一种对水下运动目标被动检测跟踪的一体化算法

游 波, 张明敏
(海军工程大学电子工程系, 湖北武汉 430033)

摘 要: 提出一种基于匹配场和长项积分混合处理的被动检测跟踪一体化算法. 将贝叶斯准则下的概率数据关联技术引入匹配场和长项积分混合处理, 构造检验统计量, 计算后验关联概率, 建立起从跟踪器到检测器的信息反馈; 在跟踪进程中分别采用单一模式和多模式组合对目标的运动状态进行近似. 给出了一体化算法的仿真实例, 并利用一组海试数据对算法的有效性进行了验证.

关键词: 匹配场处理; 长项积分; 检测; 跟踪; 一体化
中图分类号: TB5 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2006) 04-0737-04

An Integrative Processing Algorithm of Passive Detection and Tracking of Underwater Moving Target

YOU Bo, ZHANG Ming-min
(Department of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract An integrative algorithm of passive detection and tracking of underwater moving target based on the co-processing algorithm of Matched-Field and Long Time Integration is proposed The probabilistic data association technique is introduced into the co-processing algorithm. First constitute the test statistic and then calculate the posterior data association probability to establish the information fed back from the tracker to the detector On the process of detecting and tracking, the signal model method and the multiple models combination method are used to simulate the moving state of the target The integrative algorithm is proved effective by the data from the emulator experiment and the experiment on the sea

Key words matched-field processing; long time integration; detection; tracking integrative

1 引言

基于匹配场与长项积分混合处理 (MFP/LTI)的水下运动目标被动检测跟踪技术[1,2], 是将目标运动分析逆问题转为大量的正问题处理. 它通过对搜索区域中, 在目标运动参数(信号频率、初始位置、航速、航向等)可能的范围内, 将利用声场传播模型获得的大量的仿真拷贝场信号与接收阵的测量场信号, 在一段较长的观测时间内进行匹配处理. 即将该时间段内的一系列短时谱进行非相干累积, 构成一长项谱值, 当仿真拷贝场中的目标运动轨迹与真实轨迹一致时, 长项积分谱值应达到最大, 由此得到目标的轨迹估计. 由于该算法对在时间和空间上变化的多维谱直接积分, 避免了对短时谱谱峰的检测、跟踪等难点, 同时也摆脱了处理周期受目标方位和频率变化的制约, 使积分时间不受限制. 积分时间越长累计能量越高, 获取的处理增益就越大, 从而提高对弱目标的检测和跟踪能力.

本文将贝叶斯准则下的概率数据关联技术[3,4]引入MFP/LTI混合处理, 首先构造检验统计量, 计算后验关联概率和空变阈, 通过时间域的连续递归和空间域的数据关联, 形成信息在跟踪器和检测器间的双向流动, 从而实现对水下运动目标的联合检测和跟踪; 在数据关联滤波中分别采用了单一模式和多模式组合对目标的运动状态进行近似, 给出了一体化算法的仿真实例, 并利用一组海试数据对算法的有效性进行了验证.

2 基于MFP/LTI混合处理的检测跟踪一体化算法

该算法的设计思想如图 1所示, 是将MFP/LTI输出的目标函数输入贝叶斯准则下考虑目标信号幅度信息的概率数据关联滤波器 PADF-BDAI 将有效观测值的信号幅度、新息协方差、预估的目标位置等跟踪信息反馈到

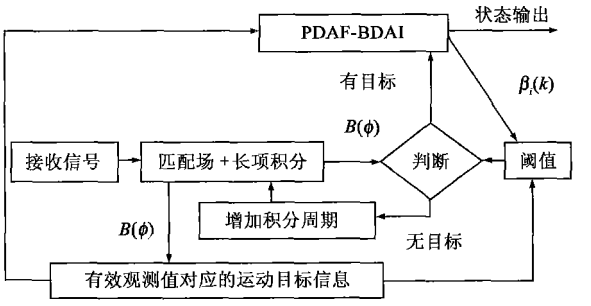


图 1 一体化算法示意图

收稿日期: 2005-01-31; 修回日期: 2005-10-06

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

PADF-BDAI滤波器,形成受到上一步跟踪结果影响的,随空间位置变化的阈值.图中,$B(\Phi)$为MFP/LTI混合处理的输出函数,$\beta_i(k)$表示k时刻第i个观测值是由目标产生的概率,称作后验关联概率,满足$\sum\beta_i(k)=1$,$i=0,\cdots,m$,m为观测值的个数.

