

水声信号处理

国防工业出版社

水 声 信 号 处 理

〔美〕C. W. 霍顿 著

汪元美 译 周福洪 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书比较系统地介绍了水声信号处理的基础理论。该书叙述条理清楚、概念明确，是一册水声信号处理理论的入门书。

本书共分十五章。首先扼要地叙述水下声信号和噪声的基本性质，进而对信号处理中的基础概率论、随机过程、噪声背景下的信号检测及其客观准则、似然比、似然函数、海洋自然噪声的测量等方面作了详尽的分析，最后对水声信号处理的未来发展作了应有的展望。

本书可供水声专业科研、设计、生产的技术人员以及有关大专院校师生参考。

SIGNAL PROCESSING OF UNDERWATER ACOUSTIC WAVES

C. W. Horton

United States Government Printing Office

Washington, 1969

水 声 信 号 处 理

〔美〕 C. W. 霍顿 著

汪元美 译 周福洪 校

国防工业出版社

北京市书刊出版业营业许可出字第 074 号

本书在北京发行所发行 各地新华书店经售

上海商务印刷厂排版 国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 1/32 印张 9 1/2 206 千字

1978 年 7 月第一版 1978 年 7 月第一次印刷 印数: 0,001—5,200 册

统一书号: 15034·1676 定价: 0.99 元

译 者 的 话

近年来,水声信号处理的理论已逐步臻于完善,这一领域中的大量论文多半散见于国外一些期刊杂志之中,而美国C. W. 霍顿写的《水声信号处理》一书,比较系统地叙述了近代水声信号处理的基础理论,而且具有层次清楚、概念明确的特点,是一册较好的入门读物。我们遵照伟大领袖和导师毛主席关于“洋为中用”的教导,为适应我国水声事业发展的需要,将该书翻译出版,供有关读者参阅。

本书在译校过程中,曾得到有关领导和同志们的支持、关心与帮助,在此表示深切的谢意。

由于水平所限,加上译校时间较短;书中错误和不足之处在所难免,热忱希望读者批评指正。

目 录

第一章 概述	1
1.1 信号的定性描述	1
1.2 噪声源的定性描述	4
1.3 声纳、雷达、地震仪参数的比较	6
1.4 目标强度和声纳作用距离方程式	10
1.5 由边界所产生的反射和散射	12
1.6 不均匀介质的影响	14
1.7 衡量检测成功的准则	15
1.8 指向性基阵	17
1.9 有关进一步参阅资料的建议	18
习题	19
第二章 信号的定性描述	22
2.1 傅里叶积分	22
2.2 傅里叶积分在线性网络中的应用	26
2.3 信号的持续时间与带宽之间的关系	28
2.4 希耳伯特变换	32
2.5 模糊度函数	35
2.6 有关进一步参阅资料的建议	40
附录 2.1 傅里叶变换	41
附录 2.2 希耳伯特变换	43
习题	44
第三章 随机过程的理论基础	48
3.1 随机过程的描述	48

3.2	分布函数和概率密度	50
3.3	随机变量和随机过程	54
3.4	平稳性和遍历性的概念	57
3.5	方差和相关函数	60
3.6	高斯过程	66
3.7	关于限幅高斯噪声的自协方差函数	70
3.8	有关进一步参阅资料的建议	72
附录 3.1	式(3.37)的推导	73
习题		74
第四章	功率谱	75
4.1	功率谱的定义	75
4.2	积分论	79
4.2.1	黎曼积分	79
4.2.2	司蒂林(Stieltjes)积分	80
4.2.3	勒贝格(Lebesgue)积分	83
4.3	功率谱与相关函数的分析的举例	85
4.4	随机过程的解析表达式	86
4.5	一个周期过程的解析表达式	89
习题		94
第五章	概率论中的各 类 专题	96
5.1	条件概率、 似然比 和贝叶斯定理	96
5.2	特征函数	98
5.3	作为随机变量与其和及其积的函数的概率密度	100
5.4	瑞利分布	107
5.5	窄带高斯噪声的 包络	108
5.6	有关进一步参阅资料的建议	109
习题		109
第六章	随机过程的测量	114
6.1	采样的有限长度的影响	114

