

水下机动目标跟踪技术研究

张林琳^{1,2}, 杨日杰¹, 杨春英³

(1. 海军航空工程学院电子信息工程系, 山东烟台 264001; 2. 中国人民解放军 91528 部队, 上海 200436;
3. 海军航空工程学院青岛分院, 山东青岛 266041)

摘要: 水下目标跟踪是海洋国土监视、反潜战等环境下的关键技术。以往的跟踪滤波算法主要基于卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波等算法, 这些方法实现比较复杂, 滤波精度不高。最近出现了不敏卡尔曼滤波、粒子滤波、转换瑞利滤波、双多基地跟踪算法等, 需要研究这些算法在水下目标跟踪中的性能。总结对比了国内外学者在此领域的研究成果, 得出了这些滤波算法在水下目标跟踪中的优缺点。重点论述了纯角度跟踪和非线性滤波算法的发展、在水下目标跟踪中的应用以及多基地声纳跟踪水下目标技术的发展, 回顾了机动目标跟踪和多目标数据互联算法。研究表明, 非卡尔曼滤波算法能够更高精度地跟踪水下目标, 双多基地声纳是今后发展的重点。为今后的研究提供参考。

关键词: 水下目标跟踪; 纯角度跟踪; 多基地声纳; 数据互联

中图分类号: TG156

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-01-068-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.01.012

Research on underwater manoeuvre target tracking technology

ZHANG Lin-lin^{1,2}, YANG Ri-jie¹, YANG Chun-ying³

(1. Department of Electronic Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, Shandong, China; 2. PLA 91528th Unit, Shanghai 200436, China; 3. Qingdao Branch, Naval Aeronautical and Astronautical University, Qingdao 266041, Shandong, China)

Abstract: Underwater target tracking is the key technology of ocean surveillance and anti-submarine warfare. The most previous tracking algorithms are based on Kalman filter, Extended Kalman filter and so on. These algorithms are complex to use, and their performances are not satisfied. In recent years, the unscented Kalman filter, Particle filter, Shifted Rayleigh filter and multistatic sonar tracking algorithm have been proposed. It is necessary to research the performances of these algorithms in underwater target tracking scenario. This paper summarizes the research work in this area, and contrasts these algorithms' performances. The development of bearing-only tracking, nonlinear filter algorithm and multistatic sonar tracking are discussed in detail. Multitarget data association and manoeuvre target tracking algorithm are also involved. The study shows that non-Kalman filter can track underwater targets with higher accuracy, and multistatic sonar tracking method is becoming hotspot in this area. This paper can be a reference for the same research work in the future.

Key words: underwater target tracking; bearing-only tracking; multistatic sonar; data association

1 引言

水下机动目标的跟踪是指用水声或非水声传感器对目标的运动参数, 如位置、速度、航向等在时间上进行连续估计。按照信息融合的 5 级分类, 即检测融合、位置级融合、属性(目标识别)级融合、态势评估与威胁估计^[1], 目标跟踪属于位置级的融合, 是直接传感器的观测报告或测量点迹和传感器的状态估计上进行的, 包括时间和空间上的融合, 属于中间层次, 也是最重要的融合。对单传感器跟

踪系统来说, 主要是按时间先后对目标在不同时间的观测值即检测报告的融合, 如边扫描边跟踪(TWS)的雷达系统、红外和声纳等传感器的多目标跟踪与估计技术都属于这类性质的融合。在多传感器跟踪系统中, 主要有集中式、分布式、混合式和多级式结构。早在 1973 年, 美国研究机构就在国防部的资助下, 开展了声纳信号理解系统的研究, 研究发现, 对多个连续声纳信号进行概率数据互联滤波之后, 可以以较高的精度检测出敌方舰艇的位置, 从而推动了数据融合理论和方法的发展。

水声探测设备通常有 4 大基本功能: 目标检测、定位、识别和跟踪/目标运动分析。跟踪/目标运动分析实际是目标定位功能在时间上的延续, 旨在了解运动目标随时间的变化, 建立和预测目标运动状