2.1 一体化算法基本思想

2.1.1 目标函数

MFP/LTI混合处理是将基阵接收到的目标辐射声信号与根据海洋传播条件建立的声场预报模型、声源的可能运动参数推出的接收声场的拷贝信号,在一段时间内分N个观测时间周期,在六维参数空间中进行相关匹配处理并累积,得到目标函数:

$$B(r_i,\ \beta_i,\ \alpha,\ v,\ z_s,\ f_0)=\sum_{q=1}^{N}|c^q|\Big/\sqrt{\sum_{q=1}^{N}(s^q)^2} \tag{1}$$

r_i、β_i为目标初始距离和方位,a,v,z_s分别为目标航向、航速和深度,f_0为声源频率,c^q是第q个时间周期内基阵的测量信号与拷贝信号的相关表示式,$(s^q)^2$为同一时间段内基阵拷贝信号的自相关:

$$c^q=\sum_{p=0}^{P-1}\sum_{m=0}^{M-1}\eta_{p,m}d^q_{p,m}(s^q_{p,m})^*,\ (s^q)^2=\sum_{p=0}^{P-1}\sum_{m=0}^{M-1}\eta_{p,m}|s^q_{p,m}|^2 \tag{2}$$

式中,P是各时间段内的抽样点数,M是基阵的基元数,$\eta_{p,m}$为时空窗函数,$d^q_{p,m}$与$s^q_{p,m}$分别表示第q时间段内对第m个基元测量信号与仿真信号的时间抽样.

由于MFP/LTI混合处理的能量累积时间长,因此可以用若干段首尾相接的匀速直线运动对目标的机动轨迹进行近似.当搜索到目标的初始位置、初始航向和航速后,只需继续对随后可能的每次转向时刻、转向后的航向航速进行搜索,就可确定目标机动的轨迹,从而实现对目标的跟踪.

2.1.2 概率数据关联滤波器的检验统计量

在目标运动轨迹修正阶段,一体化算法将以MFP/LTI混合处理中用寻优算法搜索到的目标转向时刻为中心,累积若干个积分周期所得到的目标函数进行平方后作为数据关联滤波器的检验统计量$\tilde{B}$.根据仿真实验及对海试数据的统计分析,对于存在一个目标(K)及无目标(H)时$\tilde{B}$的概率密度函数具有以下分布形式:

$$f_K(\tilde{B})=\alpha_0*\exp(-\alpha_1\tilde{B}),\ f_H(\tilde{B})=\beta_0*\exp(-\beta_1\tilde{B}) \tag{3}$$

α_0、α_1、β_0、β_1是在一定信噪比及具体海洋环境下对检验统计量$\tilde{B}$的概率密度函数进行拟合得到的参数.在以下的试验中,这些参数经过600次Monte Carlo实验后统计获得.式(3)与文献[4]中的式(14)、(15)有相似的形式.

2.1.3 PDAF-BDAI的检测阈

经典的运动状态方程和观测方程写作:

$$x(k)=F\cdot x(k-1)+\Gamma v(k-1),$$
$$z(k)=H\cdot x(k-1)+\Phi w(k-1) \tag{4}$$

$x(k)$为系统状态向量,$z(k)$为观测向量,状态转移矩阵F和观测矩阵H设为已知,相应的系统噪声$v(k)$和观测噪声$w(k)$相互独立,并假设为高斯白噪声序列.

