

海洋油田平台水下安防系统航迹融合与报警技术

代 笠, 张翔龙

(海装广州局, 广东 广州 510000)

摘 要 多传感器信息融合技术是对各个传感器的观测数据进行综合处理的过程, 是多学科、多领域的高层次共性关键技术。以多源信息融合技术为基础, 对 AIS、雷达与声呐多源探测信息融合算法进行了较为深入地研究, 提出适应水下安防系统的多源信息融合与报警技术的工程化应用方案, 对实际应用情况做了简要总结, 经验证该技术能够较好应用于水下安防系统的数据分析和分级报警中。

关键词 水下安防; 数据融合; 报警

中图分类号 TP216 **文献标识码** A

Track Fusion and Alarm Technology of Underwater Security System for Offshore Oil Field Platform

DAI Li, ZHANG Xianglong

(Guangzhou Bureau of Naval Equipment Research Institute, Guangzhou 510000, China)

Abstract Multi-sensor information fusion technology is a process of carrying on comprehensive processing of the observed data of each sensor, and is a high level generic key technology in multi-discipline and multi-field. Based on multi-source information fusion technology, the further study on multi-source detection information fusion algorithm of AIS, radar and sonar is conducted in this paper, and the engineering application scheme of multi-source information fusion and alarm technology adapted to underwater security system is proposed. Meanwhile a brief summary is given on actual applications, and it is proved that this technology can be well used in data analysis and classification alarm of underwater security system.

Key words underwater security; data fusion; alarm

0 引言

水下安防系统是一套以被动声呐、海面定位雷达和 AIS 等探测设备为硬件基础, 以系统控制与报警软件为数据处理中心的海上油田平台安防报警系统。能够对油田水面/水下等外部目标进行集中监控, 并在油田水下管缆和设施位置电子海图的配合下, 自动识别判断各种目标的威胁程度, 及时可靠地做出分级预警和报警, 为采取进一步的取证和管制措施提供切实依据, 降低油田设施被外部威胁目标破坏的风险^[1]。

安防系统是一个典型多源异构数据融合报警系统, 探测信息来自雷达、声呐、AIS 等, 有信息数量大、关系复杂、探测精度差异大、数据格式不统一、内容各异以及安防系统对信息处理实时性要求高等特点, 使得在综合多传感器优点处理多源数据, 对威胁目标实施精确预报存在较大困难。目前成熟的多源信息融合技术虽然融合的信息源较多, 但传感器类型比较单一, 如融合多台雷达或多台声呐等, 信息处理复杂性低, 有关技术难以满足水下安防系统的实际需要。因此, 研究适用于水下安防系统的数据融合与报警技

术, 实现将某一目标的多源信息 (雷达、声呐、AIS 探测数据) 进行检测、相关、估计和组合以达到对跟踪目标进行精确状态估计、身份识别、威胁评估和辅助决策的目的。

1 数据融合与报警模型

根据水下安防系统采用水下声呐、雷达以及 AIS 组合探测目标的方案, 水下安防系统信息融合与报警技术采用多级融合模型构建, 来完成数据融

合分析与报警处理工作, 共分 5 级, 其分级模型结构如图 1 所示。

由图 1 可知, 第一级传感器检测级融合由安防系统的声呐、雷达完成, 本文中的数据融合与报警技术涉及模型中的第 2 到第 5 级。一般来讲, 第 2 级目标位置融合处理的性能直接影响目标轨迹、属性、态势的融合及对威胁的估计, 因此目标航迹的关联和融合算法是该项关键技术的核心。

