

基于过程编码的水下多目标交叉跟踪技术

徐雅南, 喻 聪, 张 铮

(杭州应用声学研究所, 浙江 杭州 310012)

✉xuyan20009@126.com; 316342568@qq.com; zhzh0424@163.com



摘 要: 随着声呐设备探测能力的大幅提升, 声呐作用距离内可跟踪目标数不断增多, 多目标交叉跟踪研究受到了学者们的广泛关注。传统目标方位角预测跟踪和多假设跟踪的解析过程较为复杂, 交叉前手动预置跟踪对操作员要求苛刻。针对该问题, 提出了一种基于过程编码的多目标交叉跟踪技术, 实现水下多目标交叉状态自动判别, 与现有的一些方法相比, 该方法物理实现简单, 跟踪稳健, 交叉成功率相比交叉前手动预置跟踪提高不小于50%, 适合工程应用。

关键词: 水下多目标; 交叉跟踪; 卡尔曼滤波; 互谱法

中图分类号: TP391.7 **文献标识码:** A

Research on Underwater Multi-target Intersecting Tracking Technique based on Process Coding

XU Yanan, YU Cong, ZHANG Zheng

(Hangzhou Applied Acoustic Research Institute, Hangzhou 310012, China)

✉xuyan20009@126.com; 316342568@qq.com; zhzh0424@163.com

Abstract: With the great improvement of sonar detection performance, the number of traceable targets within the range of sonar is increasing. The study of Multi-target intersecting tracking has attracted extensive attention from scholars. Traditional algorithm such as azimuth prediction or multiple hypothesis tracking is complex, and manual preset tracking before intersecting is demanding. To solve this problem, a multi-target intersecting tracking technology based on process coding is proposed to realize the automatic identification of underwater multi-target intersecting states. Compared with some existing methods, this proposed method is simple in physical implementation, stable in tracking, and has a higher intersecting success rate. It is at least 50% higher than that of the manual preset tracking before intersecting. This method is suitable for engineering applications.

Keywords: underwater multi-target; intersecting tracking; Kalman filtering; Cross Spectral Method

1 引言(Introduction)

随着新型声呐装备探测性能提高带来的有效作用距离内观察目标数量成倍增加, 水下多目标交叉跟踪研究受到了学者们的广泛关注。传统目标方位角预测跟踪^[1,2]和多假设跟踪^[3]的解析过程较为复杂, 交叉前手动预置跟踪对操作员要求苛刻。基于上述考虑, 本文提出一种基于过程编码的多目标自动交叉跟踪方法, 该技术结合了过程编码和卡尔曼互谱跟踪技术^[4,5], 实现水下多目标交叉状态自动判别, 与现有一些方法相比, 该方法物理实现简单, 跟踪稳健, 适合工程应用。

2 理论基础(Theoretical basis)

2.1 互谱精确定向

众所周知, 对阵信号处理, 分裂波束能提供近于最优的定向精度。对于数字声呐, 总是先用多波束系统进行大致的定向, 然后再用分裂波束的方法进行精测。图1给出了分裂波束系统产生左、右两路信号的原理。其中, $l(t)$ 、 $r(t)$ 分别表示左、右波束。在一般情况下, 应当先计算左、右波束的等效声中心, 假想在这两个声中心放置接收基元, 然后利用左、右波束计算等效声中心的相位差 $\Delta\varphi$ (对实际入射方向为

θ 的信号做预成 θ_0 方向补偿), 从而获得多波束定向方位 θ_0 与实际入射角 θ 的偏离角 $\Delta\theta$ 。

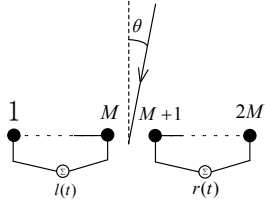


图1 分裂波束阵系统框图

Fig.1 Block diagram of split-beam system

均匀线阵互谱定向公式^[6,7]:

$$\Delta\theta \approx \Delta\tau \cdot c / (M d \cos\theta_0) \quad (1)$$

其中, d 为均匀线阵的基元间隔, 阵元数为 $2M$ 。

圆弧阵互谱定向公式^[6,7]:

$$\Delta\theta = \frac{\pi M c \Delta\tau}{2 r_0 N_0 [\sin(\frac{M}{2} a_0)]^2} \quad (2)$$

