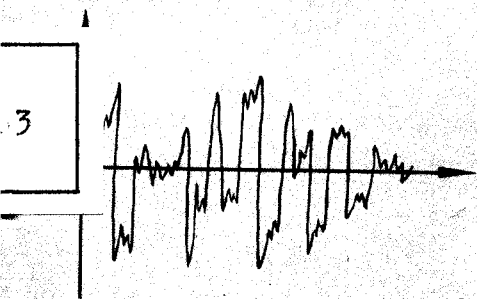


无线电计量测试丛书

7

高频、微波噪声 的计量测试

蔡新泉 关志仁 杨川涛 徐德忠 编著



中国计量出版社

内 容 提 要

本书是《无线电计量测试丛书》的第七分册,系统地阐述高频、微波噪声计量测试的有关问题。主要包括:噪声的来源与类型、噪声量值的描述和常用的术语,噪声发生器的工作原理,二端口线性网络噪声特性的表征和相应的测试设备、测试方法,辐射计技术和辐射计的定标方法,标准噪声源、噪声标准的建立和噪声发生器的校准,并对振荡源噪声特性的测试原理、测试方法进行了详细的论述。书中着重讨论了测量噪声系数的几种常用方法,即Y系数法、3dB法、自动法,并分析了它们的测量误差。

本书可供具有中等文化程度以上从事通信、雷达、电子对抗和射电天文等专业的工程技术人员和大专院校有关专业的师生参考。

无线电计量测试丛书 7 高频、微波噪声的计量测试

蔡新泉 关志仁 编著
杨川涛 徐德忠

责任编辑 刘宝兰

—*—

中国计量出版社出版

北京和平门内大街11区7号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—*—

开本 787×1092/32 印张 10.375 字数 229 千字

1988年5月第1版 1988年5月第1次印刷

印数1—7 000

ISBN 7-5026-0052-3/TB·47

定价 2.80 元



无线电计量测试丛书编委会

主 编： 汤世贤

副主编： 周清一 吴鸿逵 张世箕 席德熊

编 委： （以姓氏笔划为序）

王义举 王立吉 戈锦初 古乐天

汤世贤 刘全宝 李世雄 吴鸿逵

张世箕 张 伦 陈成仁 周清一

郭允晟 夏虎林 倪伟清 诸维明

席德熊 黄志洵

本分册责任编委： 王义举 张伦

前 言

《无线电计量测试丛书》是根据中国计量出版社关于按学科分类组编计量测试丛书的总体设想和统一安排，在中国计量测试学会的高度重视和实际支持下，由本编委会邀请作者组织编写和审订的。其目的是比较系统地传播无线电计量测试科学技术知识，促进电子学与无线电技术的发展，以适应科技进步和社会主义现代化建设的需要。

本丛书主要论述高频和微波电磁量的计量测试问题，一般不包括直流和低频的内容。丛书第一分册为“概论”，其余各分册分别阐述各主要参量及数据域的测试。“丛书”各分册既保持了相互联系，又是一本专题论著，具有独立性，因此将按成书的先后陆续出版。

本丛书的主要读者对象，是具有中等以上文化程度的无线电计量测试工作者、有关专业的科学技术人员、大专院校师生、计量管理干部，也可作为计量人员的培训用书。

无线电计量测试丛书编委会

序

在雷达、通信、电视和测量等无线电系统中，接收机或放大器的输出端，除信号外，还不可避免地存在噪声。噪声分为外部噪声和内部噪声两类。前者来源于无线电设备外部，如雷电噪声、宇宙噪声和工业噪声等；后者来源于设备的内部，如收音机或扩音器中听到的“沙沙声”、电视图像背景上看到的“雪花”、雷达显示器荧光屏上出现的杂乱无章的“茅草”。这些“沙沙声”、“雪花”和“茅草”等就是接收放大系统内部产生的噪声。

