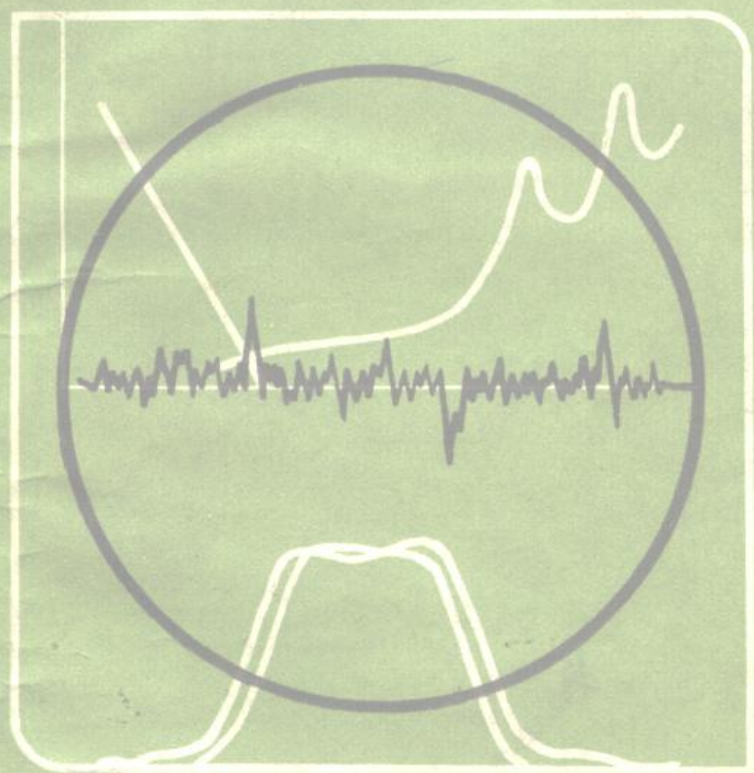


无线电技术与通信专题介绍丛书

〔英〕F. R. 康纳 著



噪声

23

科学出版社

73. 4123
556

噪 声

〔英〕F. R. 康纳 著

禾 民 译
孙 太 高 校

科 学 出 版 社

1 9 8 2

1110270

71120/18

内 容 简 介

本书是 F. R. 康纳撰写的“无线电技术与通信专题介绍”丛书之六, 是专门介绍电噪声的专业性普及读物。书中扼要介绍了电噪声的基本概念、各种类型、以及随机变量的一些数学概念。还讨论了电路噪声、噪声系数、噪声温度和一些重要的通信系统。为了帮助读者理解概念, 列举了不少例题并给出了一定数量的习题, 这些题目大都是从英国的有关考卷中选取的。

本书内容浅显、概念清楚、通俗易懂, 适合于自学无线电技术和无线电通信等课程的读者阅读, 亦可作为无线电类大、中专学生和工程技术人员的学习参考书。

F. R. Connor

NOISE

Edward Arnold, 1973

[英] F. R. 康纳 著

责任编辑 魏玲 李立

北京人民广播电台

北京人民广播电台

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1982年10月第一版 开本: 787×1092 1/32

1982年10月第一次印刷 印张: 4

印数: 0001—18,300 字数: 89,000

统一书号: 15031·436

本社书号: 2752·15—7

定价: 0.52 元

前 言

本书是介绍“噪声”这一重要课题的专著。电噪声在通信系统中是相当重要的。本书力图简洁而有条理地介绍有关电噪声的基本概念。为了帮助读者掌握这些基本概念，书中提供了许多从过去的试卷中选取的成功的例题，来清楚地说明有关基础理论的应用。

本书首先评介了可能在通信系统中出现的各种电噪声，接着介绍了关于随机变量的某些数学概念。以后几章讨论了电路噪声、噪声系数和噪声温度。最后一章对比研究了一些重要的通信系统。

本书对于下列学生十分有用：他们或者准备通过伦敦大学的考试，或者准备考取全国学术评选委员会颁发的学位，或者准备通过工程学会委员会的考试，或者准备取得其他证书，诸如全国通用的高级执照，全国有效的高级学位证书以及伦敦协会金融中心当局和商会的考试合格证书。本书也适用于工业界那些需要一本基础知识常用书以帮助其实际工作的工程师。

