

声呐目标跟踪关联中的模糊关联方法

石超雄, 陶剑锋, 张路蔚

(中国船舶重工集团第七一五研究所, 浙江杭州 310023)

摘要: 声呐目标跟踪关联是为了获得精确的状态和属性估计、完全和实时的态势和威胁评估。在多台声呐系统联合探测中, 根据相同目标、不同观测具有相似特征, 提出了声呐目标模糊关联算法。模糊关联能够处理模糊性和不确定性信息, 求解具有相似特征目标的关联值。通过将探测目标的方位数据模糊化, 利用观测的模糊量和模糊隶属度函数进行数据关联, 计算关联时长内两台声呐探测目标方位的关联值, 仿真分析验证了上述算法的有效性并取得了较好的实验效果。

关键词: 跟踪关联; 模糊隶属度; 模糊关联

中图分类号: TB56

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-02-0141-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.02.003

The fuzzy association method for target-tracking association of sonar

SHI Chaoxiong, TAO Jianfeng, ZHANG Luwei

(715th Institute of CSIC, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: Target-tracking association of sonar is a comprehensive processing technique, which can achieve more accurate state and attribute estimation and more complete real-time situation and threat assessment than the single information source through smartly combining the multi-source information of targets. In this paper, the multiple sensors based fuzzy correlation algorithm is proposed on the similarity of different observations of the same target. The method is used to process uncertain information for finding the difference between illegible targets, and the correlation value of the target orientations within the correlation time is calculated by blurring the target orientation data based on the fuzzy set definition of observation data and the fuzzy membership function. The validity of the above algorithm is verified by simulation analysis, and good experimental results are obtained.

Key words: target-tracking association; fuzzy membership degree; fuzzy association

0 引言

对声呐系统目标进行数据关联融合, 通过对满足条件的目标方位等信息进行目标关联, 能够提高对目标的检测、定位和识别能力。在多台声呐实时联合目标探测跟踪过程中, 同一个目标在不同声呐上形成的观测, 会由于其来源相同而具有某种相似特征, 同时也会由于杂波干扰、噪声和观测的声呐系统性能的差异性而导致这些观测的目标特征存在一定的差异。数据关联通过利用目标的这种观测相似特征, 判别目标量测的相似而不完全相同的特征是否对应于同一个探测目标^[1], 从而得到多节点联合探测的目标综合态势。

在跟踪过程中出现新的目标, 需要对连续的多个采样周期进行“观测”与“观测”的目标数据关联, 对观测数据的关联融合需要进行“观测”与“航迹”关联, 进而更新目标信息, 确定目标航迹修正后的观测。本文提出了基于模糊理论的多节点数据关联算法, 对不同探测节点的目标信息进行关联分析, 实现同一目标在不同声呐系统上观测的正确关联。仿真试验结果表明该方法能够有效地解决纯方位航迹相关的问题。

1 目标方位数据关联

水中目标信息来源于不同声呐基阵的探测目标。声呐系统送出方位、距离等信息, 需要将不同声呐探测目标的信息转换到统一坐标系上, 而且时间上也要统一。数据关联流程图如图 1 所示。

