

基于方位/多径时延的水下目标运动参数估计

姚海涛, 陈韶华

(中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要 讨论了基于方位角、俯仰角及多径时延 TMA 的水下目标运动参数估计方法。采用声基阵测量水下运动目标相对于观测平台的方位角、俯仰角, 并测量水下目标的一次水面反射相对于直达波的多径时延差, 根据水下目标方位角、俯仰角与多径时延差的变化, 通过目标运动分析 (TMA) 方法预测目标的航迹、航速及航向, 为攻击水下目标提供决策信息。计算机仿真验证了方法的可行性。

关键词 多径时延 TMA; 水下目标; 运动参数估计

中图分类号 TB566 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2020)06-0504-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.06.010

Estimation of Underwater Target Motion Parameters Based on Bearing/Multipath Time Delay

YAO Haitao, CHEN Shaohua

(No. 710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

Abstract The estimation of underwater target motion parameters with bearing, pitch and multipath time delay target motion analysis is studied in this paper. Firstly, the bearing and pitch of underwater moving target relative to observation platform is detected by acoustic array, and the multipath time delay of the surface reflection relative to the direct wave is measured. Secondly, the target motion analysis (TMA) method is adopted to predict the target's track, speed and heading based on the bearing, pitch and multipath time delay variation of the underwater moving target. Finally, it provides decision information for attacking underwater moving target. The feasibility of this method has been verified by computer simulation.

Key words multipath time delay target motion analysis; underwater target; estimation of motion parameters

0 引言

水下被动定位是被动声呐的一项关键技术, 一直是水声界关注的热点之一。水下无人观测平台对水下非合作目标运动参数的估计主要包括目标航速、航向、距离等参数的估计。这些运动参数的估计对于水下非合作目标的运动态势监测和打击有重要意义。

目标运动分析 (Target Motion Analysis, TMA)

通常是指在已知目标方位及其他测量值 (如多普勒频率、到达时延差等) 条件下, 对目标运动要素 (位置、速度、航向等) 进行估计, 是对水下非合作目标定位跟踪的一种重要方法。利用水下非合作目标辐射噪声来定位时, 主要有纯方位 TMA^[1]、方位/频率 TMA^[2-4]、时空累积 TMA 等方法。

在水下被动 TMA 中, 研究最多应用最广泛的是纯方位 TMA, 即只利用目标的方位信息来估计运动参数, 主要是因为方位测量容易得到, 且不易

受到干扰,但观测器本身必须执行一定的机动。因此,在纯方位的基础上增加其他被动测量信息,以改善目标运动分析问题的求解,成为了被动 TMA 分析的主要研究方向和热点。

水下固定或匀速直线运动平台估计水面目标的运动参数时,由于平台与目标的相对深度已知,通过测量目标的方位角与俯仰角可以实现运动参数估计^[5]。对于水下目标,由于深度未知,需要增加观测量如水面多径反射时延差^[6]才能实现参数估计。针对测量平台空间有限条件下的近场目标运动分析问题,基于浅海射线声学多途结构的单水听器水下目标运动分析方法,有学者进行了相应的研究^[7]。文献[8]采用 LMS 自适应时延估计算法,对基于方位时延的扩展卡尔曼滤波算法估算水下目标运动状态信息进行了理论探索与试验验证。

本文研究了基于方位/多径时延 TMA 的水下目标运动参数估计方法。水下无人观测平台的声基阵接收水下目标辐射噪声,通过检测其方位角、俯仰角以及多径时延差的变化,采用 TMA 方法估计水下目标的航速、航向、距离和通过正横时刻,并对该估计方法进行了理论分析与仿真验证。

1 水下目标运动参数估计

通过对水下无人观测平台上声基阵获得的目标辐射噪声进行倒谱分析,得出水下目标辐射噪声经水面一次反射到达声基阵的反射波与直达声基阵的直达波之间的多径时延差序列 $\hat{\tau}(n)$ 。结合声基阵测量水下目标从观测平台附近经过时的方位角及俯仰角序列 $\hat{\phi}(n)$ 、 $\hat{\theta}(n)$,采用 TMA 方法估计目标的航速、航向与位置参数。