F. R. 康纳

本丛书的另几册是：

1. 信号
2. 网络
3. 波的传输
4. 天线
5. 调制

本书使用的符号

λ	波长	v_t	热噪声电压
ν	事件频率	B	带宽
ρ	相关系数	C_i	输入载波功率的峰值
σ	标准偏差	F	噪声系数
τ	时间间隔	$\mathcal{F}(\omega)$	傅里叶变换
i_s	短路噪声电流	G	功率增益
k	$\left\{ \begin{array}{l} \text{玻耳兹曼常数} \\ \text{任意常数} \end{array} \right.$	$G(\omega)$	功率谱密度
m	$\left\{ \begin{array}{l} \text{调制系数(调制深度)} \\ \text{任意数} \end{array} \right.$	N	噪声功率
$m(f)$	调制信号	S	信号功率
p_0	噪声功率谱密度 (只对正频率而言)	T	绝对温度
q	量化电平数		周期时间
		T_a	天线噪声温度
		T_e	等效噪声温度

本书使用的缩写词

C. E. I. Part 2	工程学会委员会通信工程考试的第二部分
C. & G.	伦敦协会金融中心当局和商会
L. U. B. Sc (Eng.) Tels. Pt.3	伦敦大学(工程)学士电信考试第三部分

目 录

第一章 绪论.....	1
1-1 噪声的性质	1
1-2 噪声的类型	2
1-3 噪声的计算	4
第二章 概率与统计.....	7
2-1 概率的定义	7
2-2 联合概率	8
2-3 条件概率	9
2-4 概率函数	11
2-5 统计概念	12
2-6 概率分布	14
第三章 相关技术.....	22
3-1 相关系数	22
3-2 自相关函数	24
3-3 互相关函数	31
3-4 功率谱密度	32
3-5 维纳-欣钦定理	33
3-6 白噪声	35
3-7 限带白噪声	37
3-8 相关检测	42
第四章 电路噪声.....	45
4-1 热噪声	45
4-2 等效电路	46
4-3 散粒噪声	50
4-4 等效噪声电阻	52

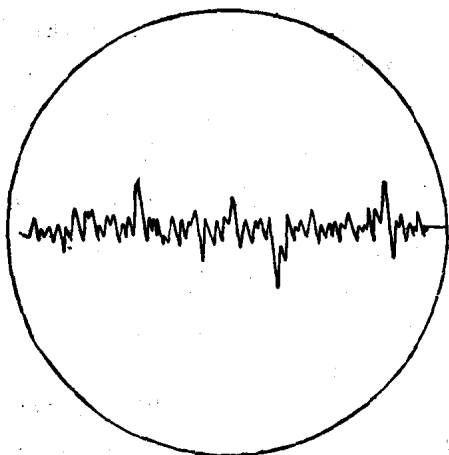
4-5 电流配分噪声	55
4-6 双极型晶体管噪声	56
第五章 噪声的度量	58
5-1 噪声系数	58
5-2 典型的噪声系数	63
5-3 级联网络	66
5-4 噪声系数的测量	67
5-5 噪声温度	69
5-6 噪声温度的测量	77
第六章 系统	79
6-1 模拟系统	80
6-2 信噪比	89
6-3 脉冲系统	90
6-4 通信容量	95
习题	98
答案	102
参考资料	103
附录	105
A. 集合论	105
B. 功率谱密度	108
C. 维纳-欣钦定理	110
D. 热噪声	112
E. 散粒噪声	113
F. 噪声系数	115
索引	120

第一章 绪 论

电噪声可定义为有害的信号,它总是存在于通信系统中,噪声的存在就妨碍有用信号的接收,并且,一般来说,噪声是限制信号检测的因素。因此,研究噪声是研究通信系统的重要内容。由于噪声的大小最终将决定系统的性能,因而必须估计噪声的限制效应。此外,其他的有害信号,例如邻近电台的干扰,也是同等重要的,在一般分析中,必须和噪声一起加以考虑。

1-1 噪声的性质

在通信系统中,噪声和干扰的作用多少有些类似。但是,



1110270

它们在性质上有一个重要的不同之处。我们知道，噪声一般是由一系列随机电压组成，这些电压的相位或频率是不相关的，有时这些电压是尖峰脉冲。而干扰通常是周期的、有规则的。仔细的观察表明，噪声电压很象脉冲波，有一些很高的峰值，它的出现是随机性的并且是连续不断的。当用示波器观察时，噪声给人以“尖峰”的印象，如图 1 所示。

平均来说，脉峰的持续时间是微秒量级，因而包含高频分量。噪声的随机性要求人们研究它的统计特性。而利用傅里叶变换技术，可以得到有关噪声的频率特性和相位特性的某些知识。

