

通信系统
噪声性能因素

通信系统噪声性能因素

W. W. 芒 福 德 著
E. H. 夏 贝

“空间电子技术”编辑组 译

一九七五年十月

内 容 提 要

本书从实际应用观点论述了通信系统的噪声性能。首先叙述了噪声在通信系统中的重要性、噪声的起源及其定量分析。然后提出噪声温度和噪声指数在通信系统中的应用，并详细地讨论了目前资料中广为流行的有关噪声指数的各种定义。最后介绍了测量噪声指数的各种方法和它们在系统中的应用。并指出了噪声指数和有效输入噪声温度概念的某些局限性。本书叙述简明扼要，通俗易懂。可供从事无线电通信和雷达等工作的技术人员以及大专学校中有关专业的师生阅读和参考。

通信系统噪声性能因素

“空间电子技术”编辑组译

河南省驻马店印刷厂印装

内部发行

目 录

第一章	噪声在系统中的重要性	(1)
第二章	噪声的起源	(4)
	热噪声或约翰逊噪声	(4)
	电子管噪声	(5)
	外噪声	(7)
第三章	噪声的定量分析	(9)
	可用功率	(9)
	可用功率增益	(10)
	噪声带宽	(15)
	噪声温度	(17)
	串联电阻的噪声温度	(17)
	级联衰减器的噪声温度	(21)
	放大器噪声	(23)
	有效输入噪声温度 T_e	(23)
	级联放大器(单响应)	(25)
	匹配衰减器的有效输入噪声温度	(26)
	与放大器级联的匹配衰减器	(26)
第四章	利用噪声发生器测量有效输入噪声温度	(29)
	噪声源	(30)

	测量 T_e 的程序	(35)
第五章	系统应用	(37)
	工作噪声温度	(38)
	损耗对 T_{D} 的影响	(42)
	实际可达值	(42)
第六章	噪声指数(噪声系数)	(47)
	无线电工程师学会的噪声指数 (噪声因数)	
	定义	(48)
	弗里斯的噪声指数定义	(50)
	多个响应接收机	(51)
	级联放大器	(53)
	匹配衰减器的噪声指数	(56)
	与放大器级联的匹配衰减器	(57)
	当输入端温度不是 290°K 时的输出噪声	(58)
	F 和 T_e 的关系	(58)
	噪声指数的其他定义	(60)
第七章	噪声指数的测量	(66)
	噪声发生器法	(66)
	单响应接收机	(66)
	多个响应接收机	(68)
	小信号法	(69)
	变换损耗法	(72)
	结论	(75)
第八章	工作噪声指数 F_{CD}	(79)

第九章 F和 T_e 的局限性.....	(81)
单响应放大器.....	(81)
多个响应放大器.....	(81)
非线性系统.....	(81)
失配的影响.....	(82)
点噪声指数和点有效输入噪声温度.....	(83)

附 录

I、方程(81)使用的 $10 \log(Y-1)$	(84)
I、测量接收机噪声指数用的最佳“Y”因子.....	(89)
资料目录	(92)

第 一 章

噪声在系统中的重要性

在任何通信系统中，放大器的输出噪声是一个干扰因素，并确定最小可检测信号的极限；一个信道的信息处理能力取决于输出信噪比。香农〔1〕已证明一个理想系统的容量与 $(S + N)/N$ 的对数直接成正比，其中 S 是信号平均功率，而 N 是均方根噪声功率。新通信系统的设计工作者必须确信他的系统的输出信噪比足以满足所要求的信道容量的指标，而且他必须不仅能相对信号也还能相对噪声来鉴定其系统性能。

因此，对用于某特定系统中的接收机的噪声性能的任何有意义的鉴定，都必须考虑到处于工作情况下的下述各点：对输出噪声有影响的噪声源、在其全部响应范围内接收系统的带宽和增益、信号的性质、以及输出使用电路的效率。显然，没有任何一个人能完整地叙述某给定的接收机用于各种系统中时的性能情况。

