

# 水声基础技术

阎福旺 译



海洋出版社



# 水声基础技术

阎福旺 译

海洋出版社

2001年·北京

## 内 容 提 要

该书介绍国外水声基础技术近 30 年来主要发展情况,涉及到模拟技术、实验技术、信号处理技术、目标与环境研究技术及声纳换能器可靠性技术等。全书共翻译了 10 个方面的基础技术文献,即《依方位测量跟踪运动舰船》、《用于被动声纳信号处理的时间延迟估计》、《目标的距离分辨》、《水下声纳的神经自适应灵敏处理》、《将数字信号处理用于声学分析》、《多波束声纳系统现场校准程序》、《浅水环境下与战术主动声纳性能有关的能量扩展损耗的分析》、《声纳换能器可靠性改进计划 FY79 第四季度进度》、《反潜战中海洋锋的危险性》及《反潜战搜索指导者概念的可行性研究》等。

本书可供水声技术研究人员参考,也可供水声设备的论证、设计、制造、鉴定、验收、使用、维修等有关人员借鉴。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

水声基础技术/阎福旺译. —北京:海洋出版社,  
2001. 1  
ISBN 7-5027-5151-3

I. 水… II. 阎… III. 水声工程 IV. TB56

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 57200 号

责任编辑 赵士青

责任印制 严国晋

<http://www.oceanpress.com.cn>

**海洋出版社** 出版发行

(100081 北京市海淀区大慧寺路 8 号)

北京市燕山印刷厂印刷

2001 年 2 月第 1 版 2001 年 2 月北京第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.625

字数: 340 千字 印数: 1—800 册

定价: 32.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

(内部发行)

# 序

《水声基础技术》介绍了国外水声基础技术近 30 年来的主要发展情况，涉及到模拟技术、实验技术、信号处理技术、目标与环境研究技术及声纳换能器可靠性技术等。水声基础技术涉及面广，内容丰富，从大量的科技文献中可以清楚地看出水声基础技术漫长的发展过程，也可以看出这些基础技术在不断发展的科学技术中至今仍起着重要的作用。迄今为止，该书是国内在水声基础技术方面全面而丰富的译文集锦，对于水声技术的发展将起重要作用。

长期从事水声研究的阎福旺，从国外公开发行的浩若烟海的科技文献中，多年积累、认真精选，用自己的辛勤劳动为广大的水声技术人员及水声设备的论证、设计、制造、鉴定、验收、使用及维修等人员提供这本有重要参考价值的资料。对他的敬业精神和踏实的工作表示钦佩，同时也在祝贺他的成功。

在翻译成书过程中，照顾到了水声技术发展所需的各个方面，因此所选的文献资料具有可读性和适用性，这是对广大读者忠实的表现，这种对工作极端负责的精神使我感动、使我崇敬。

科技信息是科技事业发展的基础和成功的前提，科技信息作为一种社会概念具有它的客观性、可知性、传递性、共享性、可扩充性及可处理性。因此，该书在水声基础技术的信息获取、信息处理、信息决策和信息行动等方面将会给水声技术的发展带来启迪。相信此书定会得到广大水声基础技术及有关方面读者的厚爱。

北京文献服务中心 (BDS) 王维亮

2000 年 4 月

# 前 言

水声基础技术是水声技术中最基本的技术。基础技术是技术发展的奠基石，它涉及到技术方面有关的概念、雏型及基础。基础技术的坚实程度与技术发展的潜力紧密相关。在科学技术发展的新时代，基础技术的发展应该受到极大的重视，因为它是科学技术上水平的前提。水声基础技术主要由以下几个部分组成，即：模拟技术、实验技术、信号处理技术、目标与环境研究技术及声纳换能器可靠性技术等。这些基础技术是水声技术发展的基础。尽管是基础技术，但并不是固定不变的，它随着需求的技术的发展而发展，也就是说，在技术发展的过程中需要相应的基础技术不断扩展其自身的范围和内涵，以更好地适应技术发展的需要，不断地显示出基础技术自身的活力。

长期以来，国外的水声基础技术的发展一直处于倍受关注的位置。任何一项实用的新技术的发展都经过思想与概念、技术构思与准备及技术实施与检验等不同阶段的工作，只有这样才能做到使实用的技术逐步进到更高级的阶段。在学习与借鉴国外的先进技术中，加强基础技术的学习是非常重要的，更好地学习与借鉴国外的基础技术研究的出发点、观点与方法，将对我们的研究工作具有启发作用，从而可有力地推动我们的技术发展。