一般说来，噪声是有害的、是人们所不希望的，因为它干扰甚至淹没有用信号。在信号十分微弱的情况下，噪声的有害作用极为明显。例如，在卫星通信或雷达系统中，从遥远的人造卫星发回的信号或由远处目标反射回来的雷达信号一般都十分微弱。这时接收机的内部噪声可能比信号大得多，严重地影响通信质量，甚至使通信中断或者根本无法辨认目标的反射信号。为了减小和衡量噪声对无线电通信的影响，以适应通信技术发展的需要，长期以来，人们对噪声所涉及的问题进行了广泛的研究，使噪声的计量、测试技术得到迅速发展。

30年代，无线电通信大多数使用中波波段。那时，限制接收系统可靠地检测微弱信号的主要因素是外部噪声——人为或自然界噪声。当时，人们对于如何正确规定接收机的灵敏度是十分模糊的，如1933年无线电工程师协会（IRE）所规定的接收机灵敏度就是一个典型的例子。它定义接收机

的灵敏度为能够传输一定的音频功率到特定负载上所需的信号强度，这个定义本质上是一个简单的增益定义。

40年代，短波通信得到了发展和应用。由于外部噪声在短波波段的影响急剧下降，内部噪声成了限制接收机检测微弱信号能力的主要因素。IRE所规定的灵敏度定义已不再适用，从而需要找到一个衡量和描述接收机质量的客观尺度。1942年D.O.North提出了“噪声系数”的概念，接着H.T.Friis提出了“噪声系数”的定义，初步奠定了噪声计量、测试的理论基础。

二次大战期间，微波通信迅速兴起和发展。为了提高通信质量，人们致力于降低微波接收机的内部噪声，因此开始对微波接收机的噪声特性进行测试。测试方法是采用标准信号发生器的二倍功率法。然而，战时首先考虑装备能尽快地设计、制造和投入使用，因此对噪声系数的测试精度要求不高。战后，通信技术的发展要求对接收系统的噪声特性作精确的测试，尤其要求在更小的噪声量级上比较接收系统的优劣。为适应噪声特性测试的需要，IRE相继于1952、1957、1963年对有关的术语和定义作了统一的规定，从而接收系统噪声特性的计量、测试理论日臻完善。

1949年W.W.Mumford发明了气体放电管噪声发生器。它的出现使噪声特性的测试精度与用标准信号发生器相比有了极大提高。不过，这要求噪声发生器有确定的输出功率。当时，在没有绝对噪声标准的情况下，人们用下述两种方法来确定噪声输出功率的大小：(1)一台噪声发生器被单独保存并给定一个值，然后用它确定另一些同类噪声发生器的输出功率；(2)根据工作条件和已知参数通过计算确定每台噪声发生器相应的输出功率。采用这两种方法能使气体放电管噪声发生器的输出功率量值实现相对的统一，对噪声特性的测试

起了一定的推动作用。

随着对气体放电管噪声发生器和饱和二极管噪声发生器的深入研究,发现这些发生器的理论值与实验结果不尽一致。这就意味着计算中还有某些因素尚未考虑。这种输出不能精确加以计算的噪声发生器无法作为噪声量值的标准,而必须建立服从普朗克辐射定律的噪声量值绝对标准,以校准上述噪声发生器。为此,从50年代中期起,美国、苏联、英国、日本等国的计量机构相继开展研究并建立高温热噪声标准和量值传递系统,从而使高频、微波噪声计量测试进入了一个新的发展阶段。

为了进一步提高通信系统的质量,在现代接收系统中采用了各种类型的低噪声放大器件,大大降低了接收系统的内部噪声。在这种情况下,尽管噪声系数的定义仍可应用于低噪声系统,但用所谓“等效输入噪声温度”来描述接收系统的噪声特性要比用噪声系数更方便。同时,噪声系数定义中所规定的输入端源阻抗处于标准噪声温度的条件在实际中并不能满足。当接收系统的天线为水平指向或地面指向时,输入端的源阻抗温度视为接近于290 K。但是,在1960年采用卫星通信后,天线处于高仰角条件下,输入端源阻抗噪声温度可低至10~50 K,因此用噪声系数描述接收系统的噪声特性已不太合适。于是,为了描述和定义接收系统内部噪声特性和工作噪声特性,一开始采用“等效输入噪声温度”,随后又用“工作噪声温度”的概念来代替噪声系数。另外,用气体放电噪声发生器测试低噪声接收系统的噪声特性已难于保证测试结果的精确度。这种情况促使人们进一步研制低温噪声发生器以及相应的低温噪声标准和量值传递系统,以适应通信技术日益发展的需要。