那么，我们怎样来表征一个接收机的噪声性能呢？其确切的特征是什么以及如何测量和引用这些特征？

从接收机设计工作者的观点看来，这特征必须是很容易测量的。从买卖接收机者的观点看来，所引用的数值应能代表接收机在系统中处在极限能力情况时的最好的可能性能，

而该系统是设计得与其极限能力相匹配的。从系统工程师的观点看来，所引用的数值一定要能使他可以计算其系统在工作条件下的输出信噪比。这正是他感兴趣的。他的责任是使接收机的带宽和他的信号带宽相匹配，并且弄清楚当他无法使它们相匹配时所付出的代价是什么。一般说，这并没有任何困难，因为他总是可以在他的系统中引进适当的匹配滤波器，这些匹配滤波器有助于使输出信噪比为最佳。

系统设计工作者还有责任在接收机的输出端采用最好的可能的使用电路。使用电路的性质取决于他的信号的性质，视其信号是调幅、调频、单边带、双边带信号还是天空噪声（在射电天文情况）而定。这些事情是系统设计工作者所确认的。它们的确是十分重要，而且必须仔细考虑的。

我们假定系统设计工作者负责使噪声带宽和他的信号带宽相匹配，并且对他的信号采用最有效的检测。为予测其接收系统的噪声性能，他还必须知道些什么？他必须知道该接收机的增益—频率特性。它只有单个响应还是有多个响应？他必须知道打算使用该接收机的环境。那里有多大的输入噪声？他必须知道接收机本身产生的噪声有多少*。

在后面的讨论中，我们将看到，噪声功率可以用绝对温度来计算。因而总的输出噪声功率可以和某工作温度， T_{D} ，联系起来。由接收机以外部分所产生的那部分输出噪声功率可用一个温度来表征，而由接收机内部本身所产生的那部分输出噪声功率可用另一个温度， T_e ，来表征。 T_e 称为有效输入噪声温度。

* 从第二段到第六段几乎是逐字逐句转引自“The Digest of The 1961 PG—MTT National Symposium”的第53页。

还可用一些其他方法来表征一个接收机的噪声性能，如噪声指数或噪声系数这有争议的概念，它有很多个不同的定义。下面的讨论将描述在这些噪声指数和接收机的有效输入噪声温度间存在的关系。

在略述了噪声的一般性质和它的起源之后，将讨论测量方法和在整个系统性能方面的应用。

注 释

[1] C.E.Shannon, “通讯的数学理论, 第一部分”

B.S.T.J., Vol.27, No.3, p.379—423, 1948

“通讯的数学理论, 结论” *ibid*,

Vol.27, No.4, p.623—657, 1948.

第 二 章

噪 声 的 起 源

在一个导体，一个半导体或一个真空管内，电流被认为是一种电子流或电子移动。因而，电流是由脉冲组成的，这些脉冲间隔很小，但不一定是等间隔。当电流很小时，构成电流的电子数目未大到足以把它们看成是一个恒定的或连续的流动。电流的这个电子性质确定了在放大器中可以获取有用放大量的上限。

因为在一个导体中，由于热骚动总会有自由电子的随机运动和移动，所以总是有一个小的随机电流或噪声。若一个导体内信号电流小于或等于由热骚动所引起的随机噪声电流，则信号被噪声所掩盖，而且任何量的放大都不能将它们分开。此外，放大器的电子管或晶体管所产生的噪声电流将叠加到已存在的噪声电流上，而在放大器输出端的信噪比将比输入端的信噪比更低。