收稿日期: 2009-12-27; 修回日期: 2010-03-11

基金项目: 航空科学基金(20095184005); 泰山学者建设工程专项经费

作者简介: 张林琳(1976-), 男, 山东临沂人, 工程师, 博士研究生, 研究方向为目标跟踪。

通讯作者: 张林琳, E-mail: nilfly@163.com

态的历程和趋势。跟踪方面的能力缺陷涉及到能否对远距离海上交通线进行保护的问题。至于进攻能力低下的问题,其紧急性稍次,因为只有在敌我冲突白热化时才会遇到^[2]。对目标的跟踪还是获得攻击所需的各种要素的必要过程,对目标搜索、识别后,攻击前,还必须通过正确的跟踪方式捕捉目标,将目标的存在范围限定在攻击武器的有效范围。

在已公开的文献中,1995年12月,一艘俄罗斯海军 Ak 级攻击型核潜艇在美国西北海岸外的公海跟踪班戈基地的美“俄亥俄”级战略导弹核潜艇时被发现,成为1994年以来第4次俄潜艇跟踪美国军舰事件^[3],进一步说明了跟踪的重要性。

2 水下机动目标跟踪的分类

对水下目标的跟踪,按照传感器的工作方式可以分为三类:主动工作方式、被动工作方式和多基地方式。

2.1 主动工作方式

主动声纳发射大功率信号来实现目标定位。主动声纳提供距离、方位、多普勒频移的直接测量值,并且可在极坐标系里进行直接表示。声纳工作在主动方式容易被对方截获信号而暴露自己,导致对方加速逃逸或者发生机动规避,从而摆脱主动声纳的跟踪,甚至于攻击跟踪方。

2.2 被动工作方式

这是利用多次观测到的目标辐射的信号或者噪声来拟合目标的运动轨迹,估计出目标运动的状态参数。水下被动跟踪或者目标运动分析,起源于19世纪40年代。被动跟踪状态下,可以得到目标的方位、频率、多普勒频移等参数,将这些信息进行融合,可以完成对目标的跟踪。在被动跟踪领域,国内外的研究非常广泛。

2.2.1 纯方位跟踪

这是指仅利用目标的方位信息解算出目标的运动要素,实现对目标的跟踪。对于单观测平台,必须作机动才有可能估计目标的距离,这是系统的可观测性问题^[4,5]。文献[6-9]研究了观测平台的机动和对目标状态可观测性的影响。纯角度跟踪的研究领域中,很多的研究集中在非机动目标的研究上,由于可观测性和固有的非线性问题,即使对于非机动这种简单的情况,也很难构造有限维最优贝叶斯滤波器。文献[10-14]提出了各种各样的算法。这些算法主要分为两类:批处理和递推类型。批处理的

方法对所有观测的数据进行处理。递推的方法主要基于卡尔曼滤波的方法,在高度非线性的情况下,滤波器通常会不稳定或者发散。在纯角度跟踪研究的公开文献中,对机动目标的研究非常少。文献[15,16]利用交互式多模型(IMM)的方法解决此问题。

近几年,提出了一种不敏卡尔曼滤波器(Unscented Kalman Filter, UKF)^[17,18]。由于UKF能有效处理系统方程非线性程度大的情况,所以在纯角度跟踪等典型的非线性问题上有很好的性能表现,该算法不需要计算Jacobian矩阵或Hessian矩阵,实现起来比较方便,性能相当于二阶高斯滤波器,滤波精度、稳定性、收敛时间都优于扩展卡尔曼滤波(EKF)。