6.2	平方律检波器的滤波效应	119
6.3	采样在时间上的影响	122
6.4	有关进一步参阅资料的建议	128
习题		129
第七章 在噪声背景中一个已知信号的检测——		
	单信道	131
A.	匹配滤波器	131
7.1	直观法	131
7.2	分析法	132
7.3	解在物理上实现的可能性	136
7.4	滤波器进一步的讨论(匹配滤波器)	139
7.5	匹配滤波器应用于窄带信号的情况	141
7.6	对于有限个抽样值的最大信噪比	143
B.	似然比	146
7.7	信号检测作为假设检验的问题	146
7.8	对于似然比的阈值	149
7.9	一个简单的例子	150
7.10	检测概率与虚警率	152
7.11	第二个简单的例子	154
习题		159
第八章 信号检测的客观准则		
8.1	引言	161
8.2	贝叶斯系统	167
8.3	特例	170
8.4	一个具有未知参量的信号在可加高斯噪声中的情况	175
8.5	似然比接收机的讨论	178
8.6	有关进一步参阅资料的建议	179
习题		179

第九章	海洋自然噪声的测量	181
9.1	垂直线阵	181
9.2	只有两个水听器的基阵	188
9.3	一个实验数据的例子	193
习题		195
第十章	无方向性水听器的三维基阵	196
10.1	引言	196
10.2	有关数字多波束定向系统历史记载	200
10.3	“标准检测器”的分析	200
10.4	乘积阵检测器的分析	210
10.5	有关遍历性的一些补充说明	214
10.6	限幅的优缺点及采样对信号输出的影响	215
10.7	具有理想限幅的标准检测器	218
10.8	有关进一步参阅资料的建议	222
附录 10.1	式(10.15)的另一种推导	223
附录 10.2	有关式(10.37)的详细推导	224
第十一章	多维随机过程	228
11.1	一般考虑	228
11.2	协方差和相关函数	229
11.3	功率谱	231
11.4	滤波器对多维过程的影响	234
11.5	省略系综平均所引起的危害性	235
11.6	有关进一步参阅资料的建议	236
附录 11.1	方程式(11.8)的计算	237
第十二章	三维基阵的进一步分析	239
12.1	引言	239
12.2	关于水听器基阵的最大信噪比	239
12.3	关于噪声输出特性的补充说明	241
12.4	使信噪比为最大的滤波器	244

12.5	最佳滤波器输出的特性	249
12.6	关于输入信号和噪声的特殊情况	253
12.7	似然比接收机	256
12.8	有关进一步参阅资料的建议	258
第十三章 似然比和似然函数		259
13.1	不同检测系统的比较	259
13.2	在噪声背景中信号参量的提取	261
13.3	噪声掩蔽的相干信号振幅的确定	264
习题		265
第十四章 平面声基阵		266
14.1	引言	266
14.2	由傅里叶变换得出的辐射图	266
14.3	用相乘法增强指向性的优越性	271
14.4	具有 N 个相同水听器的乘积阵	274
14.5	有关乘积阵定性的评论	277
14.6	有关进一步参阅资料的建议	278
第十五章 未来的发展		279
15.1	自适应系统	279
15.2	近代计算机技术的进展	281
15.3	空间和时间处理的重新安排	282
15.4	海洋学述评	283
15.5	有关进一步参阅资料的建议	283
参考资料		284
某些习题的答案		292

第一章 概 述

1.1 信号的定性描述

在声纳系统的工作过程中，操作者经常面临着要检测一被噪声掩蔽的信号难题。这种信号也许是由操作者进行某种控制的发射信号经目标反射所引起的回波，或者为某种外部声源所发出的声波。这样两种工作方式的声纳通常分别被区分为主动式和被动式声纳。在雷达监视和地震勘探中会出现类似的情况，因此对于这些学科中的术语及其基本原理的说明可以互相引用。

由于人们考虑到信号检测存在着多方面的情况，因而规定一些表示特定情况下的术语是需要的。当要回答“是否有一个或多个信号存在”的问题时可能会用到“检测”一词。当所设计的系统对于这种问题提供的答案，或是肯定性的或是概率性的回答时，这就会使人们谈论到所谓“假设检验”的专题。就经常出现一个简单的信号的情况来说，许多已设计成的系统仅提供二种回答，“是，有信号存在”，或“不，没有信号”。由于人们力图把信号分门别类，人们可把问题作更周密地考虑。后面这种对信号类型的判定过程经常把它称为对“目标的分类”过程。

