

双子阵被动跟踪系统

黄清

(东南大学无线电工程系, 南京 210096)

摘要: 文章介绍一种用于水下机动目标测量的双子阵被动跟踪系统, 介绍了双子阵定位原理和系统构成, 提出了广义相关时延估计方法、时延值滤波方法和卡尔曼弹道滤波器, 该系统能方便地进行水面或水下机动目标的跟踪测量。

关键词: 被动跟踪; 时延估计; 卡尔曼弹道滤波器

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

Passive tracking system using double-arrays for maneuvering object

HUANG Qing

(The Radio Engineering Department of Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: There are many difficulties in passive tracking of maneuvering object. In this paper, passive tracking system using double-arrays for maneuvering object is introduced, key technology is studied, the presented delay estimator, delays filter and Kalman trajectory filter are successfully applied to this system. It is easy to use this system for tracking maneuvering objects in water.

Key words: passive tracking; delay estimation; Kalman trajectory filter

1 引言

由于水下目标的严重威胁性, 水下目标的被动探测, 一直是水声界热衷的课题。基于三元直线阵测距原理, 法国的 DUUX-5 是一个典型代表作, 国内也有研制产品, 基阵孔径约有 30m~40m, 测距精度在 10km 范围为 5%~10%。90 年代初, 法国在某海湾建造了 1 个二维机动目标测量系统, 该系统由布放在同一深度的 3 个水听器对组成, 水听器对的水听器间距为 100m。俄罗斯研制了 1 套机动目标被动测量系统, 该系统由 3 个以上水听器浮标构成, 水听器接收信号并通过无线电发回, 水听器位置通过 GPS 测量。据介绍, 该系统测量范围为 5km, 测距误差小于 10%。进入 90 年代, 声场匹配技术的发展, 提出了全新的被动测距理论, 使水下目标的远距离被动测量成为可能, 水声界为此振奋。

对于水下机动目标的被动跟踪测量, 一般不要 求很远的测距范围, 但要求很高的测距精度。其系 统构成, 仍可基于三元直线阵测距原理。由于目标 的机动性限制了系统观察时间, 因此, 机动目标的被 动测距比一般声响目标测距要难得多。短基线测量

阵具有造价低、使用方便的特点, 但给系统时延估计 精度提出了更高的要求。本文介绍用于水下机动目 标被动跟踪的双子阵被动跟踪系统的原理和设计, 该系统特别适用于一般测量船携带, 作为水下目标 的活动式被动跟踪系统。

2 系统原理

系统的水下基阵结构如图 1 所示。基阵由 5 个 接收换能器 $H_1 \sim H_5$ 构成, 水平孔径为 L_1 , 垂直孔 径为 L_2 , 5 个接收换能器 $H_1 \sim H_5$ 安装在刚性结构 上, H_1, H_2, H_3 构成水平三元直线阵, 实现对目标距 离方位角的测量; H_2, H_4, H_5 构成垂直三元直线阵, 实现对目标距离和仰角的测量, 水平三元阵和垂直 三元阵构成系统的 两个测量子阵。

设水平三元阵 测量得到的目标相 对斜距为 R_2 , 方位 角为 α_2 , 垂直三元 阵测量得到的目标 相对斜距为 R_4 , 仰 角为 α_4 , 目标相对于阵中心(H_2 阵元)的水平方位 角为 α_H , 仰角为 α , 水平子阵测量得到的目标相对于 阵中心的水平距离为 R_H , 垂直子阵测量得到的目

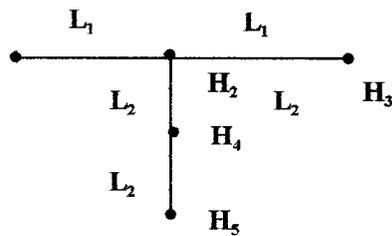


图 1 水下基阵几何结构图

收稿日期: 2000-07-15; 修订日期: 2000-11-21
作者简介: 黄清(1962-), 男, 江苏江阴人, 教授, 从事现代信号处理及 应用研究。

标相对于阵中心的水平距离为 R_v ,

设各水听器间的时延测量值为 t_{12} 、 t_{23} 、 t_{24} 、 t_{45} , 则:

$$R_2 = \frac{L_1^2 \cos^2 \alpha_2}{c (t_{12} - t_{23})}, \quad \alpha_2 = \sin^{-1} \left[\frac{c (t_{12} + t_{23})}{2 L_1} \right] \quad (1)$$

$$R_4 = \frac{L_2^2 \cos^2 \alpha_4}{c (t_{24} - t_{45})}, \quad \alpha_4 = \sin^{-1} \left[\frac{c (t_{24} + t_{45})}{2 L_2} \right] \quad (2)$$