本节中，我们将讨论接收机中可能引起噪声的几种噪声源。

热噪声或约翰逊噪声

导体中由热骚动引起自由电子随机运动使在导体的开口端产生一个电压。在大多数导体中，该噪声电压的频率分量

均匀地复盖整个射频频谱。因为白色包含了可见光谱的所有颜色，所以热噪声有时称为白噪声。

导体的开口端上的噪声电压的值是用随机变化的噪声电压的均方值来表示，因为它在时间上是随机变化的，并且有随机峰值〔2〕。于是

$$e_n^2 = 4kT \int_{f_1}^{f_2} R(f)P(f)df \quad (1)$$

$$P(f) = \frac{hf}{kT} \left(e^{\frac{hf}{kT}} - 1 \right)^{-1} \cong 1$$

e_n^2 = 随机变化的噪声电压的均方值

K = 玻尔茨曼常数 = 1.38×10^{-23} 焦耳/°K

T = 绝对温度 = $273.16^\circ K + (\text{零度以上})^\circ C$

R = 导体的电阻，单位为欧姆

f = 频率，单位为周/秒

h = 普朗克常数 = $6.62 \times (10)^{-34}$ 焦耳·秒

实际上，在所有的涉及噪声电压的情况下，如在线性放大器或测量器件中，器件的带宽限制了噪声电压的大小。于是方程(1)写成

$$e_n^2 = 4kTR(f_2 - f_1) = 4kTRB \quad (2)$$

其中 $B = (f_2 - f_1)$ ，是用周/秒表示的噪声带宽。当讨论放大器性能时，将会更详细地论述噪声带宽。

电子管噪声

由于电子管的工作依赖于离散粒子的运动而不是依赖于

流体的连续流动，因而真空管相当于噪声源。为了方便起见，这噪声值有时用处于 290°K 温度的一个等效输入电阻 R_{eq} 来表示。 R_{eq} 是这样的一个电阻（在 290°K ），当将它插入给定的电子管的栅极电路中时，它能在输出电路中产生和电子管本身所产生同样大小的噪声能量〔3〕。

在真空管内有几个噪声源。这些噪声源分类如下

1、散粒效应噪声发生在真空管中，它是由于这样器件中电流的电子性质所造成的。因阴极的发射是以电子形式，而电子随机地离开阴极，所以产生一个噪声电流，从而产生一个噪声电压。工作于温度限制范围内的二极管和负栅极三极管内所产生的噪声电流由下式给定

$$i_n^2 = 2eIB \quad (3)$$

其中 i_n^2 = 随机变化的噪声电流（板流的交流分量，单位为安培）的均方值。

e = 电子电荷； 1.6×10^{-19} 库伦。

I = 板流的直流分量或均值，单位为安培。

B = 噪声带宽（通常指外电路），单位为周/秒。

若电流完全受阴极温度所限制，则方程(3)适用。若空间电荷限制电流，则噪声降低了。

2、截取噪声或分配噪声发生在多电极电子管中，它是由于在任意两个电极之间，例如四极管或五极管中的板极和帘栅极之间，随机地分配噪声电流所造成的。它表现为板极电路中散粒效应噪声电流有明显的增大。

3、感应栅极噪声是因为阴极发射的电子的随机速度在电子管的栅极上感应出不均匀的电流所造成的。在某种意义上说，它的作用是在栅极上加一个噪声信号。

4、如晶体二极管，晶体管和敷氧化物阴极这样的半导体器件，随机地从某些部分上释放大量电子，而所形成的噪声称为阴极闪烁效应。所产生的噪声电压随发射电流的平方而增长，并与频率成反比。阴极闪烁效应在每秒几千周时可以忽略不计，只有在音频时阴极闪烁效应才是重要的。

5、若电子管中有气体，就会有电离碰撞，而离子电流将流向阴极和栅极。这就导致随机噪声电流。在良好的现代的电子管中，正离子噪声可以忽略不计。

6、若允许发生二次电子发射，在电子管的各种电极之间将有电子流。这电子流会导致称为二次电子发射噪声的噪声电压。

外噪声

在实际通信系统中，接收机或放大器外部的噪声或天电干扰很重要。这种噪声可以分成两类：

1、天空噪声是由电暴、磁暴、星噪声、宇宙噪声和大气吸收所造成的。

2、由于如点火系统、高频电热、电弧、火花和电晕放电这类因素而造成的进入接收机的噪声电压称为人为干扰

大体上，无线电接收机的外噪声随频率增高而减弱，直到约4千兆赫^{*}，所以当使用高载频时系统极限是由接收机或放大器内所产生的噪声所确定。

^{*}原文为4千赫，疑有误——译者注

注 释

- [2] J.B.Johnson, “在导体中电的热扰动” *Phys. Rev.*, Vol.32, July, p.97—109, 1928
H.Nyquist, “导体中电荷的热扰动” *ibid*, Vol.32, July, p.110—113, 1928
- [3] E.W.Herold, “特高频接收机的信噪比分析”, *RCA Rev.*, Vol.6, No.3, p.302—331, 1942,