我国从60年代初期即开展了噪声计量的研究工作。目

前已在一些主要的高频、微波频段上建成了高温噪声标准和低温噪声标准以及相应的量值传递系统（详见附录 I）。开展了对各种噪声发生器，如气体放电管噪声发生器、饱和二极管噪声发生器、固体噪声发生器和低温噪声发生器的量值传递工作。同时，还对接收放大系统和振荡器的噪声特性的精密测试进行了深入研究并达到相当高的水平。

本书编写的作者有：蔡新泉（第一篇的第一、二章、第九章的第四节和附录 I），关志仁（第二篇的第三、四、五章、第三篇的第六章、第七章的第一节和附录 II），杨川涛（第三篇第七章的第二、三节和第四篇的第八、九章；徐德忠（第五篇的第十、十一章）。全书由蔡新泉统稿。

限于作者的水平和经验，疏漏错误之处在所难免，执笔者分负其责，并诚恳地希望读者批评指正。

目 录

序

第一篇 高频、微波噪声

第一章 噪声	(1)
第一节 噪声的来源与类型	(1)
一、自然界噪声	(2)
二、人为噪声	(3)
三、电路噪声	(3)
第二节 噪声量值	(6)
一、热噪声电压均方值	(6)
二、散弹噪声电流均方值	(9)
第三节 尼奎斯特定理的普遍公式	(11)
一、资用热噪声功率是温度 T 的普适函数	(11)
二、尼奎斯特定理的完全式	(13)
第四节 谱密度	(15)
一、白噪声	(15)
二、 $1/f$ 噪声	(16)
三、功率谱密度	(16)
四、噪声通过线性电路时功率谱密度的变化	(17)
五、 LC 谐振电路的噪声谱密度	(19)
第五节 噪声特性的统计描述	(19)
一、概率函数	(19)
二、正态分布	(21)
第二章 线性网络噪声特性的表征	(22)

第一节 单端口网络的噪声特性的表征	(22)
一、资用噪声功率	(23)
二、资用噪声功率谱密度	(23)
三、噪声温度	(24)
四、标准噪声温度 T_0	(28)
五、等效输出噪声温度	(29)
六、超噪比 (ENR)	(29)
第二节 二端口网络的噪声特性的表征	(30)
一、噪声系数	(30)
二、等效输入噪声温度	(44)
三、工作噪声温度	(48)

第二篇 噪 声 发 生 器

第三章 热噪声发生器	(55)
第一节 工作原理	(55)
第二节 噪声发生器的结构	(56)
一、低温噪声发生器	(56)
二、室温噪声发生器	(57)
三、高温噪声发生器	(57)
四、等效输出噪声温度的确定	(58)
第四章 散弹噪声发生器	(59)
第一节 饱和二极管噪声发生器	(59)
一、饱和二极管	(59)
二、饱和二极管噪声发生器的结构和工作特性	(61)
三、ENR的误差来源	(65)
第二节 固体噪声发生器	(66)
一、固体噪声二极管	(66)
二、固体噪声发生器的结构和工作特性	(69)
三、ENR的误差来源	(73)

第五章 等离子体噪声发生器	(74)
第一节 工作原理	(74)
一、气体放电噪声管	(74)
二、等效输出噪声温度的确定	(76)
第二节 噪声发生器的结构与工作特性	(81)
一、波导型	(81)
二、同轴型	(82)
三、ENR的误差来源	(85)