在 1973 年至今的近 30 年中，出现了许多水声新技术，这些水声新技术对装备与应用的发展起了非常重要的作用。支撑这些水声新技术的主要基础技术就是模拟技术、实验技术、信号处理技术、目标与环境研究技术及声纳换能器可靠性技术等。译者从近 30 年来的国外水声基础技术研究的事实出发，从多年积累公开发行的科技文献中选择了其中部分的主要的基础技术研究成果，经翻译后形成了本书。该书就 10 个方面的基础技术作了介绍，即《依方位测量跟踪运动舰船》、《用于被动声纳信号处理的时间延迟估计》、《目标的距离分辨》、《水下声纳的神经自适应灵敏处理》、《将数字信号处理用于声学分析》、《多波束声纳系统现场校准程序》、《浅水环境下与战术主动声纳性能有关的能量扩展损耗的分析》、《声纳换能器可靠性改进计划 FY79 第四季度进度》、《反潜战中海洋锋的危险性》及《反潜战搜索指导者概念的可行性研究》等。在上述的 10 个方面的基础技术研究中，《多波束声纳系统现场校准程序》涉及到实验技术；《反潜战搜索指导者概念的可行性研究》涉及到模拟技术；《用于被动声纳信号处理的时间延迟估计》、《水下声纳的神经自适应灵敏处理》及《将数字信号处理用于声学分析》涉及到信号处理技术；《依方位测量跟踪运动舰船》、《目标的距离分辨》、《浅水环境下与战术主动声纳性能有关的能量扩展损耗的分析》及《反潜战中海洋锋的危险性》涉及到目标与环境研究技术；《声纳换能器可靠性改进计划 FY79 第四季度进度》涉及到声纳换能器可靠性技术。

在翻译与成书过程中，得到了北京文献服务中心（BDS）王维亮的支持与指导。王维亮从情报研究与使用的要求出发，指出了素材的选取原则与范围，为翻译与成书提供了

指导性的意见。在此向他致谢。

由于水平有限，译文中的错误在所难免，敬请读者指正。另外，由于原著插图不清，致使译文中个别插图效果欠佳，敬请见谅。

译者

2000年5月

责任编辑：赵士青

封面设计：何 英

# 目 次

第一篇	依方位测量跟踪运动舰船.....	( 1 )
第二篇	用于被动声纳信号处理的时间延迟估计.....	( 8 )
第三篇	目标的距离分辨.....	( 25 )
第四篇	水下声纳的神经自适应灵敏处理.....	( 42 )
第五篇	将数字信号处理用于声学分析.....	( 55 )
第六篇	多波束声纳系统现场校准程序.....	( 90 )
第七篇	浅水环境下与战术主动声纳性能有关的能量扩展损耗的分析.....	(100)
第八篇	声纳换能器可靠性改进计划 FY79 第四季度进度 .....	(136)
第九篇	反潜战中海洋锋的危险性.....	(156)
第十篇	反潜战搜索指导者概念的可行性研究.....	(166)



# 第一篇 依方位测量跟踪运动舰船

## 1. 摘要

该文提供了用于跟踪运动舰船的方法，该方法以远距离运动目标作为跟踪平台方位测量的函数。这个方法改进了在美国声学学会杂志 69,738-743 (1981) 提供的 Hinich-Bloom 被动跟踪方法。假定目标以常速在固定的航向上运动，而平台是机动的。根据旋转坐标系统计算了方向余弦，在旋转坐标系统中将 $0^\circ$ 放在估计的目标方位的均值处，这使方位正弦的偏差达到最大。为了估计目标坐标，将其坐标系反向旋转。当噪声是高斯型时，目标距离和方位的估计对于远距离而言将近似为最大似然估计。

## 2. 引言

仅用方位测量跟踪运动目标是某些困难的非线性统计问题。被动声纳跟踪与主动跟踪相比显然是比较困难的，主动跟踪是依接收的声纳脉冲<sup>1)</sup>信息而得到距离。当目标是远距离且跟踪的船慢速运动时，被动跟踪成为简单的统计问题。

论文表明了 Hinich-Bloom 方法的扩展与改进。Hinich-Bloom 方法是测量的跟踪平台用噪声方位测量来估计远处的常速目标的距离和方位。当目标距离远时，方位指向性余弦近似为时间的线性函数，且与距离成反比。为了得到线性方程的系数，用最小平方的方法来进行线性近似。