虽然早在上世纪50年代就提出了粒子滤波(Particle Filter, PF),但一直未解决粒子数匮乏现象和计算量制约等问题,直到1993年重采样方法^[19]的提出,粒子滤波才在实际中得到应用,这种滤波方法将所关心的状态矢量表示为一组带有相关权值的随机样本,并且基于这些样本和权值可以计算出状态估值。与其他非线性滤波算法,如扩展卡尔曼滤波、不敏卡尔曼滤波相比,这种方法不受线性化误差或高斯噪声假定的限制,适用于任何环境下的任何状态转换或测量模型。文献[20-23]利用粒子滤波对纯角度跟踪问题进行了研究,其中,在M. Sanjeev Arulampalam、B. Ristic和N. Gordon出版的专著^[24]中,对纯角度跟踪中的非机动、发生机动、多传感器、有条件限制等情况下的扩展卡尔曼滤波、不敏卡尔曼滤波、粒子滤波等非线性滤波算法进行了仿真研究,并将结果和理论上的最优性能下界CRLB进行比对。表明,粒子滤波在处理纯角度跟踪这类非线性的问题上,滤波结果接近于(Cramér Rao Lower Bound, CRLB)。

近年来由J. M. C. Clark等针对2维或3维的仅有角度量测的跟踪问题提出了转换瑞利滤波(Shifted Rayleigh Filter, SRF)的一种时刻匹配滤波算法,该算法适用于多种场合,而且对于模型的维数没有限制^[25]。仿真表明,在杂波概率高达67%、传感器标准差达到16°的不利情况下,仍然具有很好的估计性能。文献[26]对EKF、UKF、PF、SRF的对比研究表明,PF和SRF的鲁棒性更好,SRF的滤波精度和PF相当,而SRF的计算量要远远小于PF。

2.2.2 方位频率跟踪

如果声纳是窄带的,也能得到频率测量。得到目标的频率测量可以避免一个关键的问题,即目标

运动参数的可观测性问题。使用频率测量不需要本艇机动,唯一的条件是在观察过程中发射频率必须是常数,而且接收频率必须是多普勒频移^[27]。文献[28]讨论了在无虚警检测的假设下,基于频率和方位测量的 TMA 问题。为了更接近海洋实际情况,文献[29]讨论了在低信噪比杂波虚警检测环境下由窄带被动声纳产生方位和频率测量的目标运动分析,以似然函数来计算跟踪参数的最大似然估计。对于多普勒-方位跟踪问题,文献[30]针对匀速直线航行、定深的水下移动噪声源提出了一种利用目标辐射噪声多普勒信息及水面多途反射时延信息的被动定位跟踪算法。文献[31]则完全突破了传统的被动定位的局限性,将信号检测与参数估计融为一体,可有效地解决远距离、低信噪比情况下的目标定位问题。文献[32]研究了方位-频率和多阵联合纯方位运动目标分析,结果表明两种方法虽然不需要观测平台机动,但目标的距离估计与目标的航向角密切相关,因此,应用并不具备普遍性。

2.2.3 其他方法

文献[33]将传统的被动或主动声纳系统中仅用于检测和提供测量的振幅信息(AI)用于被动声纳系统。指出无论有无频率测量,在存在杂波时,可提高估计精度和收敛性,导出了使用振幅信息、基于最大似然估计的概率数据互联方法。

2.3 多基地声纳跟踪

多基地声纳系统是发射点和接收点不在同一位置且相距足够远的主动声纳系统,可以说在一定程度上综合了主动声纳和被动声纳各自的优点。作为一种主动声纳,多基地声纳系统的探测能力不受目标辐射噪声的制约,除发射基地容易暴露外,各接收基地是隐蔽的,由于发射和接收基地分散布放,使得这种系统可覆盖很大的探测范围,搜索目标的效率大为提高^[2]。

2.3.1 多基地声纳研究历史

对于双基地声纳的研究,起源并借鉴于双基地雷达的发展。

50年代,美国国内的一些实验室,开始为美国海军研究部研究双基地声纳的有关问题,后续的研究一度减少。1989年,文献[34]给出了双基地声纳方程,重点阐述了双基地声纳的理论基础和可行性。此外,文中还对双基地配置时,系统的混响特性、多普勒以及直达波抑制等问题进行了简单地叙述。1992年美国海军进行了以航空吊放声纳为主要设备的浅海多基地声纳实验,首次将航空声纳应用于多基地声纳系统,该实验为多基地声纳系统配置

