第 22 卷　第 8 期　　太赫兹科学与电子信息学报　　Vol.22, No.8
2024 年 8 月　　Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology　　Aug., 2024

文章编号：2095-4980(2024)08-0901-07

弱目标自动跟踪中的线谱检测

李彦楠[1]，史明佳[2]，王　伟[1]，刘志鹏[1]

(1.中国船舶集团有限公司 第七一五研究所，浙江 杭州 310023；2.哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院，黑龙江 哈尔滨 150000)

摘　要：为提高在低信噪比及多目标干扰下的被动弱目标自动检测、跟踪能力，提出一种带有多线谱融合、优选的线谱目标自动跟踪算法。该算法基于线谱检测，对融合多线谱特征的线谱目标进行自动跟踪，确定线谱目标的建立、删除、融合及关联准则，采用针对航迹的多假设跟踪(MHT)算法对多目标进行自动跟踪，具有计算量小，弱目标跟踪能力强的优点。海试数据分析表明，在强目标干扰的情况下，本算法仍可以对具有线谱特征的弱目标进行稳定跟踪。

关键词：线谱检测；线谱跟踪；线谱融合；多目标跟踪算法；多假设跟踪

中图分类号：TN911.7　　**文献标志码**：A　　**doi**：10.11805/TKYDA2023225

Weak target tracking algorithm based on line spectrum detection

LI Yannan[1], SHI Mingjia[2], WANG Wei[1], LIU Zhipeng[1]

(1.The 715th Research Institute of China Shipbuilding Group Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 310023, China;
2.College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150000, China)

Abstract: To enhance the automatic detection and tracking capabilities of passive weak targets under low signal-to noise ratios and in the presence of multiple target interference, a novel algorithm with multi-line spectrum fusion and optimal line spectrum target automatic tracking is proposed. This algorithm is based on line spectrum detection and automatically tracks targets with fused multi-line spectrum features, establishing the criteria for the creation, deletion, fusion, and association of line spectrum targets. It employs a Multi-Hypothesis Tracking(MHT) algorithm tailored for trajectories to automatically track multiple targets, offering the advantages of low computational complexity and strong weak target tracking capability. Analysis of sea trial data indicates that even in the presence of strong target interference, this algorithm can still provide stable tracking for weak targets with line spectrum characteristics.

Keywords: line spectrum detection; line spectrum tracking; line spectrum fusion; multi-target tracking algorithm; Multi-Hypothesis Tracking

随着减振降噪技术的不断发展，舰船辐射噪声显著降低。与此同时，人类海洋活动的增加，导致了海洋环境背景噪声的提高。这一趋势使声呐平台在探测低噪声和安静型水下目标的难度日益增加。目标辐射噪声的功率谱通常有连续形和线形谱(简称线谱)两种结构，相对于连续谱，线谱信号通常具有更好的相位稳定性，以及更高的强度。在被动探测中，相对于宽带检测，线谱检测具有更远的作用距离，适用于水面和水下目标的检测，已成为被动声呐目标检测的重要手段，并成为当前声呐科技研究的热点之一。

线谱检测相对于宽带检测有很大优势，对于水下目标，尤其是安静型潜艇目标的探测主要通过线谱检测进行。由于多途效应和多普勒频移等因素的干扰，低噪声水下目标的线谱经常会出现时隐时现的情况，给线谱检测带来很大的困难。为解决这个问题，提出了多种改进方法，其中线谱跟踪算法是最有效的方法之一。线谱跟踪利用多帧数据延时对线谱进行判决，从而获得更强的线谱检测能力。线谱跟踪方法主要有：最大似然方法、基于统计模型类方法、基于图像处理类方法、基于神经网络类方法以及专家系统等。D V Cappel 等[1]将隐马尔可夫模型引入线谱跟踪，对线谱信号建立该模型，进行多帧数据的延迟判决。该方法对弱线谱信号的跟踪性能较好，但运算量较大。谢贤亚等[2]采用EM(Expectation-Maximization)算法对原隐马尔可夫模型线谱跟踪算法进行处理，降低了运算复杂度。J Y Turneret[3]通过分析线谱的统计特性，提出了计算线谱簇概率分布函数的方法。马世