其中, M 为圆弧阵参与左/右分裂波束计算的阵元数, a_0 为相邻基元的夹角($a_0 = 2\pi / N_0$), r_0 为圆阵半径。

2.2 卡尔曼滤波

首先建立目标的状态模型和观测模型^[8]:

$$\mathbf{x}_i = [\theta_i(t) \quad \dot{\theta}_i(t)]^T \quad (3)$$

其中, i 表示目标号, $\theta_i(k)$ 表示第 i 号目标在 t 时刻输出的方位, $\dot{\theta}_i(t)$ 为 $\theta_i(t)$ 的导数, 则目标的状态方程可写为:

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{w}_i(t) \quad (4)$$

$$\mathbf{Q}_i(t) = \text{Cov}(\mathbf{w}_i(t)) = \begin{bmatrix} T^4 \sigma_i^2 / 3 & T^3 \sigma_i^2 / 2 \\ T^3 \sigma_i^2 / 2 & T^2 \sigma_i^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, T 为跟踪处理节拍, $\mathbf{w}_i(t)$ 为模型噪声矢量, 具有协方差矩阵 $\mathbf{Q}_i(t)$, σ_i^2 为 i 目标方位角加速度的方差。

目标的观测方程为:

$$\begin{cases} z_i(t) = [1 \quad 0] \mathbf{x}_i(t) + v_i(t) \\ r_i(t) = \text{Cov}(v_i(t)) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $v_i(t)$ 为观测噪声, 具有协方差 $r_i(k)$ 。向量初始状态:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_i(0/0) &= [\theta_i(0) \quad 0]^T \\ \mathbf{P}_i(0/0) &= \text{diag}(r_i(0), T^2 \sigma_i^2) \end{aligned} \quad (7)$$

从而, 根据目标状态向量的初始估计及其协方差实现离散卡尔曼递推处理, 获得最小均方误差估计。卡尔曼递推推算法如下:

$$\hat{\mathbf{x}}_i(t+1/t) = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}_i(t/t) \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_i(t+1/t) = \mathbf{A} \mathbf{P}_i(t/t) \mathbf{A}^T + \mathbf{Q}_i(t) \quad (9)$$

$$s_i(t+1) = \mathbf{h} \mathbf{P}_i(t+1/t) \mathbf{h}^T + r_i(t+1) \quad (10)$$

$$\mathbf{g}_i(t+1) = \mathbf{P}_i(t+1/t) \mathbf{h}^T s_i^{-1}(t+1) \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_i(t+1/t+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{g}_i(t+1) \mathbf{h}] \mathbf{P}_i(t+1/t) \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_i(t+1) = \hat{\mathbf{x}}_i(t+1/t) + \mathbf{g}_i(t+1) [z_i(t+1) - \mathbf{h} \hat{\mathbf{x}}_i(t+1/t)] \quad (13)$$

其中, $z_i(t+1)$ 为互谱法输出的实际测量值, $\mathbf{h} \hat{\mathbf{x}}_i(t+1/t)$ 为预测测量值。

交叉处理时置偏差值为零, 即 $z_i(t+1) - \mathbf{h} \hat{\mathbf{x}}_i(t+1/t) = 0$ 。

3 改进的多目标交叉跟踪方法(Improved method of multi-target intersecting tracking)

改进的多目标交叉跟踪方法主要是对交叉前手动预置跟踪方法的改进: 首先, 利用基阵警戒波束数据实现多目标自动检测, 得到跟踪目标一定波束宽度内的可疑目标数; 然后捕获多目标交叉前、交叉开始、交叉过程中、交叉结束四个交叉中间过程的目标自动检测信息, 构建可疑目标数列, 形成目标可疑目标数过程编码; 最后通过目标的交叉状态信息, 实现目标交叉自动判别及目标自动交叉跟踪处理。

3.1 多目标自动检测

通过声呐基阵干端信号处理机接收声呐湿端数据完成全向警戒积分处理, 积分时间应结合声呐设备考虑, 一般建议取积分时间 $1\text{s} \sim 80\text{s}$ (拖曳阵声呐警戒积分时间 $>$ 舷侧阵警戒积分时间 $>$ 艏端阵声呐警戒积分时间), 警戒波束间隔满足波束 3dB 覆盖的同时, 应结合跟踪测向精度考虑, 一般建议跟踪波束间隔取 $k \cdot \theta_{\text{error}}$ (θ_{error} 为测向精度, $k=1 \sim 1.5$)。记, 警戒波束数据为: $b_1, b_2, \dots, b_N$ (N 为警戒波束个数)。然后通过极大值法获得满足阈值的峰值点作为可疑目标(峰值点对应波束方位即可疑目标方位), 结合波束主旁瓣判决等常规方法剔除虚假目标, 并解算峰值点的输出信噪比 SNR_{out} , 利用快速排序(降序)获得第 i 号可疑目标的 $\text{SNR}_{\text{out}}(i)$ 及其波束方位 $\theta(i)$, 如图2所示。最后通过比较各可疑目标方位的间距获得可疑目标一定波束范围内的目标数目, 记为 M_i , 一般建议波束范围取波束宽度的 $2 \sim 3.5$ 倍。