提供了借鉴^[35]。1994年英国国防研究机构研制了一套基于航空声纳浮标的多基地主动声纳系统。该系统由一个声源、一个模拟的目标和至少6个散置的声纳浮标组成,接收设备与发射设备之间通过无线电波进行通讯,多基地波束形成与显示技术提供实时处理和显示不同接收声纳浮标的输出数据。声学定位系统应用波束形成器的输出来确定目标的距离和方位,实现目标声定位^[36]。

2.3.2 多基地声纳研究现状

90年代后期至今,双/多基地声纳的研究逐步升温,成为国内外有关声纳技术和海洋监视技术研究的一个热点问题,出现了一大批研究成果。国内公开发表的文献有[37-41]等。在多基地声纳的研究中,值得一提的是北约的水下战研究中心,他们基于三个模拟的数据库^[42-44]和一些海试试验,联合北约成员国中一批学者成立了多基地声纳跟踪研究小组,对多基地声纳进行了广泛的研究,成果集中报道在2006年的国际信息融合年会^[45-50],散见于其他的一些公开的文献[51,52]等。

在水下目标的跟踪中,例如对于水下潜艇目标的反潜战场环境下,潜艇对直升机威胁相对较小,因此,主动声纳浮标或者吊放声纳可以适当使用在主动方式工作,文献[38]给出了几种多基地的配置方案:

- (1) 舰壳声纳与舰载机吊放声纳构成双基地声纳;
- (2) 吊放声纳和多枚适当分布的被动声纳浮标构成多基地声纳系统;
- (3) 舰壳声纳与多枚被动声纳浮标构成多基地系统。

研究水声通信技术、信息融合技术,将多种平台的水声设备组合成多基地声纳系统将是今后水下目标跟踪中的发展趋势。

3 目标机动模型和跟踪算法

目标机动运动模型实际上是如何表述跟踪滤波中目标的状态方程问题^[53],常见的几种目标运动模型有:匀速运动模型(Constant Velocity, CV)、匀加速模型(Constant Acceleration, CA)、Singer模型、转弯模型、当前机动模型等。对于水下目标,如潜艇,改变航向、航速是最常见的机动方式,因此,匀速运动模型、匀加速模型和转弯模型更适合用来描述目标的机动。

机动目标跟踪方法大致可分为两大类:具有机

动检测的跟踪算法以及自适应跟踪算法, 其中具有机动检测的跟踪算法按照检测到机动后调整的参数又可分为调整滤波器增益的方法和调整滤波器结构的方法。自适应跟踪算法可以分为单模型类算法和多模型类算法两类, 其中, Singer 模型算法、当前统计模型算法、Jerk 模型算法属于单模型的机动目标自适应跟踪算法, 而多模型算法和交互多模型算法则属于基于多模型的自适应跟踪算法。自适应机动目标跟踪算法中的多模型类算法通过多个目标模型或过程噪声级的有效组合来实现对目标机动状态的自适应估计, 能够获得较好的机动目标跟踪效果, 因而被认为是近几十年来机动目标跟踪问题研究最为重要的研究成果, 并已成为较为主流且具有工程实用价值的机动目标跟踪算法^[54]。