一部检测设备通常均按一定的工作方式来进行设计的，并且它的一些参数，例如检波电路的积分时间，或用于视觉检测示波管上余辉保持时间，它们一般是不能轻易改变的。但经常会出现一些不确定的信号，使得观察者难于将其舍弃或

收集。在这些情况下，操作者也许会认为延长一些检波电路的积分时间，或示波管上余辉的保持时间，他就能得到有关信号存在的一个判断。在1950年，瓦尔特(Wald)已经把这些直观的感觉经验汇集成所谓“检测理论”了。当人们能够通过谨慎地改变接收系统中存储数据的区间，以便对信号取得一定程度的确定性时，那么人们就会谈到“序贯检测”的专题。

人们不仅经常需要确定信号存在和不存在，而且还要确定与信号有关的一个或多个参量。对人们来说有意义的参量可以由简单的物理量，例如到达的时间和目标的方位，广泛地演变到复杂波形的重现。当所设计的系统要使与信号有关的一个或多个参量重现时，人们就会谈及所谓“信号提取”的问题。

“信号”一词的含义并没有明确的定义，并且假定读者对信号一词的含义仅有一个直观地理解。由于信号的定义是主观的东西，它与应用的场合有关，因此对信号的含义作一些推敲是有必要的。有人这样说：所谓“信号”，它就是人们需要观察的东西，而噪声亦就是模糊人们观察的某种东西。因而，一个捕鲑鱼的渔民，利用民用声纳设备在海洋上搜索鱼群的时候，当他发现在他附近从事搜索潜艇的军用声纳，其性能发生故障时，他可能非常高兴，因为对他进行干扰的军用声纳信号消失了。单从字面意义来看，一个人所需要的信号也可能是另一个人认为的噪声。

已有多种形状和形式的信号获得了应用。在主动式声纳系统中，人们可以采用具有固定持续时间的简单的正弦波信号和在其上具有调制的正弦波信号。亦可有脉冲型式的信号，例如由爆炸声源或撞击声源所产生的脉冲信号。在特殊情况下，人们也许会采用似随机噪声那样的信号。在被动式

系统中,它所检测的信号也许是通常所说的噪声,例如,由螺旋桨推进器或水下航行体所产生的噪声。很明显,我们的任务之一就是要求出用来描述信号的数学表述的公式。

虽然在主动式声纳搜索系统中,其声源也许可设计成能辐射已知波形的信号,但它不能保证它所检测到的回波信号与辐射信号具有相同的波形。实际上,有许多因素的作用会改变信号的波形。对于检测系统来说,与距离成反比的球面扩展有关的振幅衰减几乎是不可避免的,但它并不会引起波形的任何畸变(附带说明一句,这种理想情况下的现象并不能适用于二维波,除非这种波在远场时已能局部地近似成一平面波),由于声介质具有与频率有关的衰减因子,这就要使波形产生轻微地畸变,并且脉冲能谱也会产生相应的变化。波形的畸变主要是由声边界和介质内部的不均匀性引起的。这些影响将在1.5节和1.6节中叙述。

当一系列回波是由一组延伸着的目标(例如:潜艇)产生的时候,就有二种不同的因素会影响回声的结构。首先,在潜艇的壳体上,由具有不同结构特性的各部分,它们所产生的一系列反射波之间会产生干涉现象。这种干涉现象就会导致目标强度随着方位角的改变而迅速地发生起伏。其次,由于沿着潜艇各部分所产生的反射波的分散性,它将引起合成回声脉冲波的展宽。这亦就意味着合成回声的持续时间将与方位角有着一个简单的关系。如果 T 为由点源散射体所形成回声的持续时间, L 是潜艇的长度,那么返回的回声持续时间可能是 $T + \left(\frac{2L}{c}\right)\cos\theta$,式中 θ 是潜艇主轴线与声源和潜艇间连线的夹角, c 是海水的声速。当 θ 接近于 90° 时, $L\cos\theta$ 当然必须用潜艇的横向宽度来代替它。

脉冲畸变的最后一个来源,它是由声源、介质、海底和目标间的相对运动所引起的多普勒频移而产生的。由于声源、介质和目标(或在被动式收听系统中的检测器)相对于海底皆有不同的速度的向量,因此这些效应的变化也许是相当大的。这种效应的大小将在1.3节中予以讨论。