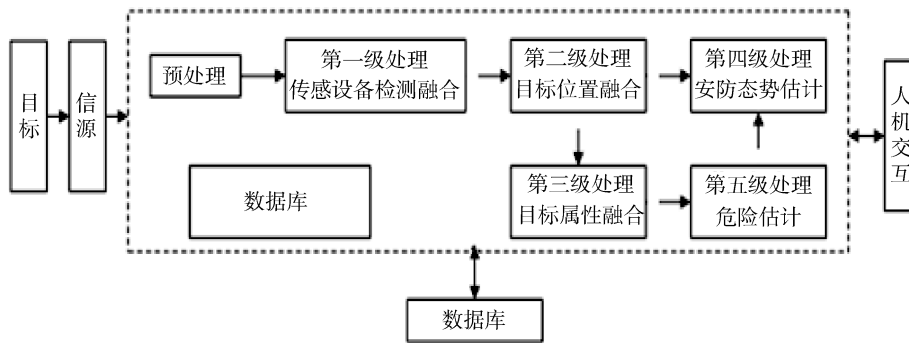


图 1 多级融合模型结构图

Fig. 1 Structure diagram of multistage fusion model

在分布式信息融合系统中航迹关联算法通常有基于统计学的方法、基于模糊数学的方法、基

于灰色理论的方法和基于神经网络的方法。表 1 将几种常见航迹关联方法的性能进行了比较。

表 1 常见航迹关联方法性能比较

Table 1 Performance comparison of common track correlation methods

算法	计算速度	空间复杂度	适应环境	对局部跟踪器要求	参数设置要求	
基于统计学	加权法	非常快	中	稀疏目标	有	无
	修正法	非常快	高	稀疏目标	有	无
	有限记忆独立序贯法	快	高	中等目标	有	有
	独立双门限法	快	中	中等目标	有	有
	K-NN 法	快	低	密集目标	无	有
	MK-NN 法	非常快	低	密集目标	无	有
	广义经典分配修正法	非常快	高	中等目标	有	无
模糊综合决策法	非常快	中	密集目标	无	复杂	
灰色航迹关联法	非常快	中	密集目标	无	复杂	

由表 1 可知, MK-NN 法在基于统计学的方法中具有最好的性能, 基于模糊数学和灰色理论的算法同样具有较高的性能, 考虑到参数设置过于复杂, 可能导致工程应用较为困难, 选择 MK-NN 算法既能够满足性能要求, 也便于工程应用。

2 航迹关联算法

航迹关联算法是融合模型的第 2 级位置级的

数据融合的关键, 航迹关联模块接收雷达、声呐、AIS 的目标航迹数据, 基于 MK-NN (修正的 K 近邻域关联算法) 算法实现不同传感器间多个目标航迹之间的关联映射, 为航迹融合提供输入^[2-3]。在进行航迹关联前的航迹应用具备了以下条件: 1) 各传感器已形成局部航迹 (条数可以不相等), 且同一传感器的同一航迹号唯一标识一条航迹; 2) 在每一关联时刻, 关联模块的输入点数与局部航迹总数

相等,即输入的局部航迹对关联算法来说无丢点现象,丢点后重新出现的局部航迹一律视为新航迹(先前的局部处理可在向关联模块提供输入前进行必要的航迹补点处理);3)对于符合假设2)的多条局部航迹,已完成了时间/空间同步处理。

当有满足上述条件的局部航迹输入时,

MK-NN 算法首先进入关联期,考虑到在航迹关联检验中,对关联期中每个时刻的状态估计是逐步处理的,为使得在后期的关联赋值更加可靠,算法把当前的检验与其历史联系起来,把整个关联检验分为关联期、检查期和保持期,按以下图 2 的流程进行处理。