1.1 目标观测模型

假设水下目标(☆表示)在水面以下一定深度 z 上,从声基阵上方附近由远及近,然后由近及远以均匀速度直航通过,以声基阵为 XOY 平面中心建立坐标系,观测平台坐标为 $(0, 0, z_0)$, z_0 为基阵深度,目标运动态势如图 1 所示。

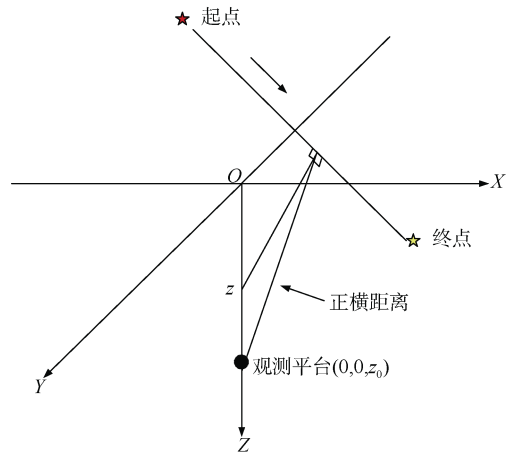


图 1 目标运动态势

Fig. 1 Target motion situation

假设目标匀速直线运动,但受到一些随机扰动,其 2 个速度分量的实时变化表示为

$$v_x(n) = v_x(n-1) + u_x(n) \tag{1}$$

$$v_y(n) = v_y(n-1) + u_y(n)$$

其中: $u_x(n)$ 与 $u_y(n)$ 表示与速度独立,且相互独立的噪声扰动,服从零均值高斯分布 $\mathcal{N}(0, \sigma_u^2)$; v_x 与 v_y 在本节表示目标航速。

目标的位置变化表示为

$$\begin{aligned} x(n) &= x(n-1) + v_x(n-1)T \\ y(n) &= y(n-1) + v_y(n-1)T \end{aligned} \tag{2}$$

$$z(n) = z(n-1)$$

式中, T 为采样间隔。

目标运动分析需建立状态方程与测量方程。状态方程表示此刻状态与前一时刻状态之间的关系,状态是待估计的目标参数。测量方程表示测量量与状态量之间的关系,测量量是我们已知的或能观测到的,是状态量的函数。

联立式(1)和式(2),待估计的目标速度与位置写成状态方程,有:

$$\begin{bmatrix} x(n) \\ y(n) \\ z(n) \\ v_x(n) \\ v_y(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(n-1) \\ y(n-1) \\ z(n-1) \\ v_x(n-1) \\ v_y(n-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_x(n) \\ u_y(n) \end{bmatrix} \tag{3}$$

简写为

$$s(n) = As(n-1) + u(n) \quad (4)$$

观测点对目标方位角、俯仰角与水面一次多径时延差的测量量, 根据文献[4]第 7.3 节和第 8.1 节推导, 由下式得到:

$$\begin{bmatrix} c\tau(n) \\ \varphi(n) \\ \theta(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2z_0 z(n)}{\sqrt{x^2(n) + y^2(n) + (z(n) - z_0)^2}} \\ \tan^{-1}\left(\frac{y(n)}{x(n)}\right) \\ \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{x^2(n) + y^2(n)}}{h}\right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1(n) \\ w_2(n) \\ w_3(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, 测量噪声 $w_1(n)$ 、 $w_2(n)$ 、 $w_3(n)$ 分别体现了水面一次反射多径声程测量误差 (由水面一次反射多径

$$\frac{\partial h}{\partial s} = \begin{bmatrix} \frac{-2z_0 z x}{(x^2 + y^2 + (z_0 - z)^2)^{3/2}} & \frac{-2z_0 z y}{(x^2 + y^2 + (z_0 - z)^2)^{3/2}} & \frac{2z_0(x^2 + y^2 + z_0^2 - z_0 z)}{(x^2 + y^2 + (z_0 - z)^2)^{3/2}} & 0 & 0 \\ -\frac{y}{x^2 + y^2} & \frac{x}{x^2 + y^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{(z_0 - z)x}{(x^2 + y^2 + (z_0 - z)^2)\sqrt{x^2 + y^2}} & \frac{(z_0 - z)y}{(x^2 + y^2 + (z_0 - z)^2)\sqrt{x^2 + y^2}} & \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{(x^2 + y^2 + (z_0 - z)^2)} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