这些系数估计联合得到机动结束时目标的平均距离及其坐标。如果目标的速度可以依信号频谱的多普勒漂移测量来估计，则可以确定目标的航向。

我的方法是开环方案，在跟踪船上指挥中心处提供的信息为的是简化常规的指挥判决。判决可以更改跟踪战略，跟踪战略为由跟踪段得到的估计的函数。这个开环方法与火控型方法不同，它可用扩展的卡尔曼滤波使估计适时修正。

我的方法在卡尔曼滤波方法方面有其他重要的优点。因为系数是用最小平方来估计的，其估计对偶然坏的方位值是耐用的，偶然坏的方位值是使用  $n$  个耐用的回归方法 (Hinich 和 Talwar 的文章及 Martin 的文章) 中的任何一个得到的。让我们利用统计模型的代表式。

## 3. 单目标统计模型

假定跟踪的声纳接收来自远距离目标的相干声信号。来自远距离声源的声辐射的波

---

1) Sonar 一词在国标中称“声呐”，但在军标中一直使用“声纳”，为保持名词术语的一致性，本书仍按军标使用“声纳”，特此说明——译者。

曲面的时间延迟测量在常规的声纳处理器中有大的测量误差，常规声纳处理器中接收信号的实际模型是平面波。让  $B(t)$  表示与真北有关的方位，让  $\hat{B}(t)$  表示在跟踪测量中采样周期  $T$  内时间  $t$  时的估计的方位。

方位通常是用延迟加求和的波束形成得到的，但是在这里不需要用于得到方位的专定的处理类型。在上述方法中为了准确跟踪  $\hat{B}(t)$  的精度是重要的。因此，为了得到具有最小均方根误差 (rmse) 的无偏的  $\hat{B}(t)$ ，精确的跟踪需要声纳系统的信号处理器。

假定目标的运动有足够慢的变化，以至目标的速度  $V_T$  和方位  $\alpha_T$  (相对正北) 在跟踪段内可以作为常数处理。因此，在时间  $t$  时目标的坐标为

$$\begin{cases} x_T(t) = x_T(0) + V_T(t-T/2)\sin\alpha_T \\ y_T(t) = y_T(0) + V_T(t-T/2)\cos\alpha_T \end{cases} \quad (1)$$

让  $R(t)$  表示目标离开跟踪船的距离，跟踪船在时间  $t$  时处于  $\{x_S(t), y_S(t)\}$  位置。假定跟踪器的平均速度  $V_T$  和  $V_S$  足够小，以至在跟踪段中两个船运动的距离与  $R=R(T/2)$  相比是小的， $R=R(T/2)$  是周期中间处的距离。比较精确地考虑时，假定

$$c = (V_T + \bar{V}_S)T/R \ll 1 \quad (2)$$

那么  $|R(t) - R| < c$ 。从 (2) 式得出近似如下表示的方位指向性余弦：

$$\sin B(t) = [x_T(t) - x_S(t)]/R + O(c^2) \quad (3)$$

式中  $x_S(t)$  是跟踪器  $x$  坐标，且有

$$\cos B(t) = [1 - \sin^2 B(t)]^{1/2} = 1 - O(c^2) \quad (4)$$

当  $B(t) = 0$  时这些近似是最好的。

文中提出的方法仅用  $\sin B(t)$  估计  $R$ ，这是与我的以前的方法对照而言的。不使用  $\cos \hat{B}(t)$  拟合，因为  $O(c^2)$  是独立变量，于是有比  $\sin B(t)$  更小的方差。用一个方程就可估计目标的跟踪，因为将假定  $V_T$  是依多普勒漂移测量来确定的。

假定方位是离散时间  $t_n = n\tau$  时得到的， $\tau$  是声纳信号处理器的积分时间。数据组是  $\{\hat{B}(t_n), x_S(t_n); n=1, \dots, N = \{T/\tau\}\}$ ， $x_S(t_n)$  当没有误差时被假定已知。调整  $\hat{s}_n = \sin \hat{B}(t_n)$ ，由 (1) 式和 (3) 式得到的数据满足以下的线性统计模型：

$$\hat{s}_n = R^{-1}x_T(0) + (R^{-1}V_T \sin\alpha_T)(t_n - T/2) - R^{-1}x_S(t_n) + \epsilon_n \quad (5)$$

近似误差  $O(c^2)$  在误差项  $\epsilon_n$  内是吸收的。在那里不需要假定  $\epsilon_n$  有零均值，因为  $\epsilon_n$  中的任何一个偏差都将在常数项中被吸收，该常数项不用于估计距离。