概率数据关联滤波是一种次最佳贝叶斯估计算法,它对有效测量区域内m个有效观测值分别计算后验关联概率$\beta_i(k)$,以其作为权值对观测值进行综合,将结果作为估计值.

$$\hat{x}(k|k)=\sum_{i=0}^{m}\hat{x}_i(k|k)\beta_i(k) \tag{5}$$

k为离散时间序列,符号$(k|i)$表示在获取0至i时刻观测值的基础上对k时刻的状态估计,$\hat{x}_i(k|k)$表示第i个观测值由真实目标产生时,在k时刻更新的状态估计值.有效测量区域是以k时刻估计值为中心的一定区域,观测值以较高概率落在其中[3].

PDAF-BDAI滤波器将目标信号的幅度信息也一同引入观测向量,$Z(k)=\{z_i(k),a_i(k)\}_{i=1}^{m}$.这样,观测结果将从两个方面影响后验关联概率:一个具有更高信号幅度的观测向量,无论其在有效区域的位置,将产生较高的后验关联概率;而对于具有相近信号幅度的观测向量,其后验关联概率主要取决于它们在有效区域中的位置.由Bayes定理推导出的阈值计算公式如下[4,5]:

$$\tilde{B}\geqslant\frac{1}{2(\beta_1-\alpha_1)}\cdot v_i(k)^TS(k)^{-1}v_i(k)+\eta \tag{6}$$

新息$v_i(k)$、新息协方差$S(k)$受后验关联概率影响,因空间位置而异,因而$\tilde{B}$是空变检测阈.η是与检测概率、信噪比和经验值有关的参数.

2.1.4 后验关联概率

综上所述,后验关联概率$\beta_i(k)$建立起从跟踪器到检测器的信息反馈.在一体化进程中,跟踪结果正是通过$\beta_i(k)$来影响下一时刻目标位置的预估值,进而影响阈值,影响下一步的检测.PDAF-BDAI后验关联概率的表达式[4,5]:

$$\beta_i(k)=\begin{cases}c\cdot\frac{\beta_0}{\alpha_1}l\cdot\sqrt{2p\frac{\beta_1-\alpha_1}{\beta_1}S(k)}\cdot\left[\left(\frac{\beta_1}{\beta_1-\alpha_1}\right)^{n_z/2}-\exp(-\alpha_1\eta)\right], & i=0\\ c\cdot\exp\left((\beta_1-\alpha_1)a_i(k)-\frac{1}{2}v_i(k)^TS(k)^{-1}v_i(k)\right), & 1\leqslant i\leqslant m\end{cases} \tag{7}$$

n_z为观测空间的维数,l为单位体积内的虚警数目,c为系数.

2.2 单模式和多模式跟踪技术

根据目标可能出现的运动状态,定义六种不同的运动模式(M^i,$i=0,\cdots,5$):无目标零模式、匀速直线运动、接近于匀速直线的运动、匀加速直线运动、接近于匀加速的运动和转向运动模式,矩阵$\boldsymbol{F}$、矩阵Γ和系统噪声分别对应不同的形式[5,6],矩阵Φ定义为单位矩阵.目标机动轨迹可看作是这六种模式的某种组合.

单一模式中的状态转移矩阵一般采用匀速直线运动

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

模式. 如果目标发生较大幅度的机动, 可以通过加大系统噪声, 实现对接近匀速运动或接近直线运动目标航迹的跟踪, 单一模式对目标机动的宽容性不大.

