声呐信号处理引论

李启虎　著

海洋出版社

1985年·北京

序

声呐信号处理是信号处理理论在水声领域中的应用，是一门对国防和国民经济的发展都有重要作用的边缘学科。对于从事声呐系统研制的设计师、工程技术人员来说，声呐信号处理理论乃是一门必修课；对于使用声呐的技术人员和海军指战员来说，大致了解声呐信号处理的基本概念及结果也是十分必要的。

由于声呐信号处理理论内容很多，尤其是数字信号处理技术的迅速发展，不少新技术、新概念仍处于萌芽状态。从事实际工作的工程技术人员难以在短时期内了解这一理论的各个方面。

本书试图以比较简明的方式，向读者介绍声呐信号处理的基本理论及一些具有实际应用价值的正在研究中的课题。希望对于从事声呐研制和应用的科学工作者、工程技术人员以及海军指战员有所帮助。

中国科学院声学研究所所长汪德昭同志曾对本书的写作给予很大的支持，提出过宝贵的意见。本书的部分初稿曾由黄曾旸同志审阅，他的一些建议使本书无论在内容上还是在形式上均有所改进。对于这些支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于本人学识和实际经验的局限，本书一定有许多不妥之处，我期待着读者的批评与指正。

作　者

1983年2月

内 容 简 介

声呐是目前用来进行水下观测、定位、识别和通讯的主要设备，它在海洋开发中日益得到广泛的应用，而声呐工作状态的优劣，很大程度上取决于声呐信号处理技术。该书以简明扼要的方式，向读者介绍声呐信号处理的基本原理及一些具有实用价值的正在研究中的课题。

该书内容分为三部分：第一部分，简介声呐信号处理中常用的基本知识，从信号与系统理论入手，进一步介绍最佳估计与检测理论；第二部分，既介绍了声呐系统设计的一般概念，又对波束成形和数字式声呐的信号处理技术作了详细的描述；第三部分，用专题选讲的方式，针对水声工程技术的特点，就人们感兴趣的新技术和新概念作了简介。

该书内容广泛，语言简练，层次分明，适合从事声呐系统研制的设计师、工程技术人员，以及使用声呐的技术人员参阅，也可作为水声专业高年级学生的参考书。

声呐信号处理引论

李 启 虎 著

海洋出版社出版（北京市复兴门外大街）

新华书店北京发行所发行　八九九二〇印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32　印张：$14^1/_2$　插页：1 字数：308千字

1985年5月第一版　1985年5月第一次印刷

印数：1—2000册

统一书号：13193·0227　定价：3.00元

目　录

第一篇　预备知识

第一章　概率论 …………………………………………… 1
一、样本空间与概率 …………………………………… 1
二、随机变量与分布函数 ……………………………… 13
三、随机变量的数字特征 ……………………………… 20
四、大数定理和中心极限定理 ………………………… 29
五、随机过程简介 ……………………………………… 35
第二章　信号与系统理论 ……………………………… 44
一、信号与频谱 ………………………………………… 44
二、线性系统 …………………………………………… 62
三、信号的非线性运算 ………………………………… 73
四、最佳估计理论与检测理论介绍 …………………… 82

第二篇　声呐系统与波束成形理论

第三章　声呐系统设计的一般概念 …………………… 91
一、声呐系统的构成及特点 …………………………… 91
二、声呐方程 …………………………………………… 96
三、水声信道 …………………………………………… 105
四、海洋噪声 …………………………………………… 113
五、海洋中的混响 ……………………………………… 124
六、舰艇辐射噪声 ……………………………………… 131
七、声呐信号的最佳检测问题 ………………………… 140
八、主动声呐信号分析 ………………………………… 151
第四章　波束成形理论 ………………………………… 169

一、波束成形的一般概念 ……………………………………169
二、线阵 ………………………………………………………178
三、圆阵与圆弧阵 ……………………………………………189
四、加权与加档 ………………………………………………197
五、基元离散分布的空间基阵 ………………………………213
六、连续分布的基阵 …………………………………………224
七、普通波束成形的实现 ……………………………………234
第五章　数字式声呐的信号处理 ……………………………245
一、引言 ………………………………………………………245
二、采样与分层 ………………………………………………249
三、数字滤波 …………………………………………………266
四、快速傅里叶变换(FFT) …………………………………279
五、数字多波束系统 …………………………………………288
六、时域上波束成形的新方法 ………………………………295
七、频域上的波束成形 ………………………………………305
八、自适应波束成形 …………………………………………311