#### 4. 用最小平方估计距离

当目标跟踪段中的中间位于  $y$  轴以至  $B(t) = 0$  时，则近似式 (5) 式是最好的。尽管这样的条件与给定的机动不相似，但可以通过旋转坐标系，以一个平均方位  $\bar{B} = N^{-1} \sum_{n=1}^{N-1} \hat{B}(t_n)$  的角度而人为地获得。换句话说，在旋转坐标系内计算船的坐标和目标的方位，在真实的坐标系中  $y$  轴有角  $\bar{B}$ 。在新的  $(x, y)$  坐标系中，平均方位是  $0^\circ$ ，方位是小的。

为使在文字方面具有  $t$  的符号不混乱， $x_S(t_n)$ ， $\alpha_T$  和  $B(t_n)$  现在将表示作为旋转坐标系

统中测量的船和目标的参量。不管在文本中需要不需要，雷达将对这些相对有意义的项进行提醒，最终的估计将依真实的坐标来表示。

为了将 (5) 式重新参量化，让  $a = [x_T(0)/R] + \mu$ ， $\mu$  是旋转系统中误差  $\epsilon_n$  的平均值， $\beta = (V_T \sin \alpha_T)/R$ ， $b = -1/R$ ， $-90^\circ < \alpha_T \leq 90^\circ$ ，此时 (5) 式变成

$$\hat{s}_n = a + \beta(t_n - T/2) - b x_s(t_n) + \epsilon_n \quad (6)$$

对于  $n=1, \dots, N$  而言。假定  $\epsilon_n$  是独立的随机变量，依截段上的变量  $t_n$  和  $x_s(t_n)$  作  $\hat{s}_n$  的最小平方回归，得到  $\beta$  和  $b$  的无偏的和近似的高斯估计。如果  $s_n$  是具有通用方差  $\sigma_s^2$  ( $\text{rad}^2$ ) 的高斯型的，则这些估计是最大似然估计。

为了简化最小平方估计的表示，现定义：

$$\begin{cases} c_x = \sum_{n=1}^{N-1} (\hat{s}_n - \bar{s})(t_n - T/2) \\ c_{xx} = \sum_{n=1}^{N-1} (\hat{s}_n - \bar{s})[x_s(t_n) - \bar{x}_s] \\ c_u = \sum_{n=1}^{N-1} (t_n - T/2)^2 \\ c_{ix} = \sum_{n=1}^{N-1} (t_n - T/2)[x_s(t_n) - \bar{x}_s] \\ c_{xx} = \sum_{n=1}^{N-1} [x_s(t_n) - \bar{x}_s]^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中的“—”横线表示采样平均， $N^{-1} \sum_{n=1}^{N-1} t_n = \tau(N+1)/2 = T/2$ 。

$\beta$  和  $b$  的最小平方估计(由 Hinich 和 Bloom 给出)为

$$\hat{\beta} = D_x^{-1} (c_{xx} c_u - c_{ix} c_{ix}) \quad (8)$$

$$\hat{b} = D_x^{-1} (c_u c_{xx} - c_{ix} c_u) \quad (9)$$

其中

$$D_x = (c_u c_{xx} - c_{ix}^2) \quad (10)$$

依三角不等式，当且仅当  $x_s(t_n)$  在  $t_n$  中是线性的，则  $D_x = 0$ 。于是，如果跟踪船改变航向，或如果跟踪船的航向不是在真北时的  $\bar{B}$  或  $-\bar{B}$  情况下而改变速度，则  $D_x > 0$ 。这些估计的方差是

$$\sigma_{\hat{\beta}}^2 = \sigma_s^2 c_{xx} / D_x \quad (11)$$

$$\sigma_{\hat{b}}^2 = \sigma_s^2 c_u / D_x \quad (12)$$

它们之间的关系是

$$\rho_{\beta b} = -(c_u c_{xx})^{-1/2} c_{ix} \quad (13)$$

该例子在这点是有效的。假定跟踪的船在  $0 < t < T$  时以常航向和速度  $V_s(t) = V_{\max}(1 - |2t/T - 1|)$  运动。于是对第一个半跟踪段而言跟踪器加速，而在跟踪结束时加速停止。尽管这个例子是用于说明方法的统计特性的，但在实践中这样的机动在跟踪段的中间和结束的加速中具有平滑变化时是可以近似的。

让  $\phi$  表示在旋转  $y$  轴上的跟踪器的航向，也就是真实航向为  $\bar{B} + \phi$ 。调整原点使  $\bar{x}_s =$