1.1 方位数据平滑预处理

水声环境复杂、声呐系统差异、输出信息精度

收稿日期: 2018-08-12; 修回日期: 2018-12-06

基金项目: 装备预研项目(30202)。

作者简介: 石超雄(1987—), 男, 湖北黄冈人, 工程师, 研究方向为水声信号处理和数据融合。

通讯作者: 石超雄, E-mail: scx610192559@163.com

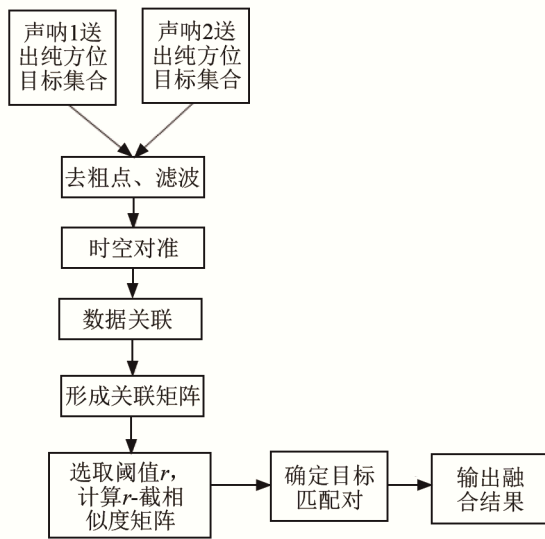


图 1 目标方位关联流程图
Fig.1 Flow chart of target bearing association

不一样等各种因素会导致水声探测信息在很多时候并不稳定，跟踪级数据质量对后续航迹数据关联正确率、稳定度有较大影响。因此，在进行航迹数据关联前需要对方位距离数据进行平滑、预测等必要处理，以形成质量较好的航迹数据。数据预处理流程如图 2 所示。

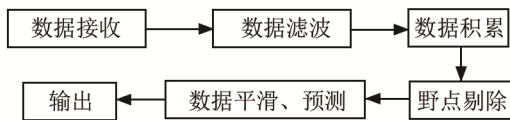


图 2 数据预处理
Fig.2 Data preprocessing

数据平滑有线性和非线性两大类方法。经过仿真比较多种算法，不管对匀速目标还是非匀速目标，非线性处理方法效果都较好。可采用时间序列指数平滑法、中值均值结合平滑法等方法，这些方法实现简单，宽容性、处理效果均较好。

1.2 时空统一处理

时空统一处理在数据关联中有很重要的作用，处理过程中需要将不同声呐目标在不同时刻、不同坐标系下的信息统一转换到同一时刻、同一坐标系下同类型的信息再进行其他后续处理。处理实施流程如图 3 所示。

时间对准是数据关联的重要环节，有助于关联度的提高，时间对准的方法很多，主要分为批处理和线性递归两大类，最常用的是插值处理。实际应用过程中，为了使不同探测节点在时间上同步，对各声呐探测目标数据采用内插外推法对目标观测数据进行对准，实现目标数据时间统一。设定各节点的对准时间基准点为 t ，传感器相邻的采样时间

为 t_1 和 t_2 ， t_1 和 t_2 观测值为 Z_1 和 Z_2 ，则基准点的观

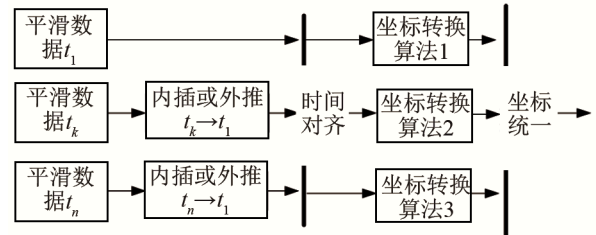


图 3 时空统一流程图
Fig.3 Flow chart of space-time unity

测值 Z 可以通过以下插值公式得到：

$$Z = Z_1 + \frac{t-t_1}{t-t_2} (Z_2 - Z_1) \quad (1)$$

该式适用于内插、外推两种情况，一般按照匀速直线运动进行推算。

2 模糊数据关联

2.1 基于模糊量相似度的数据融合算法

该算法通过对探测目标方位数据模糊化，得到方位数据观测的模糊量，然后计算不同目标航迹方位数据模糊量之间的相似关联度，得到目标方位数据模糊量相似关联度矩阵。设定关联度阈值，计算各目标的航迹关联对，判定不同探测节点的目标方位航迹相关^[2]。

探测节点 1 和探测节点 2 的跟踪目标经过时空对准后，设节点 1 跟踪的某个目标方位为 $X_0(k)$ ，为参考序列，节点 2 的某个目标方位为 $X_i(k)$ ，为比较序列，对目标跟踪的方位误差均方差(方位探测的精度)分别为 σ_1 、 σ_2 ，将方位数据进行模糊化，得到目标的方位模糊量 $\tilde{A}_i(k)$ 。