1.2 噪声源的定性描述

在检测设备本身所产生的热噪声,它是一种最容易描述的,并且是已经经过深刻研究的噪声源。噪声的各种特性通常与信号的特性完全无关。在这种情况下,着手降低设备内部的噪声并不特别需要考虑将被检测信号的类型。在声纳和地震仪的研究中,在波场中的自然噪声是如此之大,以致设备内部的热噪声对其性能的影响几乎可以忽略不计。从另一方面来说,利用电磁信号的检测系统的性能常常要受到接收机内部噪声的限制。

有一种噪声源,它处于设备内部噪声和海洋自然噪声之间。这种噪声是由舰船或安装基阵的平台在水介质中运动所产生的。在这种状态下所产生的噪声场是与舰船的运动速度有关的。对于水面舰艇来说,它还与海况有关。通过对换能器安装位置的精心选择和导流罩流线型恰当的设计,这种噪声在某种程度上来讲是可以得到降低的。

在地球内部和海洋中的自然噪声往往是相当强烈的,并且它包含着很宽的频率范围。研究这些噪声场的特性,对于最佳检测系统的慎密设计来说,它已成为一个重要而必需的前提。例如在海洋中,除掉已经讨论过的海洋生物噪声源之外,人们还必需考虑海面由波浪引起的噪声,水中所含空气泡破裂而发生的噪声,以及由于气象条件突变而形成的噪声,如

雨、雹等突然降落所产生的噪声。就被动式的检测来说,这些类型的噪声场形成了噪声背景,信号只有越出了这种噪声背景时,它才能重新发现。

每当人们从事于主动式信号检测时,与信号产生的同时,不可避免地会产生大量的混响噪声背景,它势必掩蔽信号。这种噪声[⊙]是很难处理的,因为它和信号通常具有相同的频率特性。由于这种噪声和回波信号皆是由发射声能的反射或散射产生的。例如,在声纳中,它遇到的物体、海底和海面混响,它们分别是由发射信号通过水中所存在的大量不规则水团和海底及海面的反射所产生的。假使人们力图通过增大发射器功率来增强回波信号能量的话,那么这些混响噪声的能量亦会与辐射能量成正比地增加。倘若人们对这种噪声进行抽样,并且这种抽样是以信号发射后开始计时的时间函数,那么人们就能清楚地看到由混响噪声过渡到自然噪声的转变过程。在开始的阶段,返回的噪声功率谱非常类似于发射信号的功率谱,随着时间的消逝,混响功率不断地下降,而自然噪声功率级仍保持不变,最终,自然噪声就变成完全占主导地位的噪声。

在地震勘探中会出现一种有趣的现象,这种现象在下面将予以说明,虽然它与声纳并没有直接的联系,但是这种现象却能提供人们一个有益的范例,它能启发人们如何利用噪声的特性来抑制噪声。在地震勘探中,一般采用的能源是炸药。炸药的爆炸将在很宽的频率范围内产生能量,来自深岩层的声反射将在 20 赫到 70 赫的范围内存在一个主频带。无论哪种爆炸声源都将会在地层表面附近产生一定数量的大振幅低

⊙ 本书中,“噪声”一词是泛指掩蔽所需信号的任何噪声,从某种程度来说,这是一个主观的定义,但是,它应用起来比较方便。

速的表面波，它们的频率大约由5赫延伸到20赫或稍大一些。在早期的爆炸试验中，在现有的频率分离技术出现之前，由于这种低频波早已使检测或记录系统产生了过载，因此它已没有足够的灵敏度来反映小振幅的高频信号。采用分离两个重迭能带信号的技术已成为信号检测系统设计的一个相当简单的例子。在这种特殊情况下，亦可采用另一种方法。由于有时可根据二种波的传播时间的不同，它可以通过适当地选择源与接收器之间的距离从而分离这两个不同频带的能量。

另一种可能很严重的噪声源是人为的对抗干扰源。这种源既可以是主动式的声源，例如战俘利用强烈的爆炸噪声以掩护自己逃跑那样的爆炸声源；它亦可以是被动式的声源，如雷达对抗中采用散布金属条的措施，利用它对电磁波的散射而形成干扰。在这里，不再一一说明这些噪声源了，但它们仍旧可用研究其他噪声源相同的方法来进行分析。