收稿日期：2023-08-16；**修回日期**：2023-09-17

龙等[4]针对无人水下航行器(Unmanned Underwater Vehicle，UUV)平台辐射导致色噪声背景及干扰较强的问题，提出一种基于稀疏重构的色噪声背景下线谱自动提取方法，获得了更高的线谱频率分辨力；并通过分子频带处理，解决了色噪声背景对起伏线谱频域稀疏性的破坏问题，提高了UUV平台色噪声背景下的线谱跟踪能力[4]。当前针对线谱自动跟踪的研究大多只进行单一线谱的方位、频率跟踪，且在当前的跟踪方法中，往往一个目标会对应多个线谱。这些方法未能将同一目标的多个线谱合并为一个整体进行统一跟踪输出，产生大量且混乱的信息，难以准确筛选出关注目标，给后续处理带来了困难。

由于目标工况变化等原因，单一线谱可能不稳定，也会导致跟踪经常中断，造成无法对线谱目标进行持续追踪。因此，线谱自动跟踪算法将属于同一目标的线谱进行融合处理非常必要。但按何种规则进行融合；融合多根线谱后的目标如何维持跟踪、更新舷角；融合、跟踪方法不合理会不会严重影响跟踪的正确性与连续性？针对以上问题，本文提出了带有线谱融合、优选的线谱目标(窄带目标)自动检测、跟踪算法。

1 多线谱融合、优选的线谱目标自动跟踪原理

提出的多线谱融合、优选的线谱目标自动跟踪流程如图1所示。

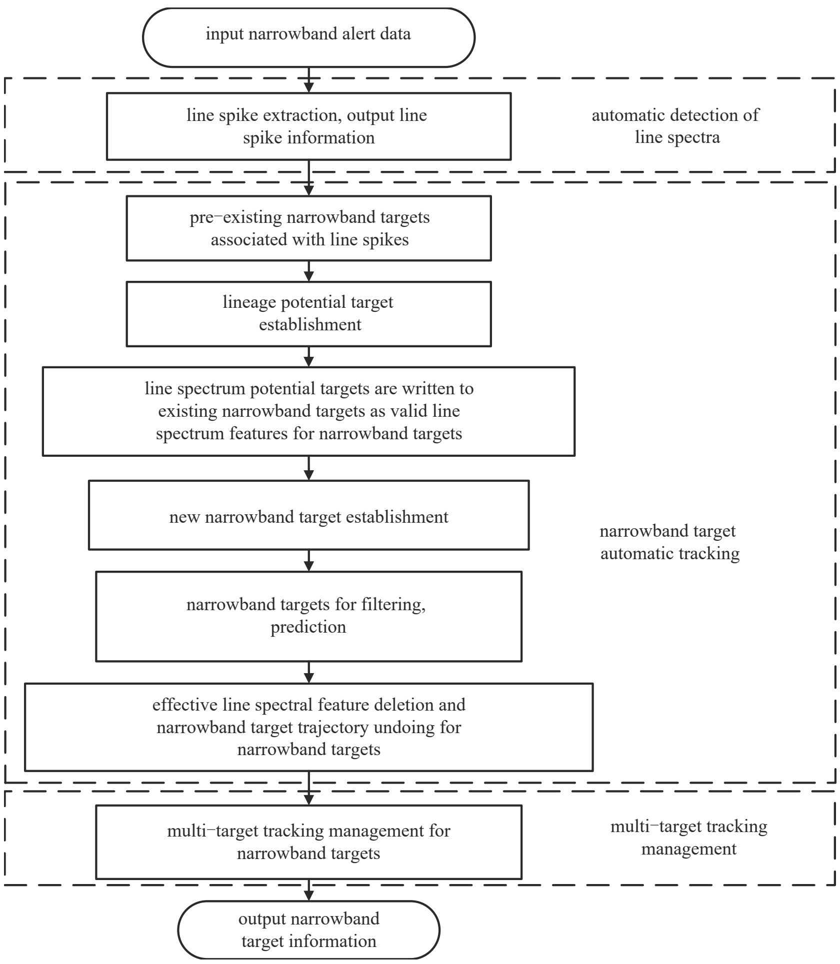

Fig.1 Flow of line spectrum automatic detection and tracking algorithm
图1 线谱自动检测、跟踪算法流程