1-2 噪声的类型

尽管存在着许多种噪声源，但可将它们大致分为自然噪声和人为噪声。人为噪声主要来自电器设备，例如整流式电动机、引燃装置中的火花塞、有毛病的开关、电动刨刀等等。它们产生的“类噪声”电压常常具有规则的特性，因而也可看成干扰。这些噪声在特性上表现为冲激效应，通常由具有确定周期的许多衰减正弦波组成。当汽车开过住宅时，火花塞的噪声效应可以清楚地在家用电视机屏幕上看到，它是一组亮点，覆盖了整个画面。对人为噪声的研究表明，可以用噪声抑制器或改进部件的设计来减小噪声或消除噪声源。

自然噪声是指宇宙辐射、大气噪声以及大家较熟悉的电子电路噪声。宇宙噪声和大气噪声通常是经过接收天线进入系统的。宇宙噪声主要包括由太阳和银河系辐射源产生的电磁辐射。研究太阳辐射是一个巨大的课题，它对无线电接收的影响是众所周知的。但是，如果改变天线方向性或使天线指向远离太阳的方向，则可以减小太阳对接收天线的直接影响。

银河系辐射源的噪声效应更为普遍，它的产生是由于银河系中星体的辐射。特别是某些辐射星球，例如仙后座发射有规律的一定量噪声。合适地调整天线指向，使它远离这类噪声源，则可以避免这类噪声。通常用天空噪声温度来表示“天空噪声”的整个效应。天空噪声一般低于电路噪声，且在很宽的频率范围内变化。

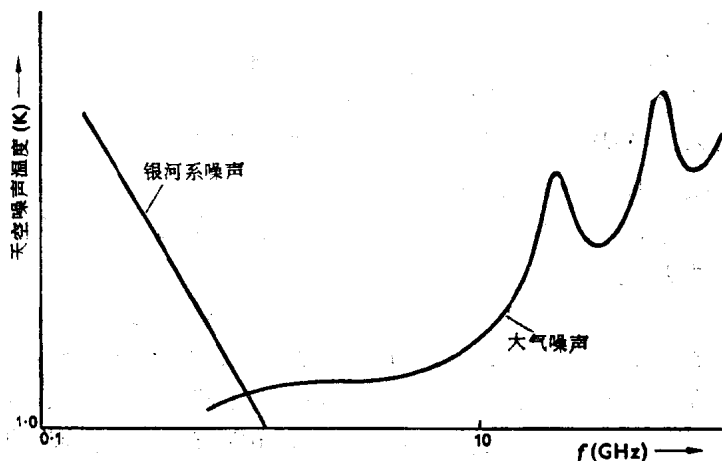


图 2

从图 2 可看出，在微波频率范围内，天空噪声温度最小。这个频段称为低噪声“窗口”，因此可把它用到射电天文学和宇宙通信领域中去^[2]。由于来自辐射星和太空人造卫星的接收信号很微弱，因而保证从天空各部分接收的背景噪声尽可能小是事关紧要的。背景噪声更多的来源是由水蒸气、雪等产生的频率在 22GHz 上的散射，以及大气层中氧气分子吸收而产生的频率在 60GHz 上的散射。这些影响在图 2 中以谐振峰的形式给出。

最麻烦的自然噪声是电路噪声，这就是通常所说的热噪声和散粒噪声。热噪声是由导体中自由电子的随机运动产生

的。电子与导体中振动原子的碰撞，而电子的运动与温度有关，因此在导体中产生起伏电流。导体中的平均电流为零，但是，随机起伏在导体两端产生开路噪声电压。另一方面，阴极表面发射电子的随机起伏造成散粒噪声。这种电子发射的随机起伏造成了电子管中的散粒噪声电流。半导体二极管或三极管中电荷载流子扩散的随机变化也造成器件的散粒噪声电流。

所以，电路噪声是由于电子部件的特性造成的，而且是不能消除的。因此，对电路噪声的研究是研究通信系统的重要内容，我们将在第四章中讨论这个问题。但是，人们关心的是寻找缩小电路噪声的方法。可以这样来达到这一要求：合适地选择部件，采用低温，例如采用参量放大器以及氦致冷的量子放大器。

由于在接收机中，噪声通常占有很宽的频率范围，所以不可能在任何一特殊频带内避免噪声的存在。但是，很明显，在100kHz 到 30MHz 的频率范围，所接收的噪声是十分大的，在更高的甚高频（VHF）、超高频（UHF）及微波段，接收的噪声减小。然后，在毫米波范围，噪声再一次趋向于增加，此后一直保持稍高的噪声电平。因而，某系统噪声功率的估値是根据它在某确定频段的总量而定的。此频段常常是接收机所使用的带宽或是所研究的传输系统的带宽。