参考序列模糊量：

$$\tilde{A}_0(k) = [\alpha_{01}(k) \ \alpha_{02}(k) \ \alpha_{03}(k)], \quad k=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式(2)中：

$$\alpha_{01}(k) = X_0(k) - 2\sigma_1 \quad (3)$$

$$\alpha_{02}(k) = X_0(k) \quad (4)$$

$$\alpha_{03}(k) = X_0(k) + 2\sigma_1 \quad (5)$$

比较序列模糊量：

$$\tilde{A}_i(k) = [\alpha_{i1}(k) \ \alpha_{i2}(k) \ \alpha_{i3}(k)], \quad k=1, 2, \dots, N; \quad i=1, 2, \dots, S \quad (6)$$

式(6)中：

$$\alpha_{i1}(k) = X_i(k) - 2\sigma_2 \quad (7)$$

$$\alpha_{i2}(k) = X_i(k) \quad (8)$$

$$\alpha_{i3}(k) = X_i(k) + 2\sigma_2 \quad (9)$$

分别计算比较序列和参考序列纯方位模糊量

的相似度:

$$r[\tilde{A}_0(k), \tilde{A}_i(k)] = \frac{\min\{p_1, p_2\}}{p_3},$$

$$k=1, 2, \dots, N; \quad i=1, 2, \dots, S \quad (10)$$

其中:

$$p_1 = [\alpha_{01}(k)]^2 + [\alpha_{02}(k)]^2 + [\alpha_{03}(k)]^2 \quad (11)$$

$$p_2 = [\alpha_{i1}(k)]^2 + [\alpha_{i2}(k)]^2 + [\alpha_{i3}(k)]^2 \quad (12)$$

$$p_3 = \alpha_{01}(k)\alpha_{i1}(k) + \alpha_{02}(k)\alpha_{i2}(k) + \alpha_{03}(k)\alpha_{i3}(k) \quad (13)$$

$r[\tilde{A}_0(k), \tilde{A}_i(k)]$ 值的大小反映了比较序列和参考序列的相似程度, 值越大表示越相近。 $\tilde{A}_0(k)$ 和 $\tilde{A}_i(k)$ 分别表示为参考序列和比较序列的航迹方位信息的模糊量。 $r[\tilde{A}_0(k), \tilde{A}_i(k)]$ 实际反映了两个探测节点探测到的目标航迹 t_k 时刻的相关的可能性。

2.2 基于模糊隶属度函数的模糊关联算法

一般的模糊集合可以有多种表示方法, 但是都是基于将其所包含的元素集合和其对应的隶属度关系用函数表示出来。当目标的探测信息存在随机误差时, 不能直接给出目标方位的隶属函数, 但是可以比较两个探测目标方位相应的隶属度关系, 通过相对选择法求取其隶属度函数^[3], 这种方法就避免了求解声呐系统的方位探测误差。通常将一个模糊数 \tilde{N} 定义在实数域 \mathbf{R} 上的正规凸模糊集, 满足以下条件:

(1) 存在唯一的点 $x_0 \in \mathbf{R}$, 具有隶属度 $\mu_{\tilde{N}}(x_0) = 1$;

(2) 隶属函数 $\mu_{\tilde{N}}$ 在 x_0 点是左右连续的。

\mathbf{R} 上的元素 x 属于 \tilde{N} 的隶属度一般表达式可以表示为

$$\mu_{\tilde{N}}(x) = \begin{cases} L(x), & l \leq x \leq x_0 \\ R(x), & x_0 \leq x \leq r \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中: $L(x)$ 为增函数, 在点 x_0 右连续; $R(x)$ 为减函数, 在点 x_0 左连续; 且 $0 \leq R(x), L(x) \leq 1$ 。符合上述条件的模糊数有多种, 如三角形、梯形、高斯型等。本文选取梯形分布为模糊隶属度函数:

(1) 偏小型:

$$A(x) = \begin{cases} 1, & x < a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & b < x \end{cases} \quad (15)$$