式中 c 为声速, 因此, 相对于阵中心的水平距离为, $R_H = R_2 \cos(\alpha_2)$, $R_v = R_4 \cos(\alpha_4)$, 根据方差加权原理计算目标斜距 R :

$$R = \frac{R_v / \frac{2}{v} + R_H / \frac{2}{H}}{1 / \frac{2}{v} + 1 / \frac{2}{H}} \quad (3)$$

$$v = \sqrt{2} c D \left(\frac{R}{L_2 \cos \alpha_4} \right)^2 \left(\frac{1}{\cos \alpha_4} \right) \quad (4)$$

$$H = \sqrt{2} c D \left(\frac{R}{L_1 \cos \alpha_2} \right)^2 \left(\frac{1}{\cos \alpha_2} \right) \quad (5)$$

因此, 目标斜距 R 可用下式表示:

$$R = \frac{R_2 + q^4 R_4}{1 + q^4} \quad (6)$$

式中:

$$q = \frac{L_2 \cos \alpha_4}{L_1 \cos \alpha_2}, \quad = \sin^{-1} \left[\frac{\sin \alpha_2}{\cos \alpha_4} \right], \quad = \cos^{-1} \left[\frac{R_4 \cos \alpha_4}{R_2} \right] \quad (7)$$

目标斜距测量方差 σ_R 用下式计算:

$$\sigma_R = \sqrt{2} c D \left(\frac{R}{L_1 \cos \alpha_2} \right)^2 \left(\frac{1}{\cos \alpha_2} \right) \quad (8)$$

式中, $\sigma = \sqrt{1 + q^4}$

当目标位于水平阵端射方向($\alpha_2 = 90^\circ$)时, 水平阵测距方差 σ_H 为无穷大, 由于垂直阵的作用, 使系统测距方差最大为 σ_v 。可见, 采用双子阵原理, 系统能实现目标全方位有效测量。

3 系统构成

双子阵被动跟踪系统构成如图 2 所示, 水平阵接收信号经时延估计得到时延值 t_{12} 、 t_{23} , 时延值经时延值滤波后, 由卡尔曼滤波器得到目标斜距 R_2 和方位角 α_2 。垂直阵接收信号经时延估计得到时延值 t_{24} 、 t_{45} , 时延值滤波后, 由卡尔曼滤波器得到目标斜距 R_4 和仰角 α_4 , 按双子阵定位算法得到目标距离 R 和方位角 ϕ 。

4 时延估计方法

时延估计采用 HT/ML 广义相关法, 时延估计声学技术

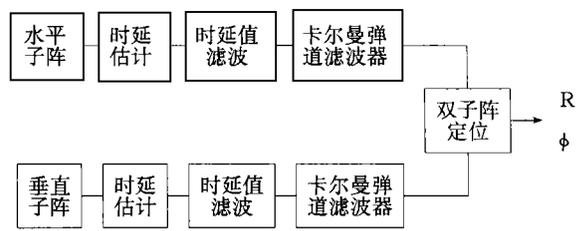


图 2 双子阵被动跟踪系统构成框图

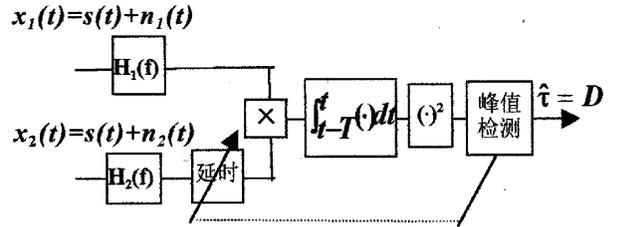


图 3 广义相关时延估计框图

框图如图 3 所示。 $H_1(f)$ 、 $H_2(f)$ 为通道加权函数, 相关处理加权函数 $W(f) = H_1(f) H_2(f)$ 。

HT/ML 相关处理器的加权函数为:

$$W_{HT}(f) = \frac{1}{|P_{12}(f)|} \frac{12(f)}{[1 - 12(f)]} \quad (9)$$

每个测量周期实时估计互功率谱 $P_{12}(f)$ 和相干函数 $(MSC)^{12}(f)$, 代入上式得到相关加权函数估计。由于实时统计加权函数, 使时延估计器能自适应源信号谱结构的变化和接收信噪比的变化, 具有稳健的时延估计性能。

时延估计输出往往存在野值, 同时由于观察时间的限制, 时延值存在相应的起伏, 因此, 时延值滤波的目的就是剔除时延野值, 同时提高时延估计精度。采用 MT 型时延值滤波器, 对数据加滑动窗, 进行非线性滤波, 得到稳健的滤波效果。