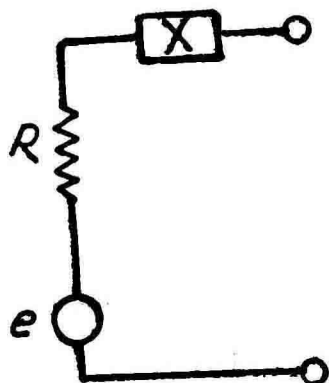
第三章

噪声的定量分析

在噪声定量的研究中，彻底弄清某些概念是重要的。在噪声问题讨论中，有时所以会发生困难，常是由于不熟悉术语的基本定义。下面将给出在噪声研究中的某些最重要的概念和术语的定义。

可用功率*

由一个具有均方根值开路端电压 e 和内阻 R 的发生器给出的可用功率（有时称最佳功率）为 $e^2/4R$ 〔4〕。这是一个电源可能给予它的共轭阻抗的功率。它是一个端对能传递给负载的最大功率。



$$P_{av} = e^2/4R$$

$$P_{av} = \text{可用功率}$$

e = 发生器的均方根值开路电压。

R = 发生器内阻。

X = 发生器内抗。

图 1 信号发生器的原理图

* 也有译为额定功率的。——译者注

从发生器来的可用功率只是该发生器的一个特性，而和所接的负载无关。

一个电阻 R ，在绝对温度 T 时，由于电阻内的电子热骚动，在它的开路两端上具有热噪声电压。假设电阻用戴维南等效发生器表示，它的电压是噪声电压 e_n ，它的内阻 R 是无噪声的，因而电阻产生的可用噪声功率为：

$$P_{nav} = \frac{e_n^2}{4R} = \frac{4kTB R}{4R} = kTB \quad (4)$$

其中：

B = 测量 e_n 时的频带宽度。

式中内阻是无噪声电阻，因为噪声电压 e_n 已由发生器考虑了。方程(4)表明由一个电阻产生的可用噪声功率与产生这个噪声的电阻阻值无关。

可用功率增益

假设一个理想的信号发生器，它具有开路有效信号电压 e_g 和内阻 R ，输给一个具有有效开路输出信号电压 E_o 和输出电阻 R_o 的理想网络。

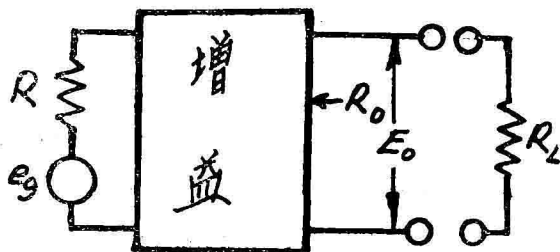


图2 接至信号发生器的二端对变换器

这个二端对线性变换器的可用功率增益为

$$\text{可用功率增益} = G = \frac{\text{从输出端对来的可用信号功率}}{\text{从输入源来的可用信号功率}}$$

从网络来的可用信号输出功率为

$$P_o = \frac{E_o^2}{4R_o} \quad (5)$$

它与负载电阻 R_L 无关，但与发生器阻抗有关，该阻抗与网络输入阻抗有关。上述情况中，从输入源来的可用信号功率为：

$$P_s = \frac{e_g^2}{4R}$$

$$\therefore \text{可用功率增益 } G = \frac{E_o^2 R}{e_g^2 R_o} \quad (6)$$

因此，网络的可用功率增益并不是网络所独有的特性，它还依赖于信号源和网络间阻抗匹配的情况。这与网络的开路电压增益 A 仅由网络特性而定的情况不同。

下面用一个纯电阻网络的简单例子来说明 G 的定义。

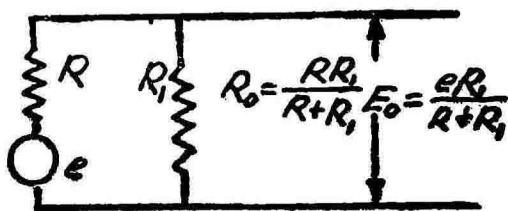


图 3 简单的纯电阻网络