0, 则跟踪器的  $x$  轴轨迹是

$$x_S(t_n) = [1 - |2n/(N-1)|](n - N/2)\tau V_{\max} \sin\phi \quad (14)$$

跟踪器在旋转坐标  $x$  轴上的投影是  $V_x = V_{\max} \sin\phi$ 。

当  $N$  较大时, 以下的附加近似是用于  $\sigma_b^2$  和  $\sigma_\beta^2$  近似:

$$\sum_{n=1}^{N/2} n^2 = N^3/24, \sum_{n=1}^{N/2} n^3 = N^4/64 \text{ 和 } \sum_{n=1}^{N/2} n^4 = N^5/160 \quad (15)$$

那时伴随着  $\bar{x}_S = 0$ ,  $c_u = (N\tau)^2 N/12$  和

$$c_{tx} = V_x (N\tau)^2 N/48 \quad (16)$$

$$c_{xx} = V_x^2 (N\tau)^2 N/120 \quad (17)$$

将 (14) 式和 (16) 式用于 (10) 式, (11) 式和 (12) 式中, 则

$$D_x = 3/5 (48)^2 V_x^2 T^4 N^2 \quad (18)$$

$$\sigma_\beta^2 = 32\sigma_\epsilon^2 / T^2 N \quad (19)$$

$$\sigma_b^2 = 320\sigma_\epsilon^2 / V_x T^2 N \quad (20)$$

依 (13) 式, 相关性是  $\rho_{\beta b} = -(5/8)^{1/2}$ 。

假定  $R\sigma_b$  是小的, 现在将给出距离估计的精度依赖于  $R\sigma_b$ , 对这个例子而言, 其精度与  $R\sigma_\epsilon / V_x T N^{1/2}$  成比例。

因为  $b$  估计  $-1/R$ , 所以  $R$  的固有估计器是  $\hat{R} = 1/\hat{b}$ 。如果误差是高斯型且  $R$  大时, 则这个估计器是近似最大似然估计。由于非线性变换,  $\hat{R}/R$  中的偏置由下式给出:

$$E[\hat{R}/(R-1)] = (R\sigma_b)^2 + O[(R\sigma_b)^4] \quad (21)$$

$\hat{R}/R$  [或  $\hat{R}/(R-1)$ ] 的近似成比例的均方根误差是

$$\text{rmse}(\hat{R}/R) = R\sigma_b + O[(R\sigma_b)^2] \quad (22)$$

偏置是比  $R\sigma_b \ll 1$  的均方根误差较小的量值的阶数。

为了说明近似条件的意义, 考虑所示的例子。将 (20) 式用于 (22) 式中, 成比例的均方根误差值是

$$\text{rmse}(\hat{R}/R) = \frac{(320)^{1/2} R\sigma_\epsilon}{V_x T N^{1/2}} \quad (23)$$

假定  $V_{\max} = 15 \text{ kn}$ ,  $\phi = 90^\circ$ , 则  $V_x = 15 \text{ kn}$ 。假定  $T = 10 \text{ min}$ ,  $\tau = 1 \text{ s}$ , 则  $N = 600$ 。假定目标距离  $R = 25 \text{ yd}$  ( $22.86 \text{ m}$ ,  $1 \text{ yd} = 0.9144 \text{ m}$ ) 时, 均方根方位误差是  $1^\circ$ , 于是  $\sigma_\epsilon = 1.7 \times 10^{-2}$  (rad)。依 (23) 式,  $\text{rmse}(\hat{R}/R) = 6.3 \times 10^{-3}$ , 于是  $\hat{R} = 158 \text{ yd}$  ( $144.48 \text{ m}$ )。由于距离远, 当目标速度  $V_T = 10 \text{ kn}$  时其偏置近似为不大于  $200 \text{ yd}$  ( $182.88 \text{ m}$ )。

## 5. 估计目标航向

依信号频谱的特性峰的多普勒漂移精确地估计目标的速度是可能的。假定目标信号频谱至少有一个已知频率的峰, 跟踪器的声纳信号处理有依据多普勒漂移估计速度  $V_T$  的能力。为了依  $\hat{\beta}$  和  $\hat{b}$  估计  $\alpha_T$ , 则假定  $V_T$  已知是合理的。如果  $\sigma_\beta$  和  $\sigma_b$  是小的, 则误差  $\epsilon_\beta = \hat{\beta} - \beta$  及  $\epsilon_b = \hat{b} - b$  也是小的。依据  $\epsilon_\beta$  和  $\epsilon_b$  扩展估计器,  $\hat{\alpha}_T = \sin^{-1}(\hat{R}\hat{\beta}/V_T)$ , 如下所示:

$$\hat{\alpha}_T = \sin^{-1} \left[ \frac{\beta + \varepsilon_\beta}{V_T(-b - \varepsilon_b)} \right] \quad (24)$$

$$= \alpha_T + (\cos \alpha_T)^{-1} R (V_T^{-1} \varepsilon_\beta + \varepsilon_b \sin \alpha_T) + O(\sigma_\beta^2) + O(\sigma_b^2)$$