为了表达方便, 上式 x 、 y 、 z 后的序号 n 省略。

1.2 扩展 Kalman 滤波器对目标的跟踪

从状态方程 (3) 和测量方程 (4) 可以看出, 状态方程线性, 测量方程非线性, 因此这是一个非线性状态估计问题。卡尔曼滤波只适用于线性问题, 因此, 需要采用扩展卡尔曼滤波 (Extended Kalman Filter, EKF) 算法来解决该非线性状态估计问题, 将测量方程用响应的 Jacobian 矩阵来近似代替, 可得 EKF 算法公式系如下。

1) 预测。

$$\hat{s}(n|n-1) = A\hat{s}(n-1|n-1) \quad (9)$$

2) 最小预测 MSE 矩阵。

$$M(n|n-1) = AM(n-1|n-1)A^T + Q \quad (10)$$

3) Kalman 增益矩阵。

$$K(n) = M(n|n-1)H^T(n)$$

$$(C + H(n)M(n|n-1)H^T(n))^{-1} \quad (11)$$

时延差与声速常量相乘得到)、方角位测量误差以及俯仰角测量误差, 它们均服从零均值高斯分布 $\mathcal{N}(0, \sigma_w^2)$, 且与 $x(n)$ 、 $y(n)$ 、 $z(n)$ 、 $v_x(n)$ 、 $v_y(n)$ 独立。为处理方便, 也假设噪声相互独立。 h 为水下运动目标与观测平台之间沿水域深度方向的垂直距离。

上式简写为测量方程如下:

$$\theta(n) = h(s(n)) + w(n) \quad (6)$$

可以看出观测与状态量之间是非线性关系, 因此应采用扩展卡尔曼滤波器 (EKF) 估计目标运动参数。对 $h(s(n))$ 进行一阶泰勒级数展开, 得到观测矩阵:

$$H(n) = \left. \frac{\partial h}{\partial s(n)} \right|_{s(n)=\hat{s}(n|n-1)} \quad (7)$$

式中, 雅可比 (Jacobian) 矩阵, 即观测矩阵为

4) 修正。

$$\hat{s}(n|n) = \hat{s}(n|n-1) + K(n)(\theta(n) - h(\hat{s}(n|n-1))) \quad (12)$$

5) 最小 MSE 矩阵。

$$M(n|n) = (I - K(n)H(n))M(n|n-1) \quad (13)$$

其中, 状态转移矩阵 A 由式 (12) 定义, 其它参数定义如下给出。

状态噪声与观测噪声协方差矩阵分别表示为

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_u^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_u^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_u^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_w^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_w^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_w^2 \end{bmatrix}$$

观察扩展 Kalman 滤波器方程, 还需要状态变

量 $\hat{s}(n)$ 与最小预测 MSE 矩阵 $M(n)$ 的初始化。

观测数据 $\theta(n)$ 根据运动模型来估计, 作为测量值输入。初值的设置包括噪声方差 σ_u^2 、 σ_w^2 及采样间隔 T 对跟踪性能都有很大影响, 需要多次仿真与优化。

经过扩展 Kalman 滤波, 估计出目标位置与速度参数 $x(n), y(n), z(n), v_x(n), v_y(n)$, 可以得到目标 XOY 平面的航迹方程:

$$y = kx + y_0 \quad (15)$$

式中: $k = v_y / v_x$ 是直线斜率; y_0 通过把目标位置 $x(n), y(n)$ 代入上述方程求得。

目标正横位置是上述方程与其垂线方程 $y = -x/k$ 的交点。于是可预测出水下目标过正横时刻和正横距离。如果正横距离小于观测平台打击控制半径, 在水下目标接近正横位置时刻, 控制观测平台战斗部起爆。