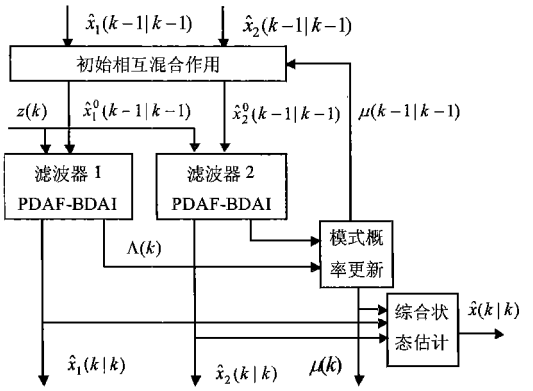


图 2　多模式算法示意图

多模式跟踪技术将机动看作不同运动模式间的切换, 根据不同的模式概率对各种模式下状态估计量进行综合, 得到精确度较高的跟踪效果. 近年来, 该技术已广泛应用于对空预警系统、地面目标定位跟踪系统等领域, 在军事上有着良好的应用前景. 该算法[5] (MM PDAF-BDAI)是一个循环递归的过程, 如图 2所示, 包括初始互作用混合器、PDAF-BDAI滤波器、模式概率更新器、估计状态综合器. 每个滤波器对应一种模式. 图中, $\Lambda(k)$表示每种模式的似然函数[5], $\mu(k)$为模式概率.

3　仿真结果

为减少运算量, 假设目标深度固定, 且辐射频率已知, (在处理实际问题中, 对目标信号频率的搜索, 可以通过在硬件结构上采用多路并行处理, 覆盖频率变化范围的方法来完成). 采用简正波模型的 MODLAB方法生成拷贝场信号, 海洋环境参数见表 1. 本舰初始位置即为坐标原点 (0, 0), 航向 0度, 航速 4m/s目标初始位置 (20000m, 0), 目标机动参数见表 2. 用模拟退火法对描述声源目标的运动参数进行搜索寻优. 在轨迹形成阶段, 需要搜索的运动参数设为目标初始距离、初始方位、初始航向、初始航速; 而在轨迹修正阶段, 需要搜索的运动参数为目标的机动时刻、机动后的航向、航速. 目标声源发出频率为 100Hz的单频信号, 信噪比为 - 20dB. 用于正交解调的信号频率取为 90Hz, 接收阵为水平拖曳阵, 相邻基元间隔 3m, 共 32个基元. 目标和拖曳阵深度定为 20m. 仿真程序分别以组合一 (M^0、M^1、M^2)、组合二 (M^0、M^1、M^5)、单一模式 (M^2)和单纯的 MFP/LTI跟踪算法四种方法进行. 经过 200次 Monte Carlo实验, 得到轨迹曲线如图 3、图 4、图 5所示.