依(11)式,(12)式,(13)式和(24)式,  $\hat{\alpha}_T$  的均方误差近似为

$$\text{mse} = (\cos \alpha_T)^{-2} R^2 \sigma_\varepsilon^2 D_x^{-1} [V_T^{-2} c_{xx} - 2V_T^{-1} (\sin \alpha_T) c_{ix} + (\sin \alpha_T)^2 c_{ii}] \quad (25)$$

将(19)式和(20)式用于(24)式和(25)式中,有

$$\text{rmse} \hat{\alpha}_T = \frac{(32)^{1/2} R \sigma_\varepsilon}{V_x T N^{1/2} |\cos \alpha_T|} \quad (26)$$

其中

$$r^2 = (V_x/V_T)^2 - 5(V_x/V_T) \sin \alpha_T + 10(\sin \alpha_T)^2 \quad (27)$$

例如,假定  $V_T = 10 \text{ kn}$ ,  $\alpha_T = 45^\circ$  (在旋转坐标系中)。依(26)式,则  $\text{rmse} \hat{\alpha}_T = 2.2^\circ$ 。

对于  $\alpha_T = 60^\circ$  而言,  $\text{rmse} \hat{\alpha}_T = 4.1^\circ$ 。

## 6. 估计目标的坐标

调整原点到  $(\bar{x}_s, \bar{y}_s)$  处。如果方位是无偏的情况,那时关于这个原点的  $x_T(0)$  的好而简单的估计器是  $\hat{R}\bar{s}$ ,  $\bar{s} = N^{-1} \sum_{n=1}^N s_n$ 。如果  $\mu$  不是 0,甚至如果  $\hat{R}$  没有时,则估计的目标坐标将是偏的。因此要假定  $\mu = 0$ 。

为了证明这个估计器是正确的,注意到  $\bar{s}$  是  $a = x_T(0)/R$  (它是  $a$  的最小平方估计器) 的无偏估计器,它的方差是  $\sigma_\varepsilon^2/N$ ,且与  $\hat{\beta}$  和  $\hat{b}$  不相关,因为  $\sum_{n=1}^N (t_n - T/2) = \sum_{n=1}^N x_s(t_n) = 0$ 。由于误差展开式类似于(24)式,则  $\hat{R}\bar{s} - x_T(0)$  的  $\text{rmse}$  值近似如下:

$$\text{rmse}(\hat{R}\bar{s}) = R [N^{-1} \sigma_\varepsilon^2 + x_T^2(0) \sigma_b^2]^{1/2} \quad (28)$$

在旋转坐标系中  $y_T(0)$  的简单估计是  $R$ 。将  $\hat{R}\bar{s}$ ,  $\hat{R}$ ,  $\hat{R}\hat{\beta}$ ,  $V_T \sin \alpha_T$  的估计等联合起来,则在搜索段结束处的坐标用下式估计:

$$\hat{x}_T(T) = \hat{R}\bar{s} + \hat{R}\hat{\beta}T/2 \quad (29)$$

和

$$\hat{y}_T(T) = \hat{R} + V_T (\cos \hat{\alpha}_T) T/2 \quad (30)$$

在反旋转时,常规坐标中的坐标估计如下:

$$\hat{x}_T(T) = \hat{x}_T \cos \bar{B} + \hat{y}_T \sin \bar{B} \quad (31)$$

$$\hat{y}_T(T) = \hat{y}_T \cos \bar{B} - \hat{x}_T \sin \bar{B} \quad (32)$$

这些估计可以通过将其与  $\hat{R} \sin \bar{B}(T)$  和  $\hat{R} \cos \bar{B}(T)$  进行比较来检查,  $\bar{B}(T)$  表示在跟踪段最后几个方位的平均。

## 7. 结 论

依方位测量用来计算单目标的距离、航向和位置的简单统计方法依赖于关键性的假

定,假定目标在取得方位的时间内以常速和定向运动。如果目标到跟踪船的距离是远的,目标在被跟踪段内是运动的且方位是无偏的,则估计是无偏的。但是,如果距离是远的且得到了大量的独立方位,则可由方位的无偏估计得到距离的精确估计。

如果目标以常速和定向运动,则估计  $n$  个目标距离的方法是足够简单的。为了将这个办法用于每个目标,必须开发算法以便当目标跟踪时将目标的方位分类。对于试验所有逻辑能力的计算机而言,在这些方法中所用的计算都是足够简单的。当给出常航向假定时,方位可以分类。