第三篇　专题选讲

第六章　目标方位角、距离和速度的估计……………………332
一、声呐系统中的参数估计问题 ……………………………332
二、线阵与圆弧阵的分裂波束定向 …………………………343
三、互谱法精确定向系统 ……………………………………357
四、目标测距与测速的实现 …………………………………364
五、被动测距声呐原理 ………………………………………371
六、对目标参数的自动判决 …………………………………377
七、水声信道的起伏对主动声呐检测的影响 ………………387
第七章　声呐设计中的计算机模拟 …………………………400
一、系统的计算机模拟的必要性 ……………………………400

二、随机信号的模拟 ……………………………………………405
三、声呐环境场的模拟 …………………………………………417
四、波束成形的计算机模拟 ……………………………………421
五、后置积累的计算机模拟 ……………………………………430
六、其他常用算法 ………………………………………………434
附录 ………………………………………………………………446
1. 常用数据 ………………………………………………………446
2. $1/K$倍频程 ……………………………………………………446
3. 速度换算 ………………………………………………………447
4. 长度换算 ………………………………………………………447
5. 常用分贝换算 …………………………………………………448
6. 正态分布 ………………………………………………………448
7. sinc(x)函数表 ………………………………………………450
8. 贝塞耳函数$J_0(x)$和$J_1(x)$ …………………………………454

第一篇 预备知识

第一章 概 率 论

概率论是声呐信号处理理论中所用到的最基本的数学工具。因为声呐信号通常可以被看作是随机信号，所以对声呐信号的各种处理，从数学角度来看就是对随机信号进行运算及变换。这正是概率论所研究的对象。

声呐信号处理理论的迅速发展是把概率论、信息论、水声物理学等基本理论用于声呐系统设计的结果。反过来，声呐技术的发展又不断地提出新的课题，推动这些学科的研究工作。

本章我们将介绍声呐信号处理中所用到的概率论、数理统计和随机过程的基本概念。我们的重点是从实用的角度去解释那些主要的定理和结论，而不是这些定理本身的数学推导。

一、样本空间与概率

概率论是数学的一个分支，它研究的对象是随机事件的数量规律性。

自然界中有许多事件，在一定条件下可能出现也可能不出现，这种现象称为随机事件。例如一个硬币有两面，一面

是面值（数字），另一面是图案（国徽）。我们随便掷一个硬币，到底是数字朝上，还是图案朝上，事先并不知道。所以“掷一个硬币图案朝上”就是一个随机事件。在声呐信号的检测中，也有大量的随机事件，例如某一时刻有没有目标出现以及出现在哪一个方向等就是随机事件。

随机事件在一次观测中是不是发生，我们是不知道的。但是，这并不是说它是一种没有规律的现象。当观测次数很多时，随机事件的出现往往有一定的规律性。概率论就是研究这种规律性的数学分支。

为了用数学的语言来描述随机事件，我们先引进集合的概念。集合的概念在数学的各个分支中是常见的。例如在几何学中，“与一个已知点等距离的点的集合”是一个圆；在微积分学中，一个函数的定义域是一个数的集合。

在概率论中，集合的概念起着更基本的作用。我们对很一般的抽象集合和具体的特殊集合同样感兴趣。考虑以下的例子：

(a)一个学院中的全体学生；

(b)一个靶标上的全体弹着点；

(c)一个声呐基阵上的所有换能器。

对上面这些例子，建立一个数学模型，即对“一组事物”这个直观概念抽象化和一般化，就得到集合的概念。把构成集合的那些具体或抽象的事物称为样本点，而把样本点的全体称为样本空间。因此，样本点可以是一个学生、一个几何点的抽象。

今后，我们用大写英文字母X表示一个样本空间，它可能包含任意多个点，甚至无穷多个点。样本空间中的任意一

个点用小写希腊字母ω来表示。全部样本点的任何一部分所构成的集合，都称作是X的一个子集合。由于已经规定了X，所以我们干脆称它为一个集合。一个集合的极端情况可以是X本身，或者是一个点子也没有的空集，我们以后用Λ来表示空集。

如果对任何给定的点能够讲出它是属于还是不属于一个特殊的集合A，那么集合A就完全确定了。属于或不属于A分别记为

$$\omega \in A,\ \omega \notin A \tag{1.1}$$

如果A的每一点都属于B，那么A被包含在B中，是B的一个子集，我们用$A \subset B$或$B \supset A$来表示；如果两个集合A、B恰好有同样的点子，则它们是相同的，记作$A = B$。