1-3 噪声的计算

用来计算噪声的数学概念与噪声电压，或噪声功率谱密度有关。由于噪声在正、负值上起伏，故首先要确定噪声电压（或电流）的均方值，然后得出交流噪声功率 $P_n = \overline{U_n^2}/R$ ，其中 $\sqrt{\overline{U_n^2}}$ 是噪声电压的均方根值， R 是电路所包含的电阻。另

• 4 •

一个办法是,研究噪声的谱分布并计算它在给定带宽 Δf 中的谱密度 $G(f)$,这常常是更方便的办法。采用积分的办法,可以计算在 1Ω 负载电阻上的噪声的平均功率或噪声电压的均方值。白噪声是一个特例,常用它做为参考标准。有关这些问题的详细内容在第三章中给出。

由于传送到负载上的噪声功率取决于负载电阻大小,因此,需要对所计算的噪声功率的特性给予准确的定义。实际上,最常用的定义是可用噪声功率,即在匹配条件下,负载上能得到的最大噪声功率。这个条件是经常使用的,而一般的通信系统都工作在匹配状态。因为在此条件下,对任意给定负载,它给出可能是最坏的噪声效应,这可以用最大功率传递定理来证明。

为了对噪声的统计性质有更好的理解,读者必须具有概率和统计的知识。第二章主要介绍这方面的内容。这些基本概念的发展,就得到了自相关函数和互相关函数的概念,这些内容在第三章中讨论。但是,为了详细地分析系统,需要更好地理解随机信号理论^[2]及判决理论^[4,5]。后者在研究噪声中信号的提取和检测时特别有用。从噪声中提取和检测信号主要发生在很微弱信号的门限区域,一些雷达系统常出现这种情况。在这方面,自相关技术与互相关技术是很有用的。

在大多数实际通信系统中,惯用的比较性能的标准是系统中的信号功率对噪声功率的比值,它定义为检波器输出端信号对噪声的比值,简称信噪比或 S/N 比。因为各种系统的特性有很大的不同,要得到完满的比较是很困难的。所以,这个标准常用来作为比较不同系统的基础。由于不能要求单个系统在各方面都优越,故对于某一应用,所选系统常常是在几个指标中作折衷考虑。

由于不能从通信系统中完全消除噪声,故必须使它的影

响最小或使信噪比尽可能的大。可以认为一个好的电视系统，应该有大约 60dB 的信噪比，而一个商用的令人满意的电话系统应有约 30dB 的信噪比。然而，某些雷达系统，当输入信噪比值低到 3dB 时，仍然是可用的。这个数字在另外的通信系统中，例如在电视系统中，则完全不能接受。

第二章 概率与统计

在很多物理现象中, 实验结果可能表现为一些不能准确预测的随机起伏. 例如, 在投掷钱币时, 不可能预言什么时候出现正面或反面. 但是, 当投掷次数很多时, 其结果可能表现出某种规律性. 从而, 平均来说, 我们可以发现钱币正面和反面的出现大约是对等的. 为研究事件的平均性能, 就要确定某一结果(例如钱币的正面或反面)出现的频率. 在数学中, 把它定义为概率^[6].

与概率相联系的是概率分布和概率密度函数这两个概念, 它们是用来描述大量事件的结果的. 对大量事件的结果的分析和研究证明, 它们是有一定规律性的. 实质上, 这就是通常所说的统计规律^[7].

2-1 概率的定义

多次重复一个随机试验, 例如投掷钱币, 并设两个结果是 A (出现正面) 或是 B (出现反面). 如果 m_A 是总的 n 次投掷中 A 出现的次数, 则 A 出现的相对频率为 m_A/n . 用 $P(A)$ 表示 A 的机会或概率, 如果 n 很大的话, 比值 m_A/n 将趋近某个平均值且变化较小. 这个比值定义为概率 $P(A)$:

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} m_A/n$$

同样, 如果 m_B 是 B 出现的次数, 则有

$$P(B) = \lim_{n \rightarrow \infty} m_B/n$$

其中 $P(B)$ 是 B 出现的概率。因此可得知，如果每次投掷钱币中，事件 A 一定出现，则 $m_A = n$ 且 $P(A) = 1$ 。另一方面，如果 A 绝不会出现，则 $m_A = 0$ 且 $P(A) = 0$ ，这意味着它是一个不可能发生的事件。于是，任何一个概率的值总在 0 和 1 之间。即 $0 \leq P(A) \leq 1$, $0 \leq P(B) \leq 1$ 且 $P(A) + P(B) = 1$ 。