适应的误差为

$$e(t_n) = \hat{s}_n - \bar{s} - \hat{\beta}t_n - \hat{b}x_S(t_n) \quad (33)$$

这个误差可用于抑制错误的分类。例如,  $n$  个大误差  $e(t_n)$  表明由于目标交叉而错误分类的概率。其他的诊断检查是由  $\hat{R}\hat{\beta}$  来提供的,  $\hat{R}\hat{\beta}$  是估计  $V_T \sin \alpha_T$  的。非合理的  $\hat{R}\hat{\beta}$  值表明错误的方位数据组。

多目标跟踪算法的发展超过了本论文的范围。单目标跟踪算法的结果对任何方法的精度提供标准检查程序,这里所指的任何方法是依远距离噪声方位确定距离的方法。

## 8. 说 明

(1) 这个标准的结果是在许多数学统计的文本中给出的。一个好的结果是 Draper 和 Smith 的研究成果。

该方法容易修改,以用于涉及不等方位的误差方差。 $\epsilon_n$  的方差与大量处理器的信噪比 (SNR) 成反比,如平均能量是最大的波束得到的性能那样。信噪比是通过  $\hat{r}/(1-\hat{r})$  来估计的,  $\hat{r}$  是水听器通道间的平均相干。于是,方差的多波束扫描器可以通过在  $t_n$  时计算的  $(1-\hat{r}_n)/\hat{r}_n$  来估计。如果  $\hat{s}_n, t_n$  和  $x_S(t_n)$  对每个  $\tau$  时用  $[\hat{r}_n/(1-\hat{r}_n)]^{1/2}$  来乘,则这些相乘后的变量的最小平方配置获得  $\beta$  和  $b$  的最大似然估计。

(2) 如果  $\hat{R}\hat{\beta}/V_T$  接近 1, 则  $\alpha_T$  应该完成不同的计算。如果统计上比 1 小, 则用下式:

$$\hat{\alpha}_T = \cos^{-1}[1 - (\hat{R}\hat{\beta}/V_T)^2] \quad (34)$$

如果它比 1 大 (但是接近 1), 则让  $\hat{\alpha}_T = \pm 90^\circ$ 。用方位的方向来确定合理的符号。

通常, 这个单个方程的方法估计  $\alpha_T$  或  $\alpha_T = 180^\circ + \alpha_T$ 。这个模糊度是用  $[\hat{B}(t_{n+1}) - \hat{B}(t_n)]$  的平均符号或任何其他方位变化的方向性测量来分辨的。

## 参 考 资 料

- 1 Hinch, M. J. and M. C. Bloom, Statistical approach to passive target tracking. J. Acoust. Soc. Am., 1981, 69 (3):738~743.
- 2 Moose, R. H. F. Vanlandingham and D. H. McCabe. Modeling and estimation for tracking maneuvering targets.

- IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. , 1979, 15: 448~456.
- 3 Hassab, J. C. , B. W. Guimond and S. C. Nardone. Estimation of location and motion parameters of a moving source from a linear array. *J. acoust. Soc. Am.* , 70(4):1054~1081.
  - 4 Hinich H. J. and P. P. Talwar. A simple method for robust regression. *J. Am. Statist. Assoc.* 1975, 70: 113~119.
  - 5 Martin R. D. Robust methods for time series. ed. D. F. Findley, *Applied Time Series Analysis I*. New York: Academic Press, 1981, 683~759.
  - 6 Draper N. R. and H. Smith. *Applied Regression Analysis*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1981.
  - 7 Hinich M. J. Frequency-Wavenumber array processing. *J. Acoust. Soc. Am.* , 1981, 69(3):732~737.

(译自 ADA123506, Public release by NTIS, Jan 1983)

## 第二篇 用于被动声纳信号处理的时间延迟估计

### 1. 摘要

该文对被动声纳信号处理估计技术的研究作了综述。运动的时间延迟估计是声源状况的估计问题。依据对运动声源的位置和速度的估计提出了讨论的问题。就平面内的问题提出了最佳的方位和距离估计器，且涉及到最佳的时间延迟矢量估计器。次最佳实现要与声源运动及接收器定位的不确定度等影响一起考虑。

