数据处理和误差;
7. 噪声的产生、传输、传播和变换的原理、方法和设备;
8. 噪声的监测、抑制、控制和消除;

9.噪声与各种科学技术的联系和应用；

10.研究微波辐射的生物效应和环境效应；

本书旨在对噪声测量技术中的一些主要问题进行介绍。书中在叙述噪声的一般知识之后，着重介绍测量放大接收设备（四端网络）的噪声系数的各种方法、测量中常用的仪器、标准噪声源及辐射计。此外，还讨论了信号源和低噪声参量放大器噪声系数的测量方法及改善测量精确度的途径，最后，对微波通信系统中的噪声及其测量做了叙述。

第二章 噪声的幅度起伏和能谱

在通信和测量中，经常遇到的噪声是由大量短促脉冲叠加而成的随机噪声。这种噪声遵从概率分布的规律，并可用随机函数来描述。因此，噪声问题常用统计方法进行处理，而由单个或数量不多的脉冲叠加形成的噪声常称为干扰，它们不能用统计方法处理，一般都采用电路理论作瞬态分析。

因此，了解描述噪声的统计方法对于深入研究噪声具有重大意义，在这一章中，我们首先讨论描述噪声的统计方法的一些基本概念；然后，对表征噪声的幅度起伏和能谱特性的一些术语，如噪声功率谱、功率谱密度、窄带噪声和宽带噪声，高斯噪声和瑞利噪声作扼要介绍。

2-1 描述噪声常用的统计学概念

本节讨论描述噪声随机特性的随机函数、平稳噪声的遍历特性以及噪声的相关和互相关特性等。

如前所述，噪声是一个随机过程，因而可以用作为实际过程的数学表示的随机函数来描述。所谓随机函数，实质上是由一个或数个连续变化的自变量所决定的随机量。例如，对于调和函数 $U = A \sin \omega t$ ，假如在正弦函数集中出现每种可能幅度的概率已给定，则此调和函数将是随机函数。这里，规则（非

* 在下面的讨论中，我们用大写字母 U ， I 表示噪声函数，而用小写字母 u ， i 表示噪声函数的总体，即一组数据。