4 多目标数据互联

多目标数据互联的方法主要有两类, 一类是只对最新的确认量测集合进行研究, 因而是次优贝叶斯算法, 主要包括最近邻域法、概率最近邻域法、概率数据互联算法、联合概率数据互联算法; 另一类对当前时刻以前的所有确认量测集合进行研究, 给出每一个量测序列的概率, 是一种最优的贝叶斯算法, 包括最优贝叶斯算法和多假设法^[54]。其中, 文献[55]将联合概率数据互联(Joint Probabilistic Data Association, JPDA)方法应用于多传感器多目标被动声纳跟踪问题。指出了同时而非分别地进行每个跟踪报告与所有航迹关联的重要性, JPDA 结构十分适合于被动声纳环境的多目标。当目标的数目增大时, 目标与观测数据之间的关联假设事件的数量呈指数增长, 其计算量也将呈指数增长, 且当两个目标靠得很近时, 有可能导致航迹的偏移和聚合。多假设多目标跟踪算法(Multiple Hypothesis Tracking, MHT)是 1978 年由 Reid 首先提出来的, 它是以“全邻”最优滤波器和 Bar-Shalom 提出的聚概念为基础。在理想假设条件下, MHT 被认为是处理数据互联的最优方法。它的缺点在于过多的依赖目标和杂波的先验知识, 如已进入跟踪的目标数、虚警回波数、新目标回波数、虚假目标密度以及被检测目标密度等。

文献[54]将联合概率数据互联算法、多假设算法和最优贝叶斯算法跟踪杂波环境下密集目标的性能进行了对比, 其中最优贝叶斯算法的均方根位置误差最小; 联合概率数据互联算法的跟踪性能要相对优于多假设算法, 但计算量相对多假设算法要

大; 多假设算法计算量居中, 但跟踪性能相对要差, 算法收敛相对较慢。

4.1 基于粒子滤波的联合概率数据互联

粒子滤波作为求解非线性非高斯问题的有效方法, 在数据关联领域也有着广泛的应用, 文献[56, 57]提出了基于粒子滤波和联合概率数据互联思想的多目标数据互联方法。文献[58, 59]将量测与目标关联概率看作随机变量, 给出了一个基于 Gibbs 采样的方法计算关联概率。

4.2 群目标跟踪

在水面舰艇或潜艇编队中当间距小时, 目标集合会按某一方向作群运动, 这时, 所感兴趣的是群运动, 从而会出现群目标跟踪问题。文献[54]对于群的起始、中心群目标跟踪算法、编队群目标跟踪算法等进行了详细的论述。群目标跟踪在目标跟踪领域形成了一种新的跟踪问题。

5 评述与总结

本文首先论述了对水下机动目标的跟踪方法。在纯角度跟踪等系统非线性情况下, 结合状态估计技术的发展, 重点论述了不敏卡尔曼滤波、粒子滤波和转换瑞利滤波在纯角度跟踪中的应用。文中回顾了多基地声纳的研究历史和现状。最后结合近几年出现的基于粒子滤波的联合概率数据互联和群目标跟踪, 对多目标跟踪的数据互联进行了简要论述。总结如下:

(1) 滤波算法的对比: 扩展卡尔曼滤波(EKF)作为求解非线性滤波问题的近似方法, 性能随着非线性强度变大而明显下降, 有时甚至发散; 不敏卡尔曼滤波(UKF)利用样本来逼近状态的概率密度函数, 性能较 EKF 好, 但 EKF 和 UKF 都用高斯分布来逼近系统状态的后验概率密度, 如果系统状态的后验概率密度函数是非高斯的, 那么两者都将产生很大的误差。转换瑞利滤波(SRF)滤波精度可以和粒子滤波(PF)相比拟, 但也假设目标状态的条件概率密度服从高斯分布。粒子滤波是一种基于 Monte Carlo 仿真的最优回归贝叶斯滤波算法, 将所关心的状态矢量表示为一组带有相关权值的随机样本, 并且基于这些样本和权值可以计算出状态估值。与 EKF、UKF 相比, 这种方法不受线性化误差或高斯噪声假定的限制, 适用于任何环境下的任何状态转换或测量模型。粒子滤波的计算量远远超过 UKF 和 EKF, 但随着计算机能力的不断提高, PF 将具

有广泛的应用前景。

(2) 数据互联的考虑: 与雷达、红外等传感器相比, 水声传感器的作用距离很小, 探测到多个目标的概率很低。因此, 在目标数目少的情况下, 比较几种最优和次优的贝叶斯类数据互联算法, 我们认为联合概率数据互联算法将更便于水声跟踪工程的实现。