### 2. 引言

该文的目的是在被动声纳信号处理场中对时间延迟估计提供辅导性的评论。

在被动声纳感兴趣的问题中，两个或比较多的接收传感器或水听器所接收到的信号用于估计被检测声源的位置和速度。被动系统与雷达或主动声纳系统不同，被动系统不能控制断开声源后反射的发射能量的数量。但是，被动系统的隐蔽性在军事和生物学应用中都是有利的。雷达和主动声纳的讨论可以在 Altes 那里找到。实际上，当反复平衡总的系统损耗时，接收传感器的数量、观测时间及传播损耗后背景噪声与声源的信号强度比等决定着被动系统的能力。

在海洋中，声音通常通过一个或较多的路径到达每个全向的接收器。例如，声音可以通过直达路径和表面反射路径到达，如图 1 所示。在水声中由 Oppenhiert 和 Bjørnø 编辑的文章中有可利用的最新的比较完全的讨论。从信号处理的观点出发，为了使问题在数学上容易处理，在多径和平面问题中排除问题是方便的。对于多径信号而言，接收到的信号的采样模型是每个接收器收到的已经衰减的信号脉冲且是由附加的不相关噪声畸变的延迟信号。对于平面的问题而言（当所有的接收器和声源在同一个平面上时），

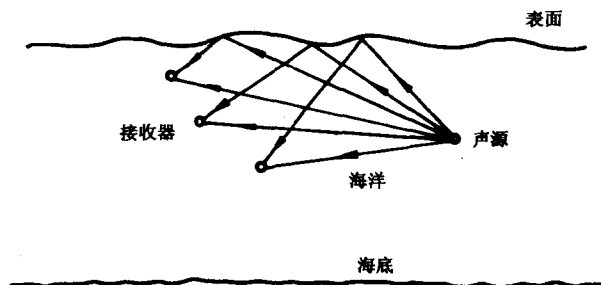


图 1 在 3 个传感器处接收到的直达和表面反射声线路径的模型



估计的时间延迟是一对接收器间声波波前的行走时间，以至可以估计出声源的位置和速度。使用的信号处理的类型及使用这样的处理在性能方面的限制是本文的重要课题。

### 3. 数学模型

鉴于该文的目的是，将仅考虑平面上的问题。特别是，将假定所有的接收器和声源在同一个平面内，且声能仅通过一个路径到达接收器。

就图示而言，我们感兴趣的是信号由一个接收传感器到下一个接收传感器的延迟，如图2所示。对于相对的时间延迟为0的情况而言，声源方位在一对传感器的侧面正横处。对于最大的时间延迟而言，声源方位在一对传感器的端射处。在将结果直接应用于“现实世界”的问题中时必须谨慎，因为与这个简单的模型相比海洋介质是比较复杂的。较好的球面波传播模型和联合的信号处理是由Owsley考虑的。但是，合理的见解是在用简单的排除方法进行被动方位估计时得到的。

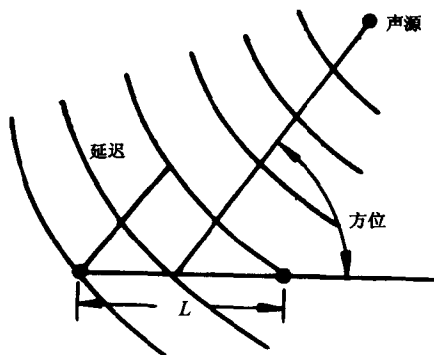


图2 间隔为  $L$  的两个接收器的平面波模型

在平面的情况中，对于接收信号而言，其简单的数学模型是

$$\begin{cases} r_1(t) = s(t) + n_1(t) & (1a) \\ r_2(t) = s(t - D) + n_2(t) & (1b) \end{cases}$$

式中声源信号  $s(t)$ 、噪声  $n_1(t)$  和  $n_2(t)$  为高斯型，统计上互不相关。在信号被检测到后，重要的被动声纳问题就是在两个间隔为  $L$  的传感器间估计时间延迟  $D$ 。那时，时间延迟估计被用于估计方位角，如图2所示。由以下的近似法给出方位估计：

$$\hat{B} \approx \cos^{-1}(c\hat{D}/L) \quad (2)$$

式中： $c$ （没有频率变量）——水中的声速；

$\hat{B}$ ——方位估计；

$\hat{D}$ ——时间延迟估计。

可以表明  $B$  是“位置线”的双曲线与接收器轴的夹角，因此，近似的(2)式因到声源的距离增加而越来越精确。

### 4. 用于时间延迟估计的系统图形

被动方位估计问题的判据部分是时间延迟的精确估计。两个构想的图形以如下二者之一为基础，即：①直观法及熟悉的检测理论；②精确的方法。对于自噪声中的白化信号而言应用最大似然（ML）方法。在这两个构想的图形中，我们企图通过大量的假设