2 线谱自动检测

目前声呐信号处理一般以低频分析和记录(Low Frequency Analysis and Recording，LOFAR)处理为基础进行线谱检测提取。LOFAR为一种经典的线谱检测方法，通过对接收信号进行短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform，STFT)得到。为实现线谱自动跟踪的新目标建立，对全方位的LOFAR当前帧结果进行线谱尖峰提取。

2.1 LOFAR 谱图线谱提取

利用全波束 STFT 处理结果得到当前所有分析频点的能量，形成 LOFAR 功率谱矩阵：$\boldsymbol{Y}_1(j,i)(0\leqslant j<f_{\mathrm{num}},0\leqslant i<B_{\mathrm{num}})$，其中$f_{\mathrm{num}}$为窄带分析的频点数；$B_{\mathrm{num}}$为窄带分析的波束数。对每个波束进行线谱提取得 $\boldsymbol{Y}_2(j,i)$ $(0\leqslant j<f_{\mathrm{num}},0\leqslant i<B_{\mathrm{num}})$，当 $\boldsymbol{Y}_2=\boldsymbol{Y}_1$时，此时 $\boldsymbol{Y}_2$为线谱。声呐的工作环境多样，噪声背景起伏也较大。此时，为获得恒定的线谱自动检测性能，要求幅度门限能够随噪声背景的起伏而自动调节。文献[5–7]利用所估计的功率谱中线谱信号的峰高及形状等特征搜索线谱，即通过设置线谱谱峰的斜率、峰宽、峰高等门限判决挑选线谱谱峰，实现线谱信号的自动提取。文献[8–10]给出完善的单波束线谱提取方法，本文不再赘述。

2.2 线谱提取结果抽值重构

STFT 处理后直接得到的 LOFAR 功率谱频率分辨力较高，过高的频率分辨力不利于后续进行的线谱关联，也会增加不必要的计算量。对频率维进行抽值处理，将频率分辨力调整至合适的大小。

对 $\boldsymbol{Y}_2$频率维进行 1:n 的选择最大点操作，并记录选择最大点的序号：

$$\begin{cases}\boldsymbol{Y}_3(j,i)=E_{\max}\left[\boldsymbol{Y}_2(nj{:}n(j+1),i)\right]\\ N(j,i)=I_{\max}\left[\boldsymbol{Y}_2(nj{:}n(j+1),i)\right]\end{cases}(0\leqslant j<P_{\mathrm{num}}-1,0\leqslant i<B_{\mathrm{num}})\tag{1}$$

式中：$E_{\max}(\cdot)$为范围内选最大值操作；$I_{\max}(\cdot)$为范围内选最大点序号的操作；P_{num}为抽取后频点个数。由于部分线谱频率扰动，频率在相邻 2 个频点(抽取后)反复变化，为方便后续关联，将一个相邻频点赋值：

$$\begin{cases}\boldsymbol{Y}_3(j+1,i)=\boldsymbol{Y}_3(j,i),\ N(j,i)\geqslant\dfrac{1}{2}N\\ \boldsymbol{Y}_3(j-1,i)=\boldsymbol{Y}_3(j,i),\ N(j,i)<\dfrac{1}{2}N\end{cases}(0\leqslant j<P_{\mathrm{num}}-1,0\leqslant i<B_{\mathrm{num}})\tag{2}$$

2.3 提取线谱尖峰

由于每个线谱都会跨越多个波束，为准确确定线谱目标的方位，仅保留线谱尖峰(波束的顶点)，对非尖峰点进行清零。尖峰提取方法可采用反卷积或范围内选最大值，这些方法还可以抑制旁瓣。对 $\boldsymbol{Y}_3$每个频点进行尖峰提取得到 $\boldsymbol{Y}_4$：

$$\begin{cases}\boldsymbol{Y}_4(j,i)=\boldsymbol{Y}_3(j,i)\\ \boldsymbol{Y}_4(j,i)=0\end{cases}(0\leqslant j<P_{\mathrm{num}},0\leqslant i<B_{\mathrm{num}})\tag{3}$$

当 $\boldsymbol{Y}_4(j,i)=\boldsymbol{Y}_3(j,i)$时，$\boldsymbol{Y}_3(j,i)$为尖峰；当 $\boldsymbol{Y}_4(j,i)=0$时，$\boldsymbol{Y}_3(j,i)$不为尖峰。