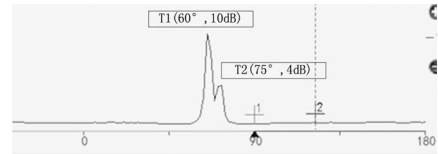


图2 多目标自动检测结果

Fig.2 Result of multi-target auto-detecting

3.2 过程编码

以一定节拍 Δt 实时解算第 i 号可疑目标一定波束范围内的目标数目 M_i ($M_i=1$ 表示一定波束范围内只有第 i 号可疑目标), 当且仅当 M_i 变化时将结果存入可疑目标数队列 FIFO_i , M_i 发生变化时更新 M_i 至可疑目标数队列 FIFO_i 。对于快速运动目标 Δt 应适当缩小。过程编码过程如图3所示。

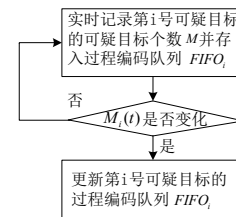


图3 过程编码示意图

Fig.3 Diagram of process coding

当可疑目标数队列 FIFO_i 出现如下编码序列时认为第 i 号可疑目标交叉有效: t 时刻跟踪目标进入交叉, $M_i(t)=2$, $\text{FIFO}_i = '2'$; 交叉目标不断靠近直到出现 $t+1$ 时刻, 此时跟踪目标进入重合状态, $M_i(t+1)=1$, $\text{FIFO}_i = '12'$; 交叉重合结束后, 目标不断分离, 直到出现 $t+2$ 时刻, 此时跟踪目标

进入分离状态, $M_i(t+2)=2$, $FIFO_i='212'$; 目标不断远离直到出现 $t+3$ 时刻, 此时 $M_i(t+3)=1$, $FIFO_i='1212'$ 。至此认定交叉跟踪过程有效, 且目标交叉结束。一般地, 交叉目标个数超过3且任意两个目标重合时间较短时可同样依据'1212'过程编码序列判别目标交叉过程是否有效。

3.3 自动交叉跟踪

依据 i 号可疑目标数队列 $FIFO_i$ 的编码序列, 智能判决第 i 号可疑目标当前处于目标交叉前或目标交叉过程中或目标交叉结束状态, 结合卡尔曼互谱跟踪方法实现目标自动交叉跟踪, 自动交叉跟踪流程图如图4所示, 实现步骤如下:

(1)初始状态 $FIFO_i='1'$, 进入交叉前状态, 记交叉状态标识 $crossState_i=0$, 利用互谱法实时解算跟踪目标方位, 同时实时修正卡尔曼滤波系数。

(2) M_i 发生变化后更新 $FIFO_i$, 判决 $FIFO_i$ 是否满足 $FIFO_i='k1'$ (k 不等于2), 满足则保持跟踪处理方式不变, 否则进入(3)。

(3)进入 t 时刻, 判决 $FIFO_i$ 是否满足 $FIFO_i='2k1'$, 满足则置 $crossState_i=1$, 跟踪目标自动进入交叉跟踪状态, 利用修正卡尔曼滤波系数预测当前跟踪方位, 否则回到(2)。

(4)进入 $t+1$ 时刻, 判决 $FIFO_i$ 是否满足 $FIFO_i='12k1'$, 满足则保持跟踪处理方式不变, 否则回到(2)。

(5)进入 $t+2$ 时刻, 判决 $FIFO_i$ 是否满足 $FIFO_i='212k1'$, 满足则保持跟踪处理方式不变, 否则回到(2)。

(6)进入 $t+3$ 时刻, 判决 $FIFO_i$ 是否满足 $FIFO_i='1212k1'$, 满足则判定跟踪目标与可疑交叉目标已分离, 置 $crossState_i=0$, 重新利用互谱法解析跟踪方位, 否则回到(2)。