对集合进行运算可以产生另外一些集合，它们满足一些有关的法则。这些法则的证明是很容易的，所以下面我们只是把这些运算与有关法则列出来。

余集 集合A的余集是由不属于A的那些点所构成的集合，记作

$$A^c = \{\omega:\ \omega \notin A\} \tag{1.2}$$

和集 两个集合A和B的和集记作$A \cup B$，它是至少属于A和B之一的点的集合。即

$$A \cup B = \{\omega;\omega \in A\text{或}\omega \in B\} \tag{1.3}$$

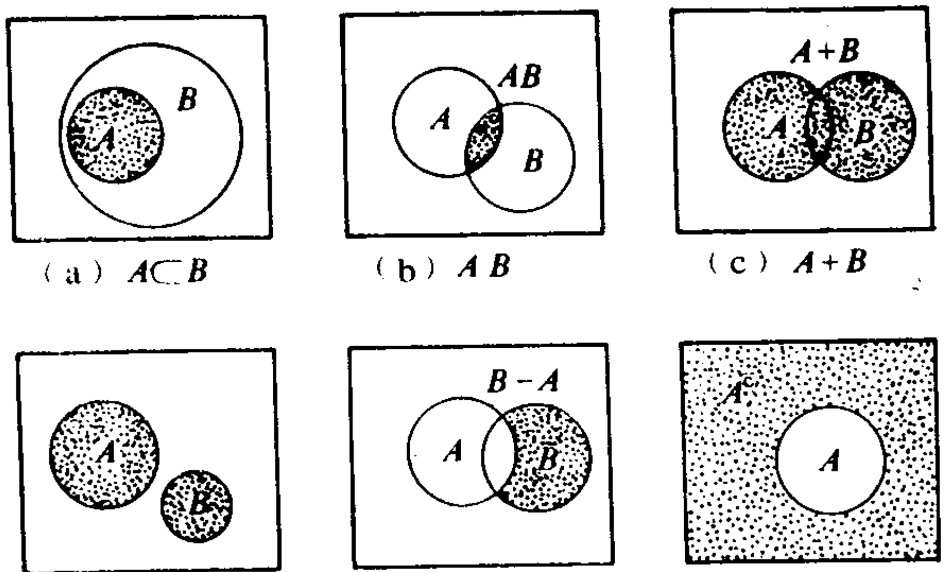
交集 两个集合A和B的交集记作$A \cap B$，它是同时属于两个集合的点所构成的集合。即

$$A \cap B = \{\omega;\omega \in A\text{同时}\omega \in B\} \tag{1.4}$$

差集 集合A和集合B的差集记作$A - B$，它是由属于A而不属于B的点所构成的集合。即

$$A-B=A\cap B^c=\{\omega:\omega\in A\ 同时\omega\notin B\} \tag{1.5}$$

图 1.1 给出了集合之间的相互关系的几个例子。



(a) $A\subset B$　(b) AB　(c) $A+B$

(d) A,B 互不相交　(e) $B-A$　(f) A^c

图1.1　集合的相互关系及运算

为书写简单起见，用 $A+B$ 来代替 $A\cup B$，用 AB 代替 $A\cap B$。

集合的运算满足下列简单的规律：

交换律　加法和乘法都是可以交换的，即

$$A+B=B+A \quad AB=BA$$

结合律　加法和乘法都是可以结合的，即

$$A+B+C=(A+B)+C=A+(B+C)$$

$$ABC=(AB)C=A(BC)$$

分配律　加法对乘法的分配律是 $(A+B)C=AC+BC$；乘法对加法的分配律是　$AB+C=(A+C)(B+C)$

德摩根 (De Morgan) 律

$$(A+B)^c=A^cB^c \qquad (AB)^c=A^c+B^c$$

这些运算规则的证明可以通过和集、交集、差集和余集的定义去验证。

现在我们可以把随机事件的概念与集合的概念联系起来了。

我们用X表示某一试验的全体可能结果，它就是样本空间；X中的某一样本点ω就是试验的某一可能结果，也称作基本事件。一个随机事件就是X中的某一集合A。

由于随机事件和集合之间建立的这种对应关系，我们上面谈到的关于集合之间的运算及其有关法则都可以转换到随机事件上来。例如$A+B$表示事件A和事件B中至少有一个发生；AB表示事件A和事件B同时发生。

例 1 设一部声呐由甲、乙两个声呐员同时值班。令事件 $A_1=\{$甲声呐员报警$\}$，$A_2=\{$乙声呐员报警$\}$，那么 A_1+A_2表示“甲、乙两个声呐员中至少有一个报警”；A_1A_2 表示“甲、乙两个声呐员同时报警”；$(A_1A_2)^c$表示“甲、乙两个声呐员至少有一个不报警”。