3 窄带目标自动跟踪

窄带目标自动跟踪的算法以建立线谱潜在目标作为跟踪起始，线谱潜在目标包括频点号(频率)、能量、方位信息。线谱潜在目标将信息写入窄带目标，成为窄带目标的有效线谱特征。一个窄带目标可包含多个有效线谱特征，窄带目标进行跟踪处理并输出跟踪结果。

3.1 已有的窄带目标与线谱尖峰关联

窄带目标被动自动跟踪与宽带目标被动自动跟踪关联方法基本一致，但实现有较大区别，宽带目标的被动自动跟踪采用波束能量图的尖峰与跟踪目标进行关联。一个窄带跟踪目标包含多个线谱的跟踪信息，不同的线谱采用频点号(或频率值)进行区分，一个窄带目标的所有线谱都与其相应频点的线谱尖峰进行关联，每个线谱关联后会得到各自的方位值，但一个窄带目标方位只有一个。因此，针对如何综合所有线谱的关联结果更新窄带目标方位的问题，本文提出一种使用线谱“优选”进行窄带目标方位更新方法。将一个窄带目标的所有线谱进行优选(线谱优选在每一帧处理中进行)，选出一个优选线谱。经过仿真及实际数据验证，该方法效果稳定、有效，与其他目标方位更新方法相比，实现更简洁。

实现线谱优选功能的窄带目标信息至少需要包含如下元素：

1) *YouXuan*：跟踪优选频点编号，采用第 *YouXuan* 号频点的跟踪结果更新窄带目标的方位；

2) $state(n),0\leqslant n<P_{\mathrm{num}}$：线谱有效标识，$state(i)=1$，表示第 i 频点为目标的有效线谱特征；

3) $energy(n,m),0\leqslant n<P_{\mathrm{num}},0\leqslant m<R_{\mathrm{num}}$：最近 R_{num} 个快拍的各线谱能量，$energy(i,j)$ 表示第 i 频点第 j 个快拍能量；

4) $PLRecord(n,m), 0 \leqslant n < P_{\mathrm{num}}, 0 \leqslant m < R_{\mathrm{num}}$：记录最近 R_{num} 个快拍目标每个有效线谱特征是否有线谱尖峰关联；

5) *bear*：窄带目标方位；

6) *count*：目标跟踪时间计数。

在每一帧处理中，所有线谱特征均与其相应频点的线谱尖峰进行关联，并更新其信息。通过 *PLRecord* 判断已有优选线谱不能进行稳定跟踪的情况下，跟踪通过 *energy* 与 *PLRecord* 共同决策，选择一个有效线谱特征为新的优选线谱。窄带目标方位 *bear* 更新为优选线谱关联得到的方位。

3.2 线谱潜在目标建立

将记录的多帧线谱尖峰提取结果进行关联，建立线谱潜在目标。各线谱潜在目标信息主要包括频点号(频率)、能量、方位，写入窄带跟踪目标(融合后)，成为窄带目标的线谱特征，在窄带目标进行统一管理。

3.3 线谱潜在目标写入已有窄带目标

线谱潜在目标首先与已有窄带目标进行关联，关联成功，则将其作为窄带目标的一个线谱特征写入窄带目标；未关联成功，则将线谱潜在目标进行保留。

线谱潜在目标加入窄带目标有效线谱特征的准则：线谱潜在目标方位在窄带目标一定方位范围内，且线谱目标与窄带目标运动轨迹吻合。

3.4 窄带目标建立及航迹撤销

如线谱潜在目标方位附近一定范围内没有正在进行跟踪的窄带目标存在，则建立新的窄带目标，将线谱潜在目标信息写入窄带目标，且将该线谱特征置为优选；如该方位同时出现多个线谱目标，可选择能量最强的。