第三篇 接收、放大设备噪声特性的测试

第六章 测试原理及方法	(88)
第一节 Y 系数法	(88)
一、Y 系数	(88)
二、任意倍功率法	(88)
三、等功率法	(92)
四、误差分析	(95)
第二节 3dB 法	(114)
一、可变源法	(114)
二、固定源法	(116)
三、误差分析	(118)
第三节 自动法	(119)
一、工作原理与测试方法	(119)
二、指示器表头刻度的校准	(124)
三、误差分析	(126)
四、扫频测试	(129)
第四节 测试仪器的选择	(130)
一、噪声发生器	(130)
二、衰减器	(133)
三、指示器	(134)

四、放大器	(136)
五、滤波器	(136)
第五节 测试实例	(137)
第六节 微处理器控制的自动噪声系数指示器	(142)
第七节 晶体管噪声参量的测试	(147)
一、测量方法 (一)	(147)
二、测量方法 (二)	(148)
第七章 接收系统噪声特性的测试	(153)
第一节 工作噪声温度的测试	(153)
一、手动法	(153)
二、自动法	(155)
第二节 辐射计的定标	(156)
一、定标方法	(156)
二、定标方程及误差分析	(161)
三、灵敏度和线性度的校准	(171)
第三节 G/T 值的测量	(177)
一、 G/T 值的含义	(177)
二、 G/T 值的测量	(180)

第四篇 噪 声 计 量

第八章 热噪声标准量值	(187)
第一节 标准噪声源	(187)
一、基本原理	(187)
二、标准噪声源应具备的条件	(188)
三、负载特性	(189)
四、传输线的选用	(190)
第二节 等效输出噪声温度	(191)
一、概述	(191)
二、噪声源的输出方程	(192)

第三节 误差分析	(198)
一、近似误差	(199)
二、温度及损耗误差	(199)
三、失配误差	(200)
第四节 温度及损耗的确定	(200)
一、测量负载温度	(200)
二、测量传输线温度分布	(202)
三、小衰减量的理论计算	(202)
四、小衰减量的测定	(204)
第五节 实例	(204)
一、同轴型热噪声标准	(204)
二、液氮致冷标准噪声源	(206)
第九章 噪声发生器的校准	(209)
第一节 校准装置——辐射计	(210)
一、全功率辐射计	(211)
二、Dicke 型辐射计	(212)
三、零平衡开关辐射计	(214)
四、和、差相关辐射计	(216)
第二节 高频读数法 (一)	(217)
一、电路特点及工作原理	(217)
二、校准方程	(219)
三、误差分析	(223)
第三节 高频读数法 (二)	(226)
一、电路结构及校准原理	(226)
二、校准方程	(228)
三、误差分析	(233)
第四节 中频读数法	(235)
一、基本原理	(235)
二、校准方程	(237)
三、误差分析	(239)

第五篇 振荡源噪声特性测试

第十章 振荡源调幅噪声测试	(244)
第一节 测试原理	(244)
一、调幅原理	(244)
二、噪声调幅原理	(248)
三、小调制原理	(250)
四、测试原理	(255)
第二节 测试实例	(257)
一、测试系统	(257)
二、操作步骤	(259)
三、测试结果	(260)
第十一章 振荡源调频噪声测试	(261)
第一节 调频噪声和调相噪声	(261)
一、调频和调相原理	(261)
二、调频噪声和调相噪声的谱密度	(263)
三、测试原理	(269)
第二节 单信号源法	(272)
一、测试原理和系统	(272)
二、测试步骤	(279)
三、测试实例	(280)
第三节 双信号源法	(285)
一、测试原理	(285)
二、测试实例	(289)
第四节 其他测试法	(291)
一、时域法	(291)
二、频谱仪法	(296)
三、自动化法	(299)

附录 I	我国热噪声标准一览表·····	(303)
附录 II	源阻抗误差公式推导·····	(305)
	参考文献·····	(311)