表 1　海洋环境参数

深度 m	声速 m/s	密度 g/cm³
0	1500	1.0
50	1500	1.0
50+	1850	2.0

表 2　目标机动参数

转向时刻 s	航向 (度)	航速 m/s
0	- 30	5.0
500	60	7.0
800	- 30	4.0

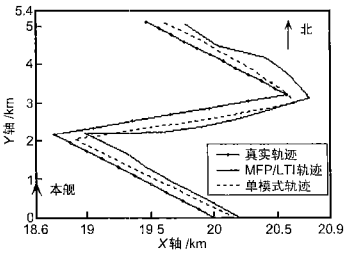


图 3　MFP/LTI算法轨迹与单模式一体化轨迹比较图

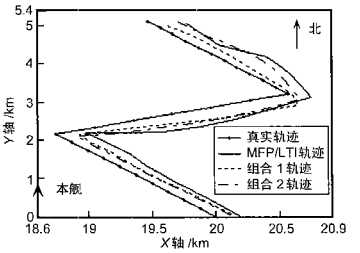


图 4　MFP/LTI算法轨迹与多模式一体化轨迹比较图

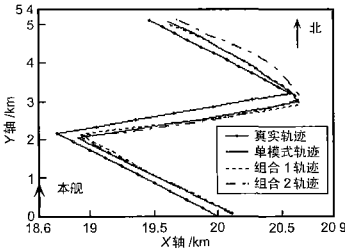


图 5　一体化各算法轨迹图

式 (4)中的系统状态向量 x(k)在 M^0、M^1、M^2 中设为 (ξ, $\dot{\xi}$, η, $\dot{\eta}$), 包括X 轴Y 轴的位移和速度, 在转向模式 M^5 中设为 (ξ, $\dot{\xi}$, η, $\dot{\eta}$, Ω), Ω为待估计的转向角速度[6]. MFP/LTI混合处理的累积时间为 12个积分周期 (N = 12, 约 5.12min), 组合一系统噪声标准差 (q_i表示模式 M^i 对应的系统噪声方差, i = 0, …, 5)取为 $\sqrt{q0} = \sqrt{q1} = 0.002m/s^2$, $\sqrt{q2} = 0.14m/s^2$; 组合二中 $\sqrt{q0} = \sqrt{q1} = 0.03m/s^2$, $\sqrt{q5} = 0.14m/s^2$; 单模式系统噪声标准差 $\sigma_p = 0.01m/s^2$. 三种组合的观测噪声标准差 $\sigma_m = 50m$, 虚警概率 $l = 10^{-6}$.

由图 3可见, 单模式一体化算法轨迹优于单纯 MFP/LTI跟踪算法, 后者的轨迹在第二次转向时刻附近起伏明显; 图 4比较了多模式组合和单纯 MFP/LTI算法轨迹, 其中组合一由于考虑了匀速直线运动和系统噪声较高的接近于匀速直线的运动, 轨迹平缓收敛; 包含转向模式的组合二的跟踪效果并不理想, 原因可能是 MFP/LTI处理器输出数据率不高, 从而导致转向角速度的估计不够准确所致. 在一体化算法中, MFP/LTI混合处理约 2.56min向 PDAF-BDAI滤波器输出该段时间内某一时刻点目标可能出现的若干位置, 滤波器计算不同位置点对应的后验关联概率, 形成相应阈值进行判断. 可见两次输出的间隔时间长使得前后速度的相关性变弱, 直接影响了转向角速度的估计精度. 图 5比较了一体化算法的三种组合, 其中组合一和单模式与真实轨迹吻合较好.

4　对海试数据的处理

试验海域实际测得的环境参数见表 3. 本舰初始位于坐标原点 (0, 0), 漂泊状态, 漂泊航向 - 32.4度, 航速 0.2m/s, 接收阵为 64元水平直线阵, 阵元间距为 2.5m, 入水深度 10m. 目标初始距离 4638m, 方位 169.4度, 初始航

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

向 157.3度,航速 2.2m/s做近似于匀速直线的运动;由于条件的限制,海试数据是在目标声源发射脉冲信号下获取的.声源发射频率为 113Hz的 PCW 信号,脉冲宽度 300ms,重复周期为 1.5s.我们姑且将接收信号视为在发射期间信噪比高(约 15dB),而在脉冲间歇期间信噪比极低,存在很大起伏的目标信号,以此来近似检验算法的有效性.用于正交解调的信号频率为 105Hz,对解调后的信号采样率为 20Hz.

表 3 海洋环境参数

深度 m	声速 m/s	密度 g/cm^3	深度 m	声速 m/s	密度 g/cm^3
1.606	1540.94	1.021	378.583	1497.21	1.026
55.322	1530.94	1.023	390.0	1497.0	1.026
91.175	1520.95	1.024	391.0	1690.0	2.0
188.117	1510.95	1.025	420.0	1850.0	2.0
298.247	1500.95	1.026			

MFP/LTI混合处理的累积时间为 12个积分周期,组合一系统噪声标准差 $\sqrt{q0}=\sqrt{q1}=0.005m/s^2$, $\sqrt{q2}=0.01m/s^2$,组合二 $\sqrt{q0}=\sqrt{q1}=0.02m/s^2$, $\sqrt{q5}=0.03m/s^2$;单模式系统噪声标准差 $\sigma_p=0.01m/s^2$.三种组合的观测噪声标准差 $\sigma_m=50m$,虚警概率 $l=10^{-6}$.