2 计算机仿真

依据上述 1.1 节观测模型, 对目标相对于观测平台由远及近, 再由近及远经过观测平台正横位置的运动态势进行计算机仿真模拟。设水下目标在坐标系中的初始位置为 $(-1\ 000, -1\ 700, 100)$, 航速为 7.2 kn, 航向 56.3° , 从深度为 180 m 的水下无人观测平台上方附近通过, 水下目标的终点坐标为 $(1\ 000, 1\ 300, 100)$ 。平台观测时间步长为 0.5 s。根据设定条件, 可以计算出目标距离观测平台的正横距离 137.3 m。

水下无人平台声探测系统测量了目标的方位角、俯仰角以及水面一次反射多径时延差, 结合目前实际工程水平, 并考虑噪声的影响, 给方位角与俯仰角增加了约 0.57° 的均方误差, 水面一次反射多径时延差增加了 0.001 s 的均方误差, 图 2-3 分别示意了平台观测的目标一次水面反射多径时延差、方位角及俯仰角序列。

针对以上仿真条件, 采用上述扩展 Kalman 滤波方法, 根据非线性测量方程来求解目标运动参数, 得到仿真结果, 如图 4-7。

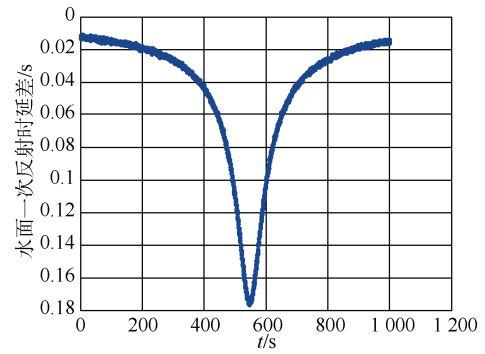


图 2 仿真的目标一次水面反射多径时延
Fig. 2 Multipath time delay of a surface reflection of simulated target