读者还可以说出A_1^c，A_2^c以及$A_1^cA_2^c$等的意义。

事件的概率

既然各事件出现的可能性有大有小，自然使我们想到该用一个数字来刻划事件A出现的可能性的大小。它就称为事件A的概率，记作$P(A)$。

下面几种有关概率的定义是分别由它们所处理的问题中推导出来的，实际上也非常容易接受。

i）概率的古典定义：设某工厂生产的一批水听器共550个，其中不合格的有 28 个。我们任取一个水听器它不合

格的概率为28/550＝0.0509。换句话说，如果样本空间X由n个样本点构成，事件A由m个样本点构成，并且每一基本事件的出现都是等可能性的，那么事件A的概率为

$$P(A)=\frac{m}{n} \tag{1.6}$$

ii）概率的几何定义：假如我们随便地往一个长 3 米宽 3 米的正方形内扔石子，在正方形内有一个半径为 1 米的圆（图1.2中的阴影部分），问石子落入该圆的概率是多少？

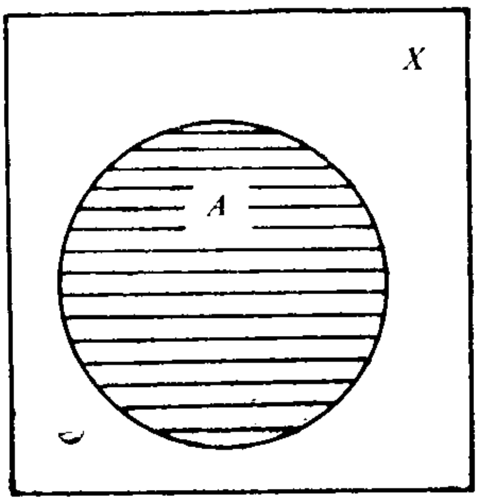


图1.2　概率的几何定义的例子

在这个例子中，样本空间X是正方形，它的面积是$3\times3=9$(米^2)。正方形内的圆是X内的一个集合A，它的面积近似于3.14平方米。于是所求的概率$P=3.14/9\approx0.35$。

在这个例子中，样本空间X包含了无穷多个样本点，我们有

$$P(A)=\frac{A\text{的面积}}{X\text{的面积}} \tag{1.7}$$

例 2　设一个单频信号具有随机相位φ，那么样本空间就是$[0,2\pi]$。φ落在区间$\left[\frac{\pi}{6},\frac{\pi}{3}\right]$内的概率是

$$P=\frac{\frac{\pi}{3}-\frac{\pi}{6}}{2\pi}=\frac{1}{12}$$

iii）概率的统计定义：设一个射手在同一条件下重复射击了n次，其中射中靶子m次，$m\leqslant n$。当次数n很大时，我们可以说这个射手的命中率是m/n。这里的“命中率”实际上指的是他一次射中的概率。一般来说，如果$N_n(A)$是在n次重复试验中事件A出现的次数，那么我们就定义一次试验中事件A出现的概率为

$$P(A)=\lim_{n\to\infty}\frac{N_n(A)}{n} \tag{1.8}$$

前面提到的有关概率的三种定义来自三种不同的模型。下面我们把概率的概念建立在一个严格的数学基础上，把三种定义统一起来。由于我们已经讨论过随机事件与集合的概念，所以已具备给出概率的公理化定义的条件。

首先，概率是结合或指定于一个集合的一个数，使在某种意义上可以度量这个集合。因此可以说，概率是集合的函数，它的定义域就是样本空间中的随机事件所构成的那些集合族。

定义 在样本空间X上的概率测度$P(\cdot)$是X上的子集的实值函数，它满足下面三条公理：

i）对每一集合$A\subset X$，函数值$P(A)$非负，即

$$P(A)\geqslant 0 \tag{1.9}$$

ii）如果A和B是两个不相交的集合，即$AB=\Lambda$，那么

$$P(A+B)=P(A)+P(B) \tag{1.10}$$

iii）样本空间X本身的概率测度为1，即

$$P(X)=1 \tag{1.11}$$

我们这里采用了一个记号$P(\cdot)$，它表示一个概率测度，用它去度量集合A，得到它的概率$P(A)$，后者是一个具体

的数。就好象我们拿尺子去量布，尺子是一种具体的测度。

很容易验证我们前面提出的三种概率的定义都符合上面提到的三条公理。

从这三条公理出发，我们可以推导出一些概率的运算规则。这些规则在今后计算概率时是很有用的。

i）概率测度永远小于 1，即对任何集合A有

$$P(A)\leqslant 1 \tag{1.12}$$

这个事实的证明是很简单的，但是在证明的过程中却要用到全部公理。因为$A+A^c=X$，所以根据(1.10)、(1.11)式有$P(A)+P(A^c)=1$，于是$P(A)=1-P(A^c)$，再用一下（1.9）式便得到（1.12）式。