(2) 偏大型:

$$A(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b < x \end{cases} \quad (16)$$

(3) 中间型:

$$A(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x < c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (17)$$

基于隶属度函数的模糊关联步骤:

(1) 对于参考序列 $\mathbf{a}_{M \times N}$ (表示 $M \times N$ 型矩阵, 下同), M 为目标个数, N 为累积方位的长度, 对其进行行排序, 输出: $\mathbf{c}_{M \times N}$;

(2) 将 \mathbf{c} 中每列的方位元素与 \mathbf{a} 中每列比较, 根据隶属度函数, 判断比较序列 $\mathbf{b}_{M \times 1}$ 中方位元素在 \mathbf{a} 中的隶属度值, 输出隶属度矩阵 $\mathbf{L}_{M \times N}$;

(3) 计算比较序列 \mathbf{b} 中的方位元素, 对应于 M 个参考序列的权值 $\mathbf{E}_{M \times 1}$;

(4) 计算比较序列 \mathbf{b} 与参考序列 \mathbf{a} 的关联值:

$$\mathbf{F}_{M \times 1} = \mathbf{E}_{M \times 1} \cdot \mathbf{L}_{M \times N} \quad (18)$$

3 实验验证

3.1 模糊量数据关联仿真

设有两台纯方位声呐 T_1 和 T_2 , 分别跟踪 4 个目标, 融合中心接收到探测目标的航迹, 对目标航迹进行关联判别。仿真目标设置如下: 4 个目标分别做匀速直线运动, T_1 、 T_2 测量的运动轨迹分别如图 4、5 所示。探测节点 1 和探测节点 2 对目标方位观测的估计误差均满足均值为 0、方差为 $\sigma_{\theta 1} = \sigma_{\theta 2} = 0.5$ 的正态分布。两个探测节点目标的航迹数据在相同的坐标系下, 探测周期为 10 s, 总测试时长为 1 000 s。

设 T_{1-1} 为参考序列, $T_{1-2}, \dots, T_{2-1}, \dots, T_{2-4}$ 为比较序列, 函数输出为参考序列和比较序列关联度。第一列为参考序列, 第二列至第八列为比较序

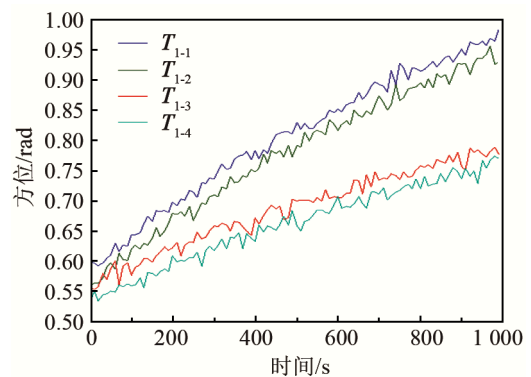


图 4 声呐 1 测得的目标方位图
Fig.4 Target orientations measured by Sonar 1

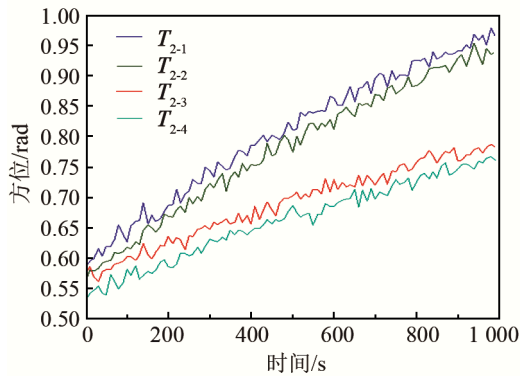


图5 声呐2测得的目标方位图
Fig.5 Target orientations measured by Sonar 2

列, 得到各目标与 T_{1-1} 的关联概率, 正确关联应该是 T_{1-1} 与 T_{2-1} 关联概率最大, 图6是模糊量关联不同探测误差下的关联概率。

图6中的3种结果分别表示式(3)中 σ_1 和式(7)中 σ_2 实时求取的参考序列和比较序列方差 V_{ar} , 以及 σ_1 和 σ_2 取相同固定值 0.8 和 0.2 时的关联概率, 可以看出3种模糊量关联算法结果差别不大。