(3) 双多基地声纳配置的考虑

对于水下机动目标的跟踪, 发展大功率、低频、宽带换能器提高水声传感器的作用距离固然是一方面, 但更重要的是研究水声通信技术、信息融合技术等, 将多种平台的水声设备组合成多基地声纳使用, 形成更大范围的监视跟踪网络。如何配置现有的传感器, 使之达到某种准则下的最优跟踪性能, 已经发展成为信息融合中的一个研究方向——传感器管理问题。双(多)基地声纳是今后水下目标跟踪研究的热点问题之一。

参 考 文 献

- [1] 何友, 王国宏. 多传感器信息融合及应用(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
HE You, WANG Guohong. Multisensor information fusion with application(second edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [2] 刘孟庵, 连立民. 水声工程[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2002.
LIU Meng'an, LIAN Limin. Underwater acoustic engineering[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2002.
- [3] 万木春. 俄罗斯海军的潜艇反潜战术[J]. 现代舰船, 1996, 10: 8-11.
WAN Muchun. Russia navy submarine anti-submarine tactical[J]. Modern ships, 1996, 10: 8-11.
- [4] Samuel Blackman, Robert Popoli. Design and analysis of modern tracking systems[M]. Artech House, 1999.
- [5] Steven C Nardone, Allen G Lindgren, Kai F Gong. Fundamental properties and performance of conventional bearings-only target motion analysis[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 1984, 29(9): 775-787.
- [6] Fogel E, Gavish M. Nth-order dynamics target observability from angle measurements[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1988, 24(3): 305-308.
- [7] Song T L. Observability of target with bearings-only measurements[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(4): 1468-1472.
- [8] Jauffret C, Pillon D. Observability in passive target motion analysis[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(4): 1290-1300.
- [9] Shar P, Li X R. A practical approach to observability of bearings-only target tracking[J]. Processing of SPIE, 1999, (3809): 514-520.
- [10] Hassab J C. Underwater signal and data processing[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1989.
- [11] Aidala V J, Nardone S C. Biased estimation properties of the pseudo-linear tracking filter[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1982, 18(4): 432-441.
- [12] Aidala V J, Hammel S E. Utilization of modified polar coordinates for bearings-only tracking[J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1983, AC-28(3): 283-294.
- [13] Song T A, Speyer J L. A stochastic analysis of the modified gain extended Kalman filter with application to estimation with bearings-only measurements[J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1985, AC-30(10): 940-949.
- [14] S. Koteswara Rao. Modified gain extended Kalman filter with application to bearings-only passive manoeuvring target tracking[J]. IEE Proc.-Radar Sonar Navig., 2005, 152(4): 239-244.
- [15] Blackman S S, Roszkowski S H. Application of IMM filtering to passive ranging[J]. Proc. SPIE, 1999, 3809: 270-281.
- [16] Kirubarajan T, Bar-Shalom Y, Lerro D. Bearings-only tracking of maneuvering targets using a batch-recursive estimator[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(3): 770-780.
- [17] Simon J. Julier, Jeffrey K. Uhlmann. A new extension of the kalman filter to nonlinear systems[J]. SPIE, 1997, (3068): 182-193.
- [18] Simon J. Julier, Jeffrey K. Uhlmann. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. IEEE, Trans. On AC, 2000, 45(3): 477-482.
- [19] Gordan N J, Salmond D J, Smith A F M. Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation[J]. IEE Proc.-F, 1993, 140(2): 107-113.
- [20] Thomas Bréhard, Jean-Pierre Le Cadre. Initialization of particle filter and posterior Cramér-Rao bound for bearings-only tracking in modified polar coordinate system[R]. Institut National De Recherche En Informatique Et En Automatique Report, 2004.
- [21] Lin X, Kirubarajan T, BarShalom Y, Simon Maskell. Comparison of EKF, pseudomeasurement and particle filters for a bearing-only target tracking problem[J]. SPIE, 2002, (4728): 240-250.
- [22] M. Sanjeev Arulampalam, Ristic B, Gordon N, et al. Bearings-only tracking of manoeuvring targets using particle filters[J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2004, 15: 2351-2365.
- [23] T. BRÉHARD, J.-P. LE CADRE. Hierarchical particle filter for bearings-only tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(4): 1567-1585.
- [24] M. Sanjeev Arulampalam, Ristic B, Gordon N. Beyond the Kalman filter: particle filters for tracking applications[M]. Artech House, 2004.
- [25] Clark J M C, Maskell S, Vinter R B, et al. Shifted rayleigh filter: a new algorithm for bearings only tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(4): 1373-1384.
- [26] Sanjeev Arulampalam, Martin Clark, Richard Vinter. Performance of the shifted rayleigh filter in single-sensor bearings-only tracking[C]. Processing of the 10th International Conference on Information Fusion, Canada, 2007.
- [27] 关欣, 何友, 衣晓. 水声传感器信息处理技术[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(4): 1-6.
GUAN Xin, HE You, YI Xiao. An overview on the technology of acoustic sensors information processing[J]. Fire Control and Command Control, 2004, 29(4): 1-6.
- [28] Nardone S C, Graham M L. A closed form solution to bearings-only target motion analysis[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1997, 22(1): 168-178.
- [29] Jauffret C, Bar-Shalom Y. Track formation with bearing and frequency measurements in clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(6): 999-1009.
- [30] 陈励军. 利用多普勒信息的多途被动定位方法[J]. 声学技术, 1998, 17(4): 155-158.
CHEN Lijun, A multipath passive location algorithm using Doppler information[J]. Technical Acoustics, 1998, 17(4): 155-158.
- [31] 毛卫宁, 陈励军. 一种新的目标运动分析方法[J]. 声学学报, 1998, 23(5): 417-421.