ii）对满足$A\subset B$的任何两个集合，有

$$P(A)\leqslant P(B) \tag{1.13}$$

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

这个式子的证明是（1.12）式证明的翻版，只不过这一次用 B 来担当X的角色。事实上，$B=A+(B-A)$，再注意A与$(B-A)$是两个不相交的集合，就得到$P(B)=P(A)$ $-P(B-A)$，移项得到（1.13）式。

iii）对任意有限个互不相交的集合$A_1,\cdots,A_n$有

$$P(A_1+\cdots+A_n)=P(A_1)+\cdots+P(A_n)=\sum_{n=1}^{n}P(A_i) \tag{1.14}$$

只要多次使用（1.10）式，便可得到（1.14）式。

iv）对任意两个集合A与B，我们有

$$P(A+B)=P(A)+P(B)-P(AB) \tag{1.15}$$

证明：利用等式$A+B=A+(B-AB)$，应用（1.10）

式及（1.13）式，便可得到（1.15）式。

例 3 设X表示一个换能器基阵的使用寿命所构成的样本空间。用A表示“使用寿命$\geqslant 10$年”；用B表示“使用寿命<5年”。假定$P(A)=0.9$，$P(B)=0.03$。问使用寿命大于或等于5年但小于10年的概率？

令$C=\{5年\leqslant使用寿命<10年\}$。根据德摩根律$C=B^cA^c=(A+B)^c$。利用（1.13）式及（1.14）式，我们有

$$
\begin{aligned}
P(C)&=P(B^cA^c)=P[(A+B)^c]=P[X-(A+B)]\\
&=P(X)-P(A+B)=1-[P(A)+P(B)]\\
&=0.07
\end{aligned}
$$

条件概率

在实际问题中，除了要知道事件A的概率$P(A)$之外，有时还需要知道“在事件B已出现”的条件下，事件A出现的概率。这个概率记作$P(A|B)$。由于增加了新的条件，所以$P(A)$一般来说与$P(A|B)$不一样。例如，从标号1、2、3、4的四个球中，等可能地任取一球，令$A=\{$得标号为A的球$\}$，那么$P(A)=1/4$；如果已知事件$B=\{$得标号为偶数的球$\}$已出现，那么这时事件A出现就只有两种可能，或得2号，或得4号。所以$P(A|B)=1/2$。

应当如何定义$P(A|B)$呢？我们从古典概率的模型来看一下。设X由n个样本点构成，B包含m个样本点，AB包含k个样本点。那么$P(A|B)=\dfrac{k}{m}=\dfrac{k/n}{m/n}=\dfrac{P(AB)}{P(B)}$。这就启发我们对条件概率测度$P(\cdot|B)$下这样的定义：

定义 设B是样本空间X中的一个集合，$P(B)>0$，在

事件B已出现的条件下，事件A出现的条件概率$P(A|B)$定义作

$$P(A|B)=\frac{P(AB)}{P(B)} \tag{1.16}$$

容易证明，$P(\cdot|B)$满足概率测度的三条公理。因此凡是对概率所证明的结果也都适用于条件概率。

下面三条定理在计算条件概率时是常用的。

定理 1 （乘法定理） 设$P(B)>0$，那么

$$P(AB)=P(B)P(A|B) \tag{1.17}$$

这个定理是不证自明的，因为它就是（1.16）式的另一种写法。

定理 2 （全概率公式） 如果$B_1,\cdots,B_n$是n个互不相交的集合，$\sum_{i=1}^{n}B_i=X$，那么对任何集合A有

$$P(A)=\sum_{i=1}^{n}P(B_i)P(A|B_i) \tag{1.18}$$

证明：因为$A=AX=AB_1+\cdots+AB_n$，利用（1.10）式便得到（1.18）式。

定理 3 （贝叶斯公式） 设$B_1,\cdots,B_n$是n个不相交的集合，$\sum_{i=1}^{n}B_i=X$，那么对任一事件A，只要$P(A)>0$，就有

$$P(B_i|A)=\frac{P(A|B_i)P(B_i)}{\sum_{k=1}^{n}P(A|B_k)P(B_k)} \quad i=1,\cdots,n \tag{1.19}$$

证明：由条件概率的定义及全概率公式得到