窄带目标线谱特征的删除：最近的数帧处理中，线谱特征没有线谱尖峰关联，将该线谱特征删除。

窄带目标航迹撤销：窄带目标的优选线谱特征删除且无法找到新的优选线谱时，窄带目标判定为航迹终止。

4 多目标跟踪

被动声呐窄带目标与宽带目标的多目标跟踪没有原理上的差别。在多目标跟踪中，常用的数据关联方法有最近邻(Global Nearest Neighbor，GNN)方法和联合概率数据关联(Joint Probability Data Association，JPDA)等。还有一些数据关联方法实际上是上述两种方法的改进，如最强邻(Strongest Nearest Neighbor，SNN)方法和 Cheap JPDA 等。采用这些关联方法各有优劣，只要实现过程规范合理，均能满足声呐被动目标(包括宽带与窄带目标)的基本跟踪需求[11–17]。这些关联方法只进行跟踪目标与单帧观测数据的关联。

在当前声呐设备中，一般采用跟踪器号区分目标，并尽可能地保证自动跟踪的稳定、连续。因此对于同一目标，尽量使用同一跟踪器进行跟踪，即跟踪器号不串。仅与单帧观测数据进行关联的关联方法无法满足以上需求，多假设跟踪(MHT)关联对跟踪连续性能有较大提升。实际应用中，MHT 有两种实现方式[18]：

1) 面向假设(hypothesis–oriented)的 MHT 算法。其特点为持续保持每一帧的假设结构，在每帧新数据到来时，对这些结构进行维护。

2) 面向航迹(track–oriented)的 MHT 算法。不保存每一帧之间的假设结构，而对形成的航迹建立航迹假设，在每帧新数据到来时，对航迹假设进行维护。

显然，相对于面向假设的 MHT 算法，面向航迹的 MHT 算法假设分支数量大大减少，因而运算量小，对存储空间的需求低，在实际工程中可实现性更强。

在声呐被动自动跟踪中，面向航迹的 MHT 算法可进一步简化实现。声呐被动自动跟踪中，帧与帧之间目标方位变化小，虚警较低，因而帧与帧之间的关联可由其他关联方法实现，可以满足跟踪能力要求。即使用 GNN 或 JPDA 方法对单帧观测数据进行关联，再采用面向航迹的 MHT 算法对其他关联方法生成的航迹进行航迹关联。这可以发挥 MHT 算法跟踪连续性强的优势，并将计算量维持在较低的程度。主要流程如下：

1) 跟踪目标维持：使用 GNN 或 JPDA 进行点迹关联，卡尔曼滤波进行预测；

2) 基于正在跟踪目标的航迹置信度得分，进行航迹撤销；

3) 撤销的航迹、新起始的航迹写入航迹库中，并更新信息；

4) 航迹库中的航迹进行关联，根据航迹置信度得分结果，调整跟踪器号，使跟踪连续。

步骤 2)与步骤 4)均需要计算航迹置信度得分，采用卡尔曼滤波理论上可以得到航迹置信度计算函数。卡尔曼滤波的每一次递归影响航迹的置信度，每批次数据航迹的置信度得分由上一次的置信度与置信度增加量相加

得到。

$$LR(k) = LR(k-1) + \Delta LR(k) \tag{4}$$

式中：$LR(k)$为当前批次的航迹置信度；$\Delta LR(k)$为置信度增加量。$\Delta LR(k)$的计算流程参见文献[7]。

5　仿真及试验数据分析

使用Matlab进行模拟信号仿真分析。

1) 针对低频弱目标的自动跟踪

模拟拖线阵信号，阵元个数为300，阵元间距为0.9 m。单目标从30°等角速运动至65°，目标线谱为50 Hz，线谱能量高于目标连续谱15 dB，目标在30~90 Hz频段的信噪比为−40 dB。图2为30~90 Hz宽带波束能量历程图，图2中已完全看不到该目标。图3为针对50 Hz单频点采用16 s相干积分的波束能量历程图，在图3中可以发现时间方位30°~65°的目标。采用窄带自动跟踪的目标轨迹如图4所示，可见经过线谱融合、优选的窄带目标自动跟踪能够对低频弱目标进行正确的自动跟踪。