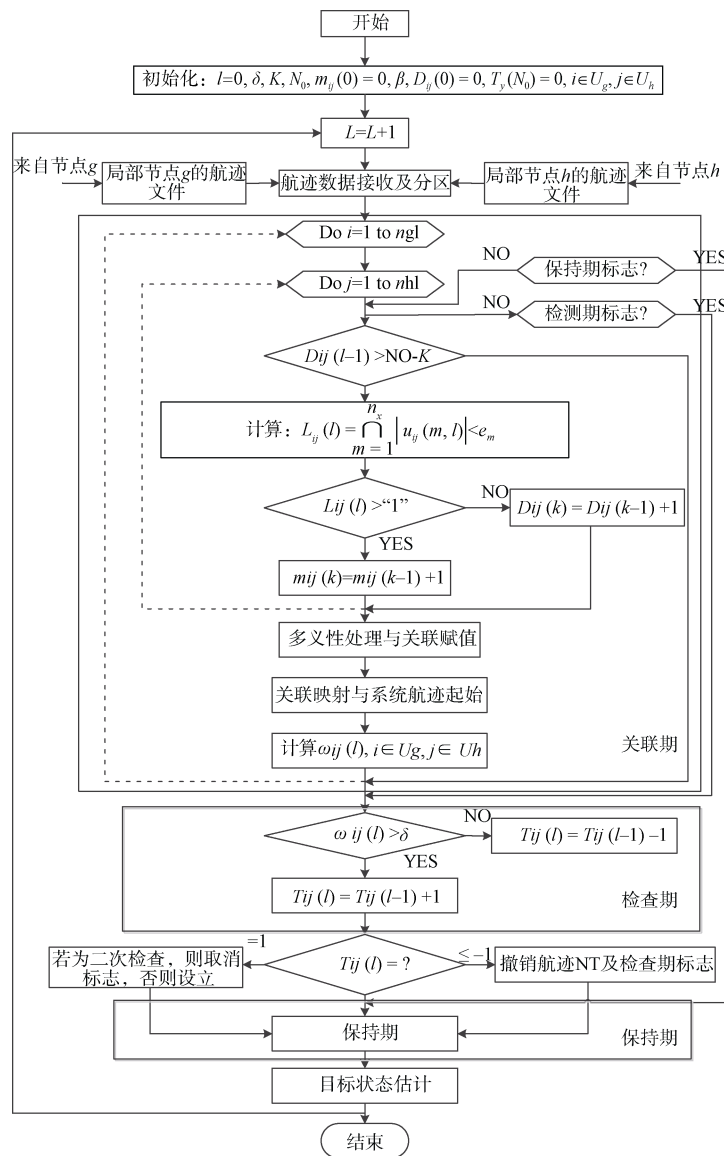


图 2 MK-NN 关联算法计算流程图

Fig. 2 Calculation flow chart of MK-NN association algorithm

对于图 2 流程,做以下说明:

1) 关联期需指定关联周期数 N 及门限 K 。关联周期数的选择通常与目标分布、运动规律和采样间隔有关。目标分布越密集则关联周期数越大,目

标速度越小、采样间隔越大则关联周期数越小,一般取 6~12; K 按航迹质量阈值比较时实际完成关联周期数(不大于 N)的一定比例取整得到,该比例一般大于 0.5 且不大于 0.75。

2) 单次关联检验采用 NN 准则, 即判断局部状态估计之差的每个分量小于阈值向量的对应分量是否同时成立, 其中阈值向量直接依赖于状态估计误差协方差, 通常可取为

$$e_q(k) = G\sqrt{[P_{qq}^g(k) + P_{qq}^h(k)]/2} \quad (1)$$

式中: G 为门限系数, 一般情况下取 3, 目标机动时取 5; K 为关联周期计数变量; q 为状态自由度计数变量; e_q 为阈值向量的第 q 个分

$$w_{gh}(k) = \beta [X_g(k) - X_h(k)]^T [P_g(k) - P_h(k)]^{-1} [X_g(k) - X_h(k)] \quad (2)$$

式中: β 为阈值系数; $w_{gh}(k)$ 为第 k 个关联周期局部航迹 g 与 h 的检验统计量; $X_g(k)$ 为第 k 个关联周期局部航迹 g 的状态估计向量; $X_h(k)$ 为第 k 个关联周期局部航迹 h 的状态估计向量; $P_g(k)$ 为第 k 个关联周期局部航迹 g 的状态估计协方差矩阵; $P_h(k)$ 为第 k 个关联周期局部航迹 h 的状态估计协方差矩阵。

与关联期不同, 当用测量方差矩阵代替状态估计协方差矩阵时, 阈值系数要做适当调整, 且阈值应严格根据相应自由度的卡方分布在指定的显著性水平下确定。

3 航迹融合算法

航迹关联完成后即可直接将相关的局部航迹输入航迹融合模块进行处理。同样, 借鉴工程应用较成熟的加权融合算法的思想实现该模块^[4-9]。算法的基本融合公式如下:

$$x = \left(\sum_{i=1}^N P_i^{-1} \right)^{-1} \sum_{i=1}^N P_i^{-1} x_i \quad (3)$$