图 6为一小时的跟踪轨迹图,一体化算法组合的轨迹与真实轨迹吻合得较好.图 7、图 8为第 12min到第 32min的轨迹图,其中从第 27min到第 30min,声源停止发射信号,单纯的 MFP/LTI算法在这 3min内的轨迹有较大幅度的偏离,而一体化算法由于引入数据关联技术,在其间(小于一个积分周期)仍能根据前一周期的运动状态作出判断,当声源恢复发射信号后,轨迹快速收敛,如图 7.由于目标作近似的匀速直线运动,图 8中一体化算法的几种组合,包括单模式、多模式组合 1和 2的跟踪效果相近.由此可见一体化算法组合均能对作接近于匀速直线运动的目标进行精度较高的跟踪.

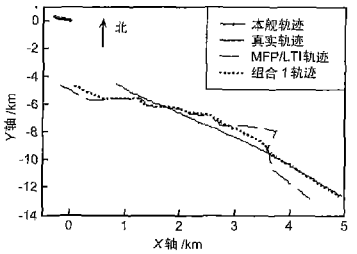


图 6 1h跟踪轨迹图

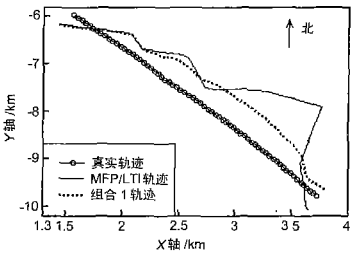


图 7 20min跟踪轨迹图 1

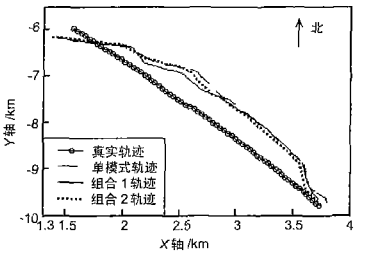


图 8 20min跟踪轨迹图 2

5 结论

本文将概率数据关联技术应用于 MFP/LTI混合处理,构造概率数据关联滤波器的检验统计量,利用从跟踪器反馈的有效观测值的信号幅度和目标运动状态等有用信息,基于 Bayes定理计算空变阈,实现检测跟踪一体化处理.在此基础上引入多模式技术,构造 MMPDAF-BDAI滤波器.通过仿真实验并利用一组海试数据对单模式、多模式不同组合和单纯的 MFP/LTI跟踪算法进行验证比较.结果表明:一体化算法组合,包括单模式和多模式组合,较单纯的 MFP/LTI跟踪算法具有更高的时效性、准确性和稳定性;所采用的一体化算法中,不包含目标转向模式的多模式组合具有更高的跟踪精度,而单模式在同样的跟踪精度要求下,有模型简单,运算量小的特点.

参考文献:

[1] JA Fawcett, BHMaranda. A hybrid targetmotion analysis/matched field processing localization method[J]. JASA, 1993, 94(3): 1363-1371.

[2] 张明敏,孙青虎.一种适用于小信噪比条件的运动声源目标定位方法[J].海洋技术, 1998, 17(1): 47-51.
ZHANG Ming-min, Sun Qing-hu. A moving source target localization method for low-SNR case[J]. Ocean Technology, 1998, 17(1): 47-51. (in Chinese)

[3] Yaakov Bar-Shalom, Thomas E. Fortman. Tracking and data association[M]. New York: Academic Press, 1988.

[4] PeterWillett, Ruixin Niu, Yaakov Bar-Shalom. Integration of bayes detection with target tracking[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2001, 49(1): 17-29.

[5] 游波,张明敏.基于匹配场和长项积分混合处理的多模式检测跟踪一体化算法[J].信号处理, 2005, 21(1): 52-56.
YOU Bo, ZHANG Ming-min. The integrative processing algorithm of detection with target tracking based on the co-processing of matched-field and long time integration[J]. Signal Processing, 2005, 21(1): 52-56. (in Chinese)

[6] D Lerro, Yaakov Bar-Shalom. Interacting multiple model tracking with target amplitude information[J]. IEEE Trans on Aerospace Electronic System, 1993, 29(4): 494-509.

作者简介:



游 波 女,1976年 11月生于江苏省泰州市,现任海军工程大学电子工程系水声教研室讲师.主要研究方向为水声信号处理,
E-mail: bbyouyou2002@yahoo.com.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net