1.3 声纳、雷达、地震仪参数的比较

在1.1节中已经说过，声纳、雷达和地震仪的信号处理系统之间有着许多相似之处。一般说来，虽然上述的情况是正确的，但是，由于它们各自的传播介质存在着显著的差异，因此导致用在这三种不同系统中的信号处理方法亦有着明显的差别。在这节中，为了能集中注意力来研究它们关键性的差别，因而首先讨论了有关介质和系统的一些基本物理参量。由于这许多参量的数值有着很宽的范围，而这里仅给出一些典型的数据。

表1.1列出了这三种系统中主要物理参量的一些典型值。

表 1.1 典型声纳、雷达和地震仪特性的简要总结

系 统	波速(米/秒)	脉冲宽度 (持续时间)	脉冲长度 (米)	脉冲重复 率(秒 ⁻¹)	波 长 (米)	活动基阵 大小(米)
声 纳	1500	2~200 毫秒	3~300	0.1	0.3	10
雷 达	3×10^8	0.1~10 微秒	30~3000	2000~200	0.03	2
地震仪	1600~7000	50 毫秒	80~350	①	40~175	—

① 地震仪中的脉冲重复频率仅受勘探经济性的影响。

声纳和雷达系统的设计者在工作频率上可以广泛地选用,为了不使叙述冗繁,在表中仅采用了一个数值。在地震系统中,工作频率的选定要受到地球的衰减特性的严格的限制。与这种限制有关的情况是:在实际中,到达检测器的地震信号是一种宽带信号,而声纳和雷达的脉冲是窄带的脉冲。

在表 1.1 中的第 4 列表征了一个显著的特点,不论在这三种介质中的波速相差多大,而它们的脉冲长度出奇地接近。这种情况仿佛暗示着这三种方法有着相同的分辨率,但这是不实际的。地震方法存在着很大的缺点,第一,因为操作者不能改变工作频率;第二,由于岩层分界面的反射系数要比声纳和雷达目标的反射系数小得多。声纳的分辨率要低于雷达系统的分辨率,而其理由是相当微妙的。首先,海水对声波传播的影响要比大气对电磁波的影响严重得多;其次,在雷达系统中常采用很高的频率,并能够使人们采用宽带的信号,这就允许人们对雷达信号作更多的信号处理;第三,在下节要讲到的多普勒频移会使声纳系统的性能发生相当大的下降。

如果静止声源用来对运动目标进行回声定位的话,那么回声的频率将偏移一个 $\pm 2vf/c$ 的量。这里 c 是在介质中的声速, f 是信号的频率,而 v 是目标运动速度的径向分量。如

果信号是一个脉冲信号,并且它是由一组频率所组成,每一个频率分量也会偏移与上述相同的量,这种频移常称为多普勒频移。源的运动亦会产生相类似的频移。由于声源的运动是已知的,因此这种频移常常可以进行修正。在声纳系统中,这种装置称作自身多普勒频移补偿器。

表 1.2 典型目标速度和多普勒频移

系 统	目 标	目标速度 (米/秒)	波 速 (米/秒)	多普勒频移 $\Delta f/f(\%)$	CW 波脉冲的 带宽 $\Delta f/f(\%)$
声 纳	舰 船	± 15	1500	± 2	0.2
雷 达	飞 机	± 500	3×10^8	± 0.0003	0.01

表 1.2 表明了对在具有典型速度的介质中和典型脉冲长度的信号情况下,目标运动对多普勒频移所产生的影响。如果声纳接收机用一个通道来处理全部回声信号的话,那么它的带宽应是不存在多普勒频移时的接收机带宽的 20 倍。当信号级与噪声级可以相比拟时,除非采用大约 20 个接收通道来划分多普勒频带,使每一个通道的带宽与信号的带宽相差不多,那么这种多通道接收机将会有较好的性能,不然的话,将会严重影响接收机的性能。这些通道的相对输出当然可以用来显示目标的径向速度。就雷达的情况来说,当运动的目标为飞机时,它所能遇到的频移范围仅为脉冲带宽的 0.06 倍,因而雷达接收机能在不严重升高噪声功率的情况下来调节多普勒频移。

用来传播声纳、雷达和地震信号的介质都具有不均匀性。这些不均匀性可分大范围内的不均匀性和小范围内的不均匀性二类。大范围内的不均匀性主要与地球中岩层、海水和大气的水平分层有关。而小范围内的不均匀性与海洋、大气中