式中: X 为融合输出状态向量; N 为传感器数目; x_i 为第 i 个传感器输入的状态估计向量; P_i 为第 i 个传感器输入的状态估计误差协方差矩阵。

由于本项目中前端传感器不能提供 P_i , 本模块特别设计了一种自适应权值估计算法, 具体描述如下:

根据经典统计理论我们知道, 多个独立随机变量的线性组合具有比其中任何一个更小的方差。由于确定时刻的各局部估计正好可以用独立随机变

量; P_{qq}^g 为局部航迹 g 状态估计协方差矩阵的第 q 个对角元素; P_{qq}^h 为局部航迹 h 状态估计协方差矩阵的第 q 个对角元素。当 P_{qq}^g 、 P_{qq}^h 无法获得时, 可直接用相应分量的测量方差近似代替。

3) 由于通过关联期的关联对可靠性已经较高, 检查期应采用更严格的检验条件进行正确性检查, 故选择的检验统计量为

量来描述(这里忽略了基于相同跟踪模型的多个传个器间的相关性, 对简化实际工程应用中的算法是有益的), 所以多源航迹融合的权系数与各局部估计的方差密切相关, 优良的权系数应使融合输出的方差最小。这可由拉格朗日乘法得到, 如式(4)所示:

$$\begin{cases} \omega_{i,k} = \frac{1}{\delta_k \sigma_{i,k}^2} \\ \delta_k = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{i,k}^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\frac{1}{\delta_k}$ 为融合估计的方差; $\omega_{i,k}$ 为各局部估计的权系数; $\sigma_{i,k}$ 为各局部估计的标准差。

从中可以看出, 问题的关键在于如何在仅有最基本的状态信息可利用的应用条件下实时地估计局部状态估计各分量的方差。本项目中按以下步骤来解决这一问题:

1) 对于第一个融合周期, 指定初始方差 $\sigma_{i,0}^2$ 并计算出权系数 $\omega_{i,0}$ ($i=1, 2, \dots, N$) 及融合状态 X_0 ;

2) 对于第 k ($k>1$) 个融合周期, 用第 $k-1$ 个融合周期的权系数 $\omega_{i,k-1}$ ($i=1, 2, \dots, N$) 对该周期的局部状态 X_k^i 加权求和, 结果作为该周期的全局状态预测:

$$X_{k|k-1} = \sum_{i=1}^N \omega_{i,k-1} X_k^i \quad (5)$$

3) 对于每一个传感器 i ($i=1, 2, \dots, N$), 以其最近 M 个融合周期的局部状态估计作为样本, 进行状态估计的方差估计, 如式(6)所示(当 $k<M$ 时 M 退化为 k):

$$\sigma_{i,k}^2 = \frac{1}{M} \sum_{m=k-M+1}^k (X_m^i - X_m)^2 \quad (6)$$

4) 利用式 (5) 得到的结果根据式 (4) 计算权系数 $\omega_{i,k}$ ($i=1, 2, \dots, N$) 并按式 (7) 完成当前融合周期全局状态估计 X_k 的计算:

$$X_k = \sum_{i=1}^N \omega_{i,k} X_k^i \quad (7)$$

5) 重复步骤 2)-4), 实时计算全局状态估计输出。

4 报警策略研究

水下安防系统的最终目的是对监测目标进行威

胁评估, 根据船只对油田管线和平台破坏的情况分析, 大多数情况为船只随意抛锚、非法挖沙行为造成的破坏, 因此, 水面目标船只有威胁的行为特性是在管线和平台附近有停船行为。一般情况下当只有声呐探测时无法判断目标属性, 即是否为水下或水面目标, 只有经过 3 种探测设备进行位置融合处理后才能分辨目标位置属性。水下目标一般是蛙人、UUV 等, 当目标为水下目标时, 其报警策略与水面目标不同, 即认为水下目标进入油田作业区域, 需要重点关注。如图 3 为监测目标的报警流程。