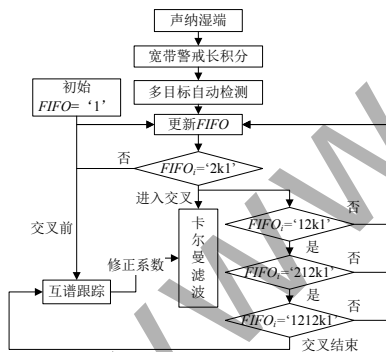


图4 目标自动交叉跟踪流程图

Fig.4 Diagram of auto intersecting targets tracking

4 试验结果(Test result)

此算法在实验室环境和湖上试验环境下都得到了验证。实验室环境下, 该方法对不同信噪比、不同速度下的静止、相向、同向运动目标均能实现较好的目标自动交叉跟踪, 且交叉前后目标跟踪稳定。湖上试验环境下, 用固定声源发出一个带宽噪声信号作为目标2, 同时捕获湖上两个强度不等的相向运动目标分别记为目标1和目标3, 跟踪处理频带3—6kHz。目标交叉过程用全向警戒波束历程图记录, 如图5所示。从图5中可见, 1号和3号跟踪器跟踪的目标(目标1和目标3)不断靠近2号跟踪器跟踪的目标, 目标1先于目标3与目标2完成交叉, 其后目标3完成交叉。

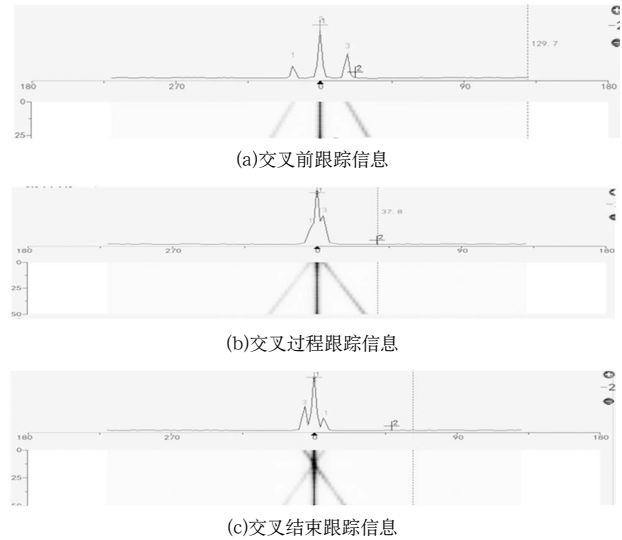


图5 湖上试验目标自动交叉跟踪处理结果

Fig.5 Lake test result of auto intersecting targets tracking

由图5可见, 本文提出的基于过程编码的水下多目标交叉跟踪技术能实现较好的目标自动交叉跟踪, 且交叉前后目标跟踪稳定。

5 结论(Conclusion)

本文在手动预置交叉跟踪方法基础上, 提出了基于过程编码的水下多目标交叉跟踪技术, 该方法兼顾互谱跟踪和卡尔曼滤波优点的同时, 实现水下多目标交叉状态自动判别和自动交叉跟踪处理, 解决了交叉前手动预置跟踪对操作员要求苛刻的问题, 交叉成功率相比交叉前手动预置跟踪提高不小于50%, 相比目标方位角预测跟踪和多假设跟踪, 其物理实现简单, 适合工程应用。

参考文献(References)

- [1] G. Isbitiren, O. B. Akan. Three-dimensional underwater target tracking with acoustic sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011,60(8):3897-3906.
- [2] XH. Li, Y. Li, L. Cui, et al. Research of new concept sonar—cognitive sonar[J]. Journal of Marine Science and Application, 2011,10(4):502-509.
- [3] 李晓花,李亚安,房媛媛.EKF和PF算法及其在目标跟踪中的应用[J].声学技术,2012,31(3):296-299.
- [4] 李晓花.基于信息融合的水下多目标跟踪技术研究[D].西北工业大学,2016.
- [5] 王海军,刘进忙.基于卡尔曼滤波的无源雷达目标跟踪分析[J].战术导弹技术,2005(6):43-45.
- [6] 李启虎.数字式分裂波束阵系统的精确定向方法[J].声学学报,1984,9(4):225-238.
- [7] 李启虎.声纳信号处理引论[M].北京:海洋出版社,1985.
- [8] 季芳,胡青.一种方位交叉目标跟踪算法[J].声学与电子工程,2005,80(4):4-5.

作者简介:

徐雅南(1989—), 男, 硕士, 工程师.研究领域: 声纳信号处理。
喻 聪(1988—), 男, 硕士, 工程师.研究领域: 声纳信号处理。
张 铮(1991—), 男, 硕士, 工程师.研究领域: 声纳信号处理。