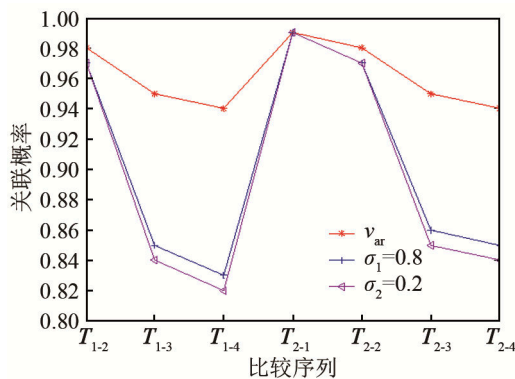


图6 不同探测误差下的目标方位模糊量关联概率
Fig.6 Association probabilities of the fuzzy variables of target orientations under different detection error variances

又分别设 T_{1-1} 、 T_{1-2} 、 T_{1-3} 、 T_{1-4} 为参考序列, T_{2-1} 、 T_{2-3} 、 T_{2-4} 为比较序列, σ_1 和 σ_2 取相同的固定值 0.8 和 0.2, 计算关联概率矩阵, 模糊量关联概率如表1所示。

表1 目标方位模糊量关联概率
Table 1 Association probabilities of the fuzzy variables of target orientations

比较序列	关联概率			
	T_{1-1}	T_{1-2}	T_{1-3}	T_{1-4}
T_{2-1}	0.985 7	0.962 8	0.950 1	0.947 2
T_{2-2}	0.970 8	0.979 6	0.963 3	0.950 4
T_{2-3}	0.952 0	0.951 2	0.980 4	0.972 5
T_{2-4}	0.942 8	0.940 3	0.965 9	0.983 2

由表1可以看出, 模糊量关联虽然正确关联概率高, 但是其区分度比较低, 不利于目标分类。

3.2 模糊隶属度关联仿真

对两个不同位置的传感器进行仿真, 对应4个匀速直线运动目标, 传感器探测目标方位的误差方差 $\sigma_{\theta_1} = \sigma_{\theta_2} = 0.5$, 探测目标方位范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$, 目标运动轨迹和探测到的方位分别如图7~9所示。

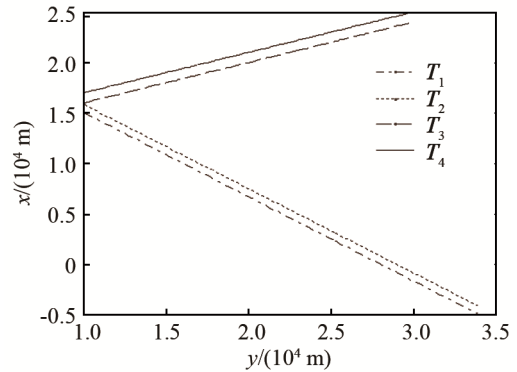


图7 目标运动轨迹
Fig.7 Target trajectories

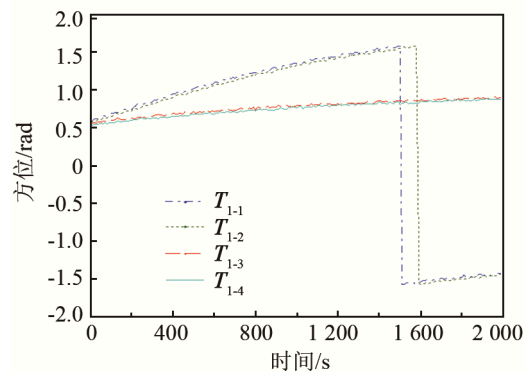


图8 声呐1测得图7所示目标的方位
Fig.8 The orientations of the target shown in Fig.7 measured by Sonar 1