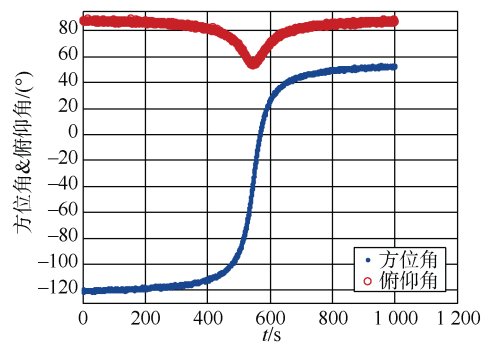


图 3 仿真的目标方位角及俯仰角
Fig. 3 Bearing and pitch of simulated target

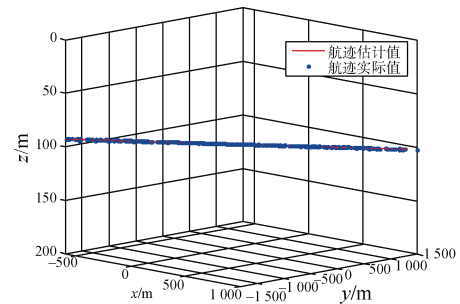


图 4 目标航迹估计
Fig. 4 Estimation of target trajectory

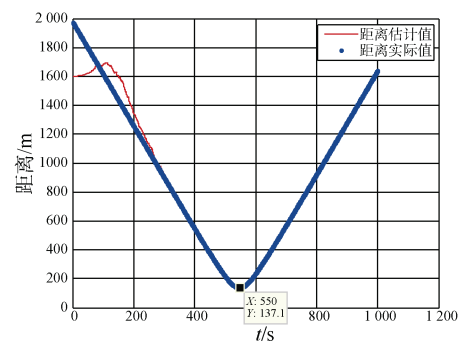


图 5 目标距离估计
Fig. 5 Estimation of target distance

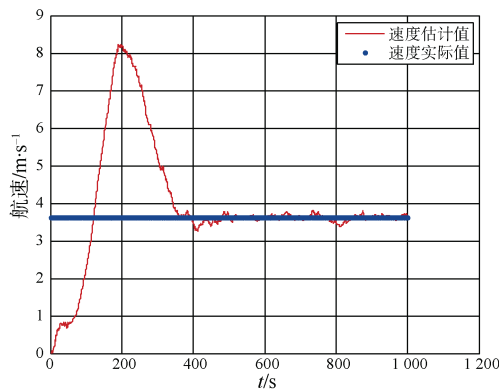


图6 目标航速估计

Fig. 6 Estimation of target velocity

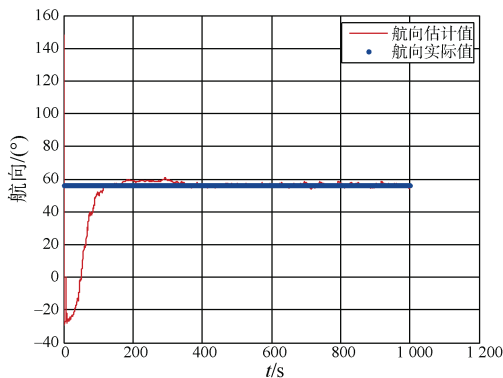


图7 目标航向估计

Fig. 7 Estimation of target heading

图 4-7 是采用扩展 Kalman 滤波器估计的目标航迹、距离、航速及航向序列。图 4 目标航迹估计值与实际值吻合度较高。图 5 目标距离估计序列反应出，目标在约 550 s 时通过水下观测平台的正横位置，正横距离估计为 137.1 m。通过图 6 和图 7 可以看出，航向估计结果向 56.3° 收敛，并在该值附近震荡，航速估计结果也收敛在 3.6 m/s 附近，与实际值误差较小，且扩展 Kalman 滤波算法在约 400 s 的时间内收敛。可以看出，在目标实际过正横位置前，水下观测平台

以被动方式测量的目标的方位角、俯仰角及多径时延信息，通过方位/多径时延 TMA 分析方法，可以以较快的收敛速度得到目标的航迹、航速及航向等信息。

3 结束语

本文讨论了水下无人观测平台声基阵对水下非合作目标辐射噪声的方位、俯仰及多径时延差的测量，采用方位/多径时延 TMA 预测水下非合作目标正横距离，从而实现对水下非合作目标的运动态势监测和打击控制。计算机仿真验证了该方法的可行性。在工程实践中，还应考虑水下观测平台噪声对水下目标辐射噪声检测的干扰。

参考文献

- [1] 杜选民, 姚蓝. 多基阵联合的无源纯方位目标运动分析研究[J]. 声学学报, 1999, 24 (6): 604-610.
- [2] 胡友峰, 孙进才, 朱维杰. 基于方位频率测量的水下被动目标运动分析及其特性研究[J]. 西北工业大学学报, 2001, 19 (4): 537-542.
- [3] 刘健, 刘忠, 玄兆林. 基于方位/频率测量的水下被动目标运动分析算法[J]. 舰船科学技术, 2006, 28(3): 66-69.
- [4] 刘圣松, 陈韶华, 陈川. 一种水下静止平台对目标运动参数的联合估计方法[J]. 兵工学报, 2016, 37(4): 684-689.
- [5] 陈韶华. 水下自主声探测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- [6] 孙华, 陈韶华, 龙小民. 基于多径时延估计的单水听器被动定位[J]. 水雷战与舰船防护, 2016, 24 (1): 11-13.
- [7] 王燕, 邹男, 付进, 等. 基于同态滤波技术的水下目标运动参数估计[J]. 兵工学报, 2014, 35 (7): 1045-1051.
- [8] 贺建彬, 李振山, 金同玖. 一种水中目标深度估计和运动状态跟踪方法[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(1): 57-61.

(责任编辑: 曹晓霖)