5 卡尔曼弹道滤波器

对于三元直线阵, 测量数据为时延值 t_{12} 、 t_{23} , 目标变量为斜距 R 、方位角 ϕ , 通常方位角测量误差要比斜距测量误差小得多, 方位角数据经过平滑滤波后的结果, 就可作为斜距滤波器的准确输入。所以, 卡尔曼弹道滤波器由方位角滤波环和斜距状态滤波器组成, 设测量值为 $c (t_{12} - t_{23})$, 则测量方程为, $h = A/R$

$$\text{式中, } A = [L \cos(\alpha_i)]^2 = L^2 [1 - \sin^2(\alpha_i)] \quad (10)$$

$$\sin(\alpha_i) = \frac{c [t_{12}(i) + t_{23}(i)]}{2 L} \quad (11)$$

设状态变量为 $X(k) = [R(k) \phi(k) R(k)]^T$, 根据广义卡尔曼滤波器原理, 测量矩阵 $H(k)$ 为:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H}(k) &= \begin{bmatrix} \frac{h}{R} & \left|_{R=R(k+1/k)} & 0 & 0 \right. \\ -\frac{A}{R^2(k+1/k)} & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{h}{R} & \left|_{R=R(k+1/k)} & 0 & 0 \right. \\ -\frac{A}{R^2(k+1/k)} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)
 \end{aligned}$$

卡尔曼滤波器测量方程为:

$$z(k) = \mathbf{H}(k) X(k) + V(k) \quad (13)$$

采用机动目标当前统计模型^[1], 建立机动目标

卡尔曼弹道滤波器状态方程,

$$\begin{aligned}
 X(k+1) &= \mathbf{A}(k+1/k) X(k) + \\
 &\quad \mathbf{u}(k) \quad \mathbf{a}(k) + \mathbf{W}(k) \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\text{式中: } \mathbf{A}(k+1/k) = \begin{bmatrix} 1 & T & (-1 + T + e^{-T})/2 \\ 0 & 1 & (1 - e^{-T})/T \\ 0 & 0 & e^{-T} \end{bmatrix} \quad (15)$$

为机动系数, T 为系统测量周期,

$$\mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} -T + \frac{T^2}{2} + \frac{1 - e^{-T}}{T} \\ T - \frac{1 - e^{-T}}{T} \\ 1 - e^{-T} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$\mathbf{a}(k)$ 为当前加速度估计, $\mathbf{a}(k) = E[R(k)]/N$

状态变量预测值 $X[k/(k-1)]$ 为:

$$X[k/(k-1)] = \mathbf{A}[k/(k-1)] X(k-1) + \mathbf{u}(k) \quad (17)$$

状态变量滤波值 $X(k)$ 为:

$$X(k) = X[k/(k-1)] + \mathbf{K}(k) y(k) \quad (18)$$

滤波器增益为:

$$\mathbf{K}(k) = \frac{P[k/(k-1)]\mathbf{H}^T(k)}{\mathbf{H}P[k/(k-1)]\mathbf{H}^T(k) + R(k)} \quad (19)$$

状态方差预测值为:

$$P[k/(k-1)] = \mathbf{A}P(k-1)\mathbf{A}^T + Q(k-1) \quad (20)$$

状态方差为:

$$P(k) = [I - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}]P[k/(k-1)] \quad (21)$$

式中, $R(k) = \text{Cov}[V(k)]$, $Q(k) = \text{Cov}[u(k)]$,

$$y(k) = Z(k) - \mathbf{H} X[k/(k-1)] \quad (22)$$

对滤波器残差序列进行非线性处理, 对滤波器增益

进行双重加权, 得到卡尔曼增益修正量 为:

$$= \frac{\gamma(k)}{6 \text{ median}[|y(k)|]_N} \quad (23)$$

$$= \begin{cases} (1-\gamma)^2 & \gamma < 1 \\ 0 & \gamma > 1 \end{cases} \quad (24)$$

稳健因子 的引入, 有效地剔除测量野值的影响。

6 系统试验结果

该系统能方便地进行船舷布放, 系统对水面机动目标和水下机动目标进行了跟踪试验, 结果如图 4 和图 5 所示。

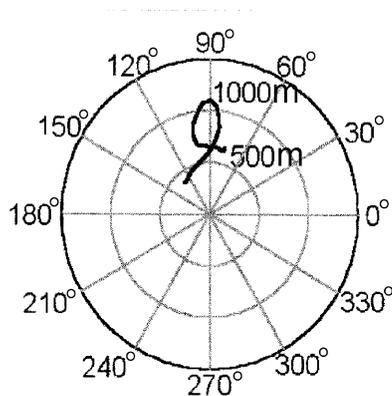


图 4 水面目标回旋机动跟踪结果

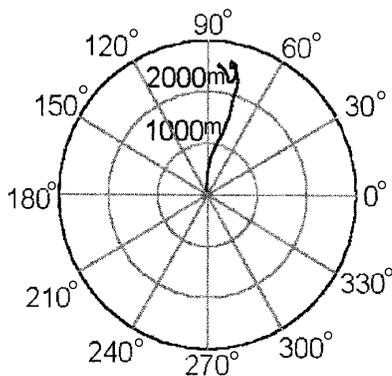


图 5 水下机动目标跟踪结果

参考文献

- [1] 周宏仁等. 机动目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991. 134-145.