- MAO Weining, CHEN Lijun. A novel method for analysis of target motion analysis[J]. *Acta Acustica*, 1998, **23**(5): 417-421.
- [32] 杜选民, 姚蓝. 基于方位-频率及多阵方位的无源目标跟踪性能研究[J]. *声学学报*, 2001, **26**(2): 127-134.
DU Xuanmin YAO Lan. Performance of passive target tracking using bearing-frequency and bearings of multiple arrays[J]. *Acta Acustica*, 2001, **26**(2): 127-134.
- [33] Kirubarajan T, Bar-Shalom Y. Targer motion analysis in clutter for passive sonar using amplitude information[C]. Proc.1995 American Control Conf., Seattle, WA, June 1995.
- [34] Henry Cox. Fundamentals of bistatic active sonar[C]. Underwater acoustic data Proeessing. Klvwer academic Publishers, 1989.
- [35] James J Hirst III. An initial investigation into the methodologies to be used for helicopter-based bistatic sonar in shallow water[R]. AD-A 257 865, 1992.
- [36] Sullivan, S. F., Jr.; Hursky, P. Measurement of sea bed topography and bistatic scattering coeffieients with steered frequency source arrays[C]. *OCEANS'94*, 1994, **3**(13): 200-206.
- [37] 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.
DU Xuanmin, YAO Lan. Passive bearings-only target motion analysis based on association of multiple arrays[J]. *Acta Acustica*, 1999, **24**(6): 604-610.
- [38] 赵俊渭, 闫宜生, 丁纬, 等. 双基地声纳的性能与展望[J]. *声学与电子工程*, 1991, (3): 29-33.
ZHAO Junwei, Yan Yisheng, DING Wei, et al. Performance and view of bistatic sonar[J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 1991, (3): 29-33.
- [39] 杨日杰, 何友, 孙明太. 主/被动联合多基地航空搜潜范围分析[J]. *航空学报*, 2004, **25**(4): 381-384.
YANG Rijie, HE You, SUN Mingtai. Scope analysis for active/passive combined multi-base air anti-submarine[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2004, **25**(4): 381-384.
- [40] 胡友峰, 詹艳梅, 孙进才. 基于状态矢量融合的多基地无源目标运动分析[J]. *声学学报*, 2002, **27**(4): 316-320.
HU Youfeng, ZHAN Yanmei, SUN Jincai. Passive target motion analysis of multiple arrays based on state vector fusion[J]. *Acta Acustica*, 2002, **27**(4): 316-320.
- [41] 关欣, 何友, 衣晓. 双基阵纯方位水下被动目标跟踪性能仿真分析[J]. *系统仿真学报*, 2003, **15**(10): 1464-1466.
GUAN Xin, HE You, YI Xiao. Emulational analysis on the performance of underwater bearing-only passive target tracking using two arrays[J]. *Journal of System Simulation*, **15**(10): 1464-1466.
- [42] P de Theije, H Groen. Multistatic sonar simulations with SIMONA[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Information Fusion, July 2006, Florence, Italy.
- [43] Grimmitt D, Coraluppi S. Contact-level multistatic sonar data simulator for tracker performance assessment[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Information Fusion, July 2006, Florence, Italy.
- [44] La Cour B, Collins C, Landry J. Multi-everything sonar simulator (MESS)[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Information Fusion, July 2006, Florence, Italy.
- [45] Willett P, Coraluppi S. MLPDA and MLPMHT applied to MSTWG data[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Information Fusion, July 2006, Florence, Italy.