由于一个随机事件(例如投掷钱币)的某一结果，可以和抽样空间的一个点相联系，而所有结果的总和可以和整个抽样空间相联系，因而概率这一概念可以和抽样空间的一个点相联系起来^[3]。这样一个数学概念使得我们可以用抽样空间来确定一个事件的概率，这就导致了研究集合论^[4]。更详细的内容见附录A。

2-2 联合概率

当两个事件(或更多个事件) A 与 B 不是互不相容的，即它们可以同时出现，则同时出现的概率称为联合概率 $P(AB)$ 。如果 m_{AB} 表示 n 次试验中 A 和 B 同时出现的次数，则有：

$$P(AB) = \lim_{n \rightarrow \infty} m_{AB}/n$$

在许多事件中，在 A 和 B 可能同时出现，也可能不同时出现的情况下，则 A 或 B 出现的总概率定义为 $P(A + B)$ 。如果 $(m_A + m_B)$ 是总的 n 个事件中 A 或 B 事件出现的次数，则

$$\begin{aligned} P(A + B) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(m_A + m_B)}{n} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m_A}{n} + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m_B}{n} - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m_{AB}}{n} \end{aligned}$$

或

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB)$$

其中, $P(AB)$ 是 A 和 B 同时出现的概率, 必须把它从 $P(A) + P(B)$ 的总和中减掉, 因为无论是 $P(A)$ 还是 $P(B)$, 两者都包含了 A 和 B 同时出现这样的事件的概率。

2-3 条件概率

在某些事件中, A 的出现取决于 B 的先验出现。发生这样情况的概率称为条件概率。因而, 当 B 已经发生的情况下, 出现 A 的条件概率 $P(A|B)$ 为:

$$P(A|B) = m_{AB}/m_B$$

其中, m_{AB} 是 A 和 B 联合出现的次数, m_B 是 B 出现的次数 (A 出现与否都可以)。于是

$$P(A|B) = \frac{m_{AB}}{n} \frac{n}{m_B} = \frac{P(AB)}{P(B)}$$

同样

$$P(B|A) = \frac{P(AB)}{P(A)}$$

将上述两式组合, 可得

$$P(AB) = P(A|B)P(B) = P(B|A)P(A)$$

或

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

这就是众所周知的贝叶斯 (Bayes) 定理。

特殊情况下, 如果 $P(A)$ 和 $P(B)$ 是互相独立的事件的概率, 则 $P(A|B) = P(A)$, $P(B|A) = P(B)$, 于是

$$P(AB) = P(A)P(B)$$

或者说互相独立的事件 A 和 B 的联合概率是其各自概率的乘

积.

【说明】

信息论中的两个重要的概率是先验概率和后验概率,这两个概念涉及到信号的传输与接收.例如,发送一个信号 A 的先验概率就等于 $P(A)$,在某信号 B 已被接收到的情况下,发送一个信号 A 的后验概率由条件概率 $P(A|B)$ 给出.

例 1 随机地投掷三个钱币,求以下概率:

- (a) 全出现正面.
- (b) 全是正面或全是反面.

解 (1) 随机地投掷钱币可以得到正面或反面.出现正面或反面是等概率的,即 $P(H)=P(T)=\frac{1}{2}$. 于是,三次投掷中全出现正面的概率为联合概率 $P(HHH)=P(H)P(H)P(H)=\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{8}$.

(2) 由于全是反面的概率 $P(TTT)=P(HHH)=\frac{1}{8}$,故全是正面或全是反面的总概率是 $P(HHH)$ 与 $P(TTT)$ 之和,即 $\frac{1}{8} + \frac{1}{8} = \frac{1}{4}$.

例 2 一个盒子装了六个红色球和三个蓝色球,相继地取出两个球,如果第一个球是红色的,问第二个球是不同颜色的概率?

解 取出一个红色球的概率是九个当中的六个,即 $P(R)=\frac{6}{9}=\frac{2}{3}$. 由于第二个球必须是蓝色的,我们要用到一个红色球已被取出后,取蓝色球的条件概率 $P(B|R)$. 于是,由余下的五个红色球和三个蓝色球,可知 $P(B|R)=\frac{3}{8}$.

取出两个球的联合概率是 $P(RB)$,由贝叶斯定理给出,