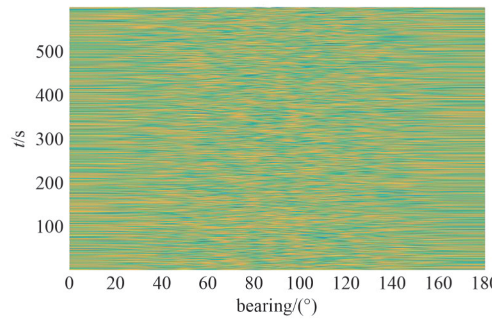

Fig.2 30~90 Hz broadband beam energy detection map
图2 30~90 Hz宽带波束能量历程图

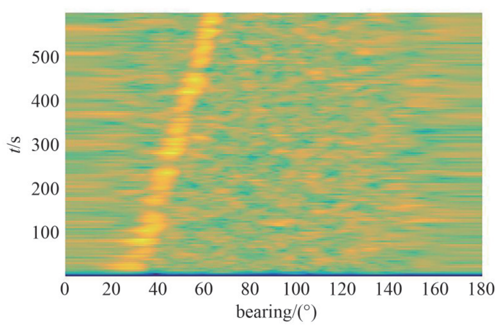

Fig.3 50 Hz line spectrum beam energy detection map
图3 50 Hz线谱波束能量历程图

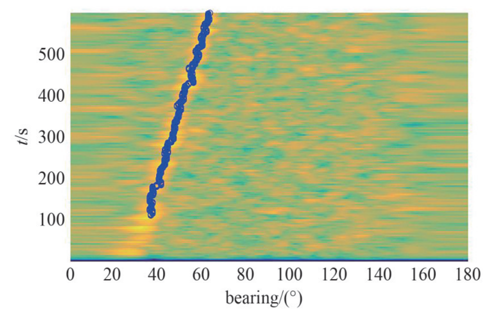

Fig.4 Automatic tracking target trajectory map of line spectrum target
图4 线谱目标自动跟踪目标轨迹图

2) 低频目标受到强目标干扰及目标交叉情况下的窄带自动跟踪

模拟拖线阵低频线谱目标，目标A在30°~65°等角速度运动，线谱为50 Hz，在30~90 Hz频段信噪比为−40 dB；目标B在90°~20°等角速度运动，线谱为80 Hz，在30~90 Hz频段信噪比为−40 dB；目标C在45°静止，线谱分别为50 Hz与80 Hz，在30~90 Hz频段信噪比为−10 dB；所有目标均有连续谱和线谱，线谱均高于目标连续谱15 dB。跟踪目标轨迹如图5所示，蓝色、红色、绿色轨迹分别为跟踪器编号1(目标C)、2(目标B)、3(目标A)的轨迹。因目标C能量较强，目标A与B在目标C的干扰下均中断跟踪。而面向航迹的多假设关联将已中断的航迹与新起始的航迹匹配，维持跟踪的连续性。在新航迹起始32 s后开始关联，因而能看到目标B航迹在410 s时由绿变红。目标均正确跟踪，能够保证同一跟踪器持续跟踪1个目标。

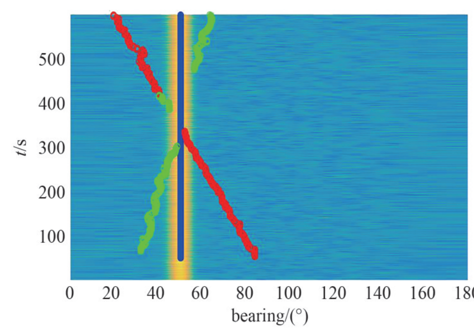

Fig.5 Narrowband automatic tracking target trajectory map
图5 窄带自动跟踪目标轨迹图

3) 拖线阵海试数据线谱目标自动跟踪

对拖线阵海试数据进行线谱目标自动跟踪。数据的低频段宽带能量历程图如图6所示，对该数据进行低频线谱目标自动跟踪，某目标跟踪结果轨迹如图7所示。该目标在宽带能量历程图上仅在1 300~3 100 s可见，其余时间因有其他目标干扰无法分辨，宽带跟踪实际无法完成对该目标的连续跟踪。

线谱自动跟踪不仅可以正确输出目标的方位、跟踪器号、跟踪时间信息，还可以输出目标的有效线谱特征的线谱频率。图8为该线谱目标的优选线谱频率(频率已进行归一化，最高处理频率归一化到1)的历程图，图9为根据该目标的优选线谱频率进行的单频点波束能量历程图。57 s时，该目标的自动跟踪启动，优选线谱频率为0.68(归一化后结果)。而在1 310~1 389 s、2 629s~3 039 s时，原优选线谱无法进行跟踪，因而进行优选线谱的切