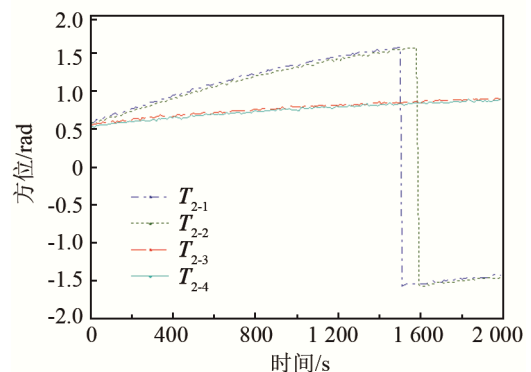


图9 声呐2测得图7所示目标的方位
Fig.9 The orientations of the target shown in Fig.7 measured by Sonar 2

经过 100 次蒙特卡罗实验, 得到模糊隶属度关联概率如表2所示。

由仿真结果可以看出, 虽然正确的关联概率比模糊量关联正确率低, 但是其区分度比较明显, 即

不是同一目标的关联概率低，这对跟踪目标分类融合结果有利。而且这种方法在建立模糊隶属度函数求关联值过程中，不需要预先知道声呐探测系统目标探测的误差。

表 2 目标方位模糊隶属度关联概率
Table 2 Association probabilities of the fuzzy membership degree of target orientations

比较序列	关联概率			
	T_{1-1}	T_{1-2}	T_{1-3}	T_{1-4}
T_{2-1}	0.870 1	0.122 8	0.000 1	0.001 2
T_{2-2}	0.118 8	0.861 6	0.013 3	0.000 4
T_{2-3}	0.000 0	0.011 2	0.800 4	0.182 5
T_{2-4}	0.000 8	0.000 3	0.155 9	0.837 2

4 结 论

本文提出了基于模糊隶属度函数的模糊关联算法，该方法相对于模糊量关联算法，不要求系统的方位探测误差。实验结果表明，同一目标在不同误差的系统上做模糊隶属度函数关联，能够区分不同目标，有一定的关联准确率。

在下一步的工作中，将研究声呐目标频域特征的模糊隶属度函数形式对目标模糊关联准确率的影响，同时利用这两种相互独立的特征提高相同目标的关联概率。

参 考 文 献

[1] 刘源. 基于模糊信息处理的数据融合方法研究[D]. 陕西: 西安电

子科技大学, 1999.

LIU Yuan. The reseach of data fusion based on fuzzy information processing[D]. Xi'an: Xidian University, 1999.

[2] 何友, 王国宏, 陆大紘, 等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.

HE You, WANG Guohong, LU Daqian, et al. Multisensor information fusion with applications[M]. BeiJing: Publishing House of Electronics Industry, 2000.

[3] 韩崇昭, 朱红艳, 段战胜, 等. 多元信息融合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.

HAN Congzhao, ZHU Hongyan, DUAN Zhansheng, et al. Multi-sources information fusion[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.

[4] 何友, 王国宏, 陆大紘, 等. 多传感器数据融合模型综述[J]. 清华大学学报, 1996, 36(9): 14-20.

HE You, WANG Guohong, LU Daqian, et al. Summary of multi-sensor data fusion model[J]. Journal of Tsinghua University, 1996, 36(9): 14-20.

[5] 肖冠. 基于多特征融合的异类传感器中段目标关联算法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.

XIAO Guan. The research based on the target association algorithm of the middle segment of heterogeneous sensor based on multi-feature fusion[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.

[6] 朱沛胜. 多目标数据关联算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001.

ZHU Peisheng. The research on multi-target data association algorithm[D]. Xi'an: Xidian University, 2001.

[7] HOU Y L. Multiple-sensor fusion tracking based on square-root cubature kalman filtering[J]. Journal of Networks, 2014, 9(7): 132-136.

[8] TIWARI R, GUPTA V K, KANKAR P K. Bearing fault diagnosis based on multi-scale permutation entropy and adaptive neuro fuzzy classifier[J]. Journal of Vibration and Control 2015, 21(3): 461-467.