- [46] Hempel C. Probabilistic multi-hypothesis tracking for distributed multi-static active sonar[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Information Fusion, July 2006, Florence, Italy.
- [47] Krout D, Fox W, Hazen M, et al. Intelligent ping sequencing for multistatic sonar systems[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Information Fusion, July 2006, Florence, Italy.
- [48] P de Theije, Kester L, Bergmans J. Application of the M6T tracker to simulated and experimental multistatic sonar data[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Information Fusion, July 2006, Florence, Italy.
- [49] Gerard O, Coraluppi S, Carthel C, et al. Benchmark analysis of NURC multistatic MHT capability[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Information Fusion, July 2006, Florence, Italy.
- [50] La Cour B. Bayesian multistatic tracking: results on simulated data from the multistatic tracking working group[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Information Fusion, July 2006, Florence, Italy.
- [51] Coraluppi S, Carthel C. Distributed tracking in multistatic sonar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, **41**(3): 1138-1147.
- [52] Stefano Coraluppi, Doug Grimmitt. Multistatic sonar tracking[J]. Proceedings of SPIE, 2003, (5096): 399-410.
- [53] 孙仲康, 郭福成, 冯道旺, 等. 单站无源定位跟踪技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
SUN Zhongkang, GUO Fucheng, FENG Daowang, et al. Passive location and tracking technology by single observer[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [54] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用(第 2 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
HE You, XIU Jianjuan, ZHANG Jingwei, et al. Radar Data Processing With Applications(2th ed.)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [55] Fortmann T E, Bar-Shalom Y, Molly Scheffe. Sonar tracking of multiple targets using joint probabilistic data association[J]. *IEEE Jouranl of Oceanic Engineering*, 1983, **OE-8**(3): 173-184.
- [56] Rickard Karlsson, Fredrik Gustafsson. Monte carlo data association for multiple target tracking[J]. *IEE Target Tracking: Algorithms and Applications*, 2001, **1**(13): 1-5.
- [57] Frank O, Nieto J, Guivant J, et al. Multiple target tracking using sequential monte carlo methods and statistical data association[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent robots and Systems*, 2003, **3**(27): 2718-2723.
- [58] Carine Hue, Jean-Pierre Le Cadre, Patrick Pérez. Tracking multiple objects with particle filtering[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, **38**(3): 791-812.
- [59] Carine Hue, Jean-Pierre Le Cadre, Patrick Pérez. Sequential monte carlo methods for multiple target tracking and data fusion[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, **50**(2): 309-325.