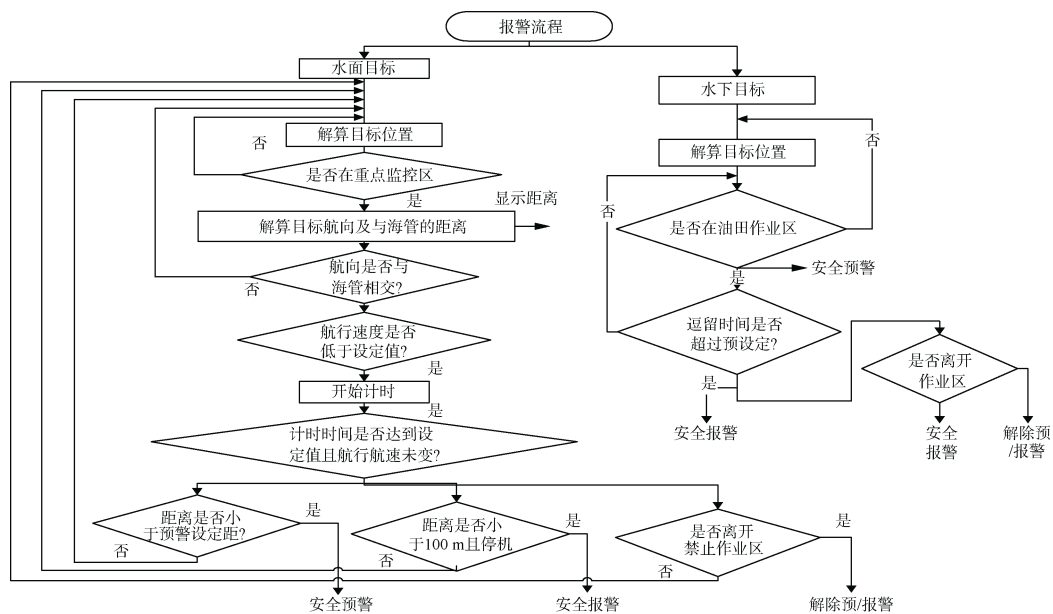


图 3 监测目标的报警流程
Fig. 3 Alarm process for monitoring targets

5 仿真情况

为检查航迹融合方法的融合效果, 采用仿真的方法进行理论研制。设船只在 30 kn 以内先后经历匀减速、匀速、匀加速过程, 2 个传感器每 5 s 各输入一个航迹点, 误差均为 10 m, 融合中心不做滤波处理直接融合, 每 10 s 输出 1 个点。理论上融合输出最大误差为各传感器误差之和 (20 m), 而显示融合输出最大误差约为 15 m, 融合效果明显。

6 实际应用情况

该数据融合与报警技术城管运用于 SZ36-1、QHD32-6、BZ28/34 等多个海洋油田平台水下安防

项目, 取得了良好的效果。

1) 关联融合实际应用情况。雷达、声呐、AIS 探测数据关联的过程, 在关联融合成功后原先的 3 条航迹合并成 1 条, 探测目标各种属性也完成融合, 获取目标的信息量比单传感器数据要丰富许多。

2) 安防报警实际应用情况。安防系统监测到注册船只 LANJIANG 可能威胁到平台安全, 产生报警信息后的回放取证图。2014 年 11 月 16 日 18 点 40 分至 2014 年 11 月 21 日 02 点 00 分离开, 安防系统监测到注册船只 LANJIANG 停靠在距离 WHPG 平台 60 m 处 (119.227 079°E, 39.135 527°N) 进行施工共 6 天, 可能威胁到平台和管缆安全, 系统自动给出报警提示信息, 该船只停泊 6 天后离开该区域, 报警自动解除。

安防系统监测到在 2014-11-19T 15:09:30 至 2014-11-21T 01:03:53 之间货船 LIDIAN20 在 FPSO 平台到 WHPF 平台注水管道/混输管线/电缆, WHPA 平台到 WHPE 平台电缆/注水管道/混输管道附近, 距离 14~25 m 的位置长期停泊 (超过 10 h), 安防系统给出报警提示, 如图 4 所示。

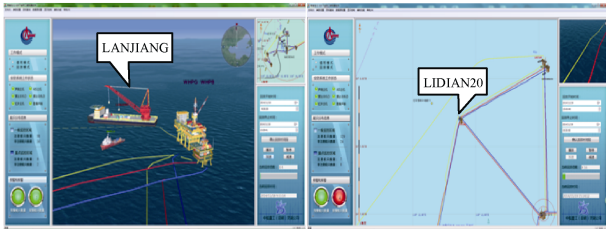


图 4 注册船只威胁平台及周围管线态势图
Fig. 4 Registered vessel threat platform and surrounding pipeline situation map