第一篇 高频、微波噪声

本篇论述高频、微波噪声计量测试的基本理论。首先讨论噪声的来源、类型、特性及其统计描述方法。由于噪声是一种无规电信号，故可用统计方法描述。而噪声的大小则用电流均方值、电压均方值或功率来表示，并给出了相应的关系式。其次，再讨论线性网络噪声特性的表征方法。对于单端口网络噪声特性的表征，主要是介绍噪声计量中常用的一些名词术语的含义；对于线性二端口网络（接收放大系统）噪声特性的表征，主要是介绍噪声系数、等效输入噪声温度、工作噪声温度等参量的定义、意义以及它们之间的相互关系，并引入相应的表达式。

第一章 噪 声

第一节 噪声的来源与类型

噪声是一种自然现象，是物质的一种运动形式。广义上，噪声就是扰乱或干扰有用信号的不期望的扰动。它使通过网络传输的信号受到干扰或使之失真。研究表明，常见的噪声是由大量短促脉冲叠加而成的随机过程，它符合概率论的规律，可以用统计方法进行处理。

如前言中所述，通信技术中常把噪声分为内部噪声和外部噪声。内部噪声是指设备内部各种器件、部件产生的热噪声、散弹噪声等，也称电路噪声；外部噪声则指宇宙和大气

辐射的自然界噪声以及各种电器产生的人为噪声。图 1-1 示出了噪声体系图。

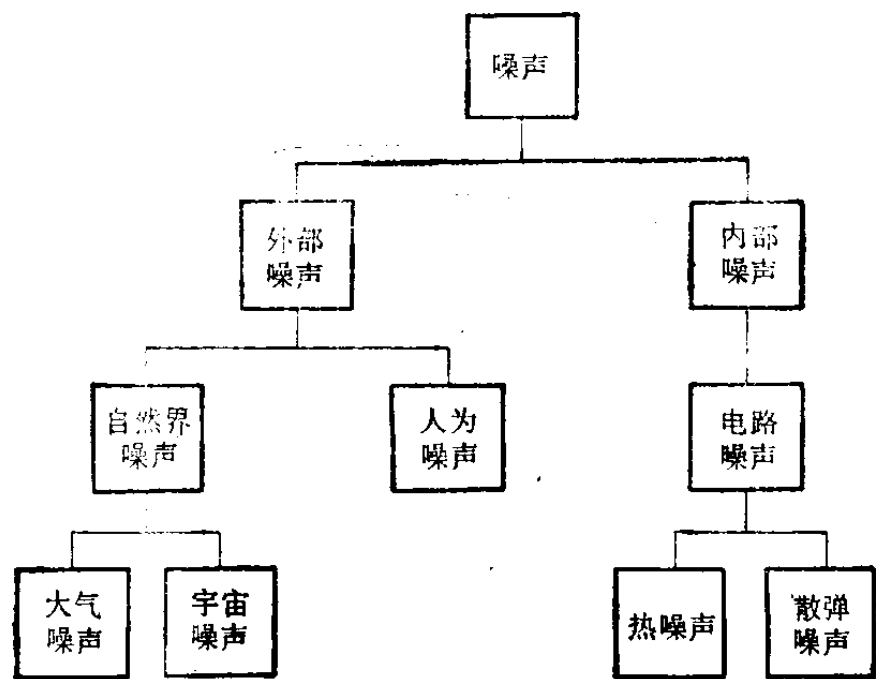


图 1-1 噪声体系图

一、自然界噪声

(一) 大气噪声

大气噪声又称天电噪声。大家知道，当雷雨天带电云层之间的电位差足够高时，便出现称之为“闪电”的放电现象。这种放电现象也可发生在云层和大地之间。业已发现，地球相对于电离层的电位为负 300 000 V。这是因为宇宙射线总是在给大气层充电，结果电子不断从地面陡直拉出升至天空。通常，云层底部带负电，云层下方的大地带正电。由于云层和地面之间的空气是电的不良导体，故地和云层间必然存在一极大的电压，导致了放电的产生。由于闪电时空气气压的剧烈变化，便产生了所谓声学噪声，即常说的“打雷”。而称之为“闪电”的巨大火花则产生电噪声。闪电引