3) 数据记录统计情况。对 QHD32-6 油田安防系统进行的不完全统计情况: 监测时间从 2014 年 8 月—2016 年 3 月, 按预警和报警的条件, 共监

测到潜在危险情况 11 010 余次。其中针对非注册船只的预报警数量 800 余次, 针对注册船只的预报警数量 10 100 船/次, 针对平台的报警 3 600 余次, 针对管缆的报警 7 300 余次。安防系统监测记录信息 460 159 389 条, 数据库大小 130 GB。

数据记录总条数与报警分布情况如图 5 所示。

7 结束语

数据融合技术可以将各信息采集的不完整信息加以综合及关联, 减少多源信息间可能存在的冗余和矛盾信息, 降低其不确定性, 提高智能系统决策、规划、反应的快速性和正确性。水下安防数据融合与报警技术自首个安防系统成功应用以来, 经过多次完善, 性能和可靠性得到大幅提升, 尤其在后续的 QHD32-6 和 BZ38/34 安防系统中的成功运用, 有效提高了海上油田水下安防系统分级预报警自主决策能力。

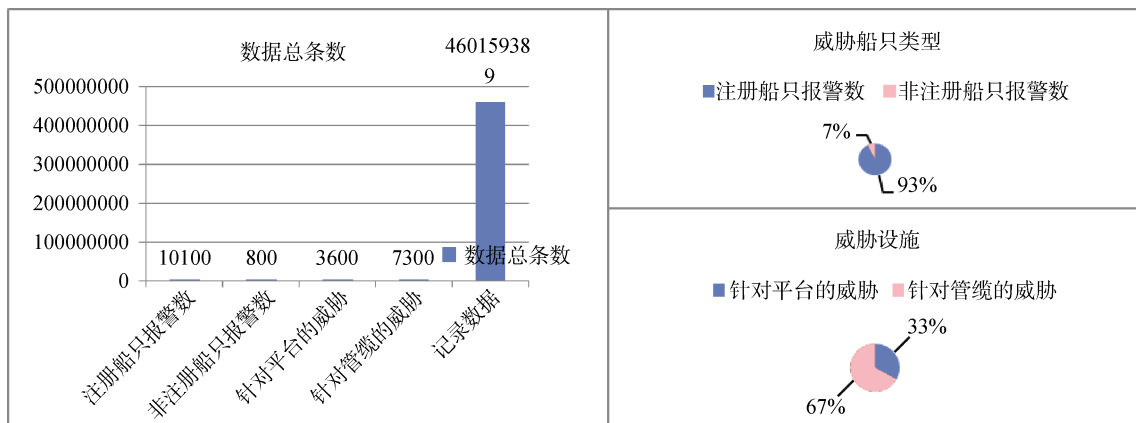


图 5 数据记录总条数与报警分布情况图
Fig. 5 Total number of data records and situation diagram of alarm distribution

参考文献

[1] 雷聚涛. 海上油田群安防系统简述[J]. 自动化仪表, 2014 (6): 17-21.

[2] 鲁蕾. 密集目标环境下 MK-NN 关联算法的应用[C]//2010 中国仪器仪表学术、产业大会 (论文集 1). 北京: 仪器仪表学报, 2010: 28-34.

[3] 李素, 王运锋. 应用 K-means 聚类的分布式多传感器航迹关联算法[J]. 电讯技术, 2018, 58 (3): 295-299.

[4] 何友, 王国宏, 关欣. 信息融合理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.

[5] 化柏林. 多源信息融合方法研究[J]. 情报理论与实践, 2013 (11): 16-19.

[6] 王亭亭. AIS 与雷达动态信息融合算法的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.

[7] 田雪怡. 多传感器数据关联与航迹融合技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.

[8] 欧阳萍, 林长川. AIS 与雷达目标信息融合算法与实现[C]//2010 船舶航泊实践研究论文集. 北京: 中国航海学会, 2010: 186-190.

[9] 刘加欢. 近海监控系统中的多源信息融合算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.

(责任编辑: 张曼莉)