换，维持了窄带目标跟踪的正确、连续。图9中的目标轨迹与图7中线谱自动跟踪的跟踪轨迹一致，进一步验证了跟踪轨迹与该线谱目标实际方位基本相符。可见经过线谱融合、优选的窄带目标自动跟踪相对于单线谱跟踪，具有跟踪抗干扰性与连续性上的优势。

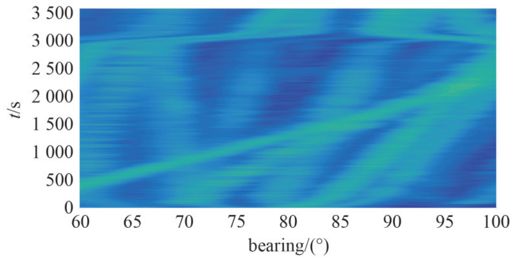

Fig.6 Sea trial data broadband beam energy detection map
图6 海试数据宽带波束能量历程图

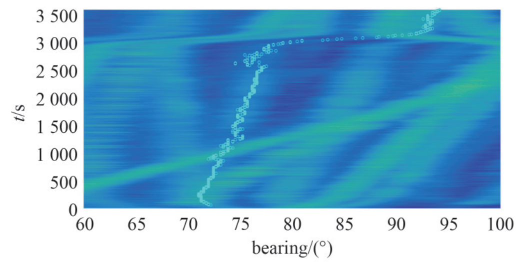

Fig.7 Azimuth trajectory map of data line spectrum target tracking result
图7 数据线谱目标跟踪结果方位轨迹图

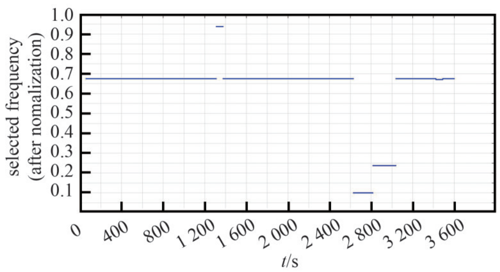

Fig.8 Optimal line spectrum labeling time calendar of line spectrum target
图8 线谱目标的优选线谱标号时间历程图

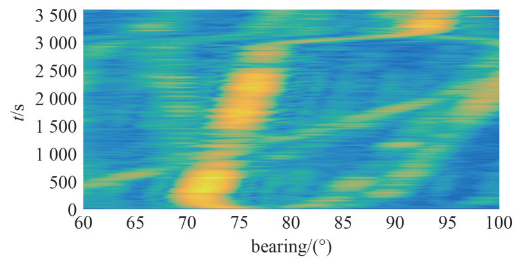

Fig.9 Sea trial data optimization line spectrum energy detection map
图9 海试数据优选线谱能量历程图

6 结论

为提升低信噪比及多目标干扰下的被动弱目标检测及跟踪能力，针对当前文献中窄带目标跟踪方法的弊端，本文提出了一种基于线谱检测，带有多线谱融合、优选的线谱目标自动跟踪算法。确定了线谱目标的建立、删除、融合及关联准则，采用针对航迹的多假设跟踪算法对多线谱目标进行自动跟踪。本算法计算量较小，弱目标发现、跟踪能力强，且为自动跟踪，可自动上报跟踪结果。仿真及海试数据分析表明，本算法能自动探测到宽带警戒无法发现的目标，当基于宽带警戒的跟踪与单线谱跟踪均无法进行时，仍可维持稳定跟踪。

参考文献：

[1] CAPPEL D V, ALINAT P. Frequency line extractor using multiple hidden Markov models[C]// IEEE Oceanic Engineering Society. Nice,France:IEEE, 1998:1481-1485. doi:10.1109/OCEANS.1998.726317.

[2] 谢贤亚,王家鼎,李焕润. EM-HMM多频率线跟踪算法[J]. 电子学报, 2002,30(1):22-26. (XIE Xianya,WANG Jiading,LI Huanrun. EM-HMM multiple frequency line tracking algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2002,30(1):22-26.) doi:10.3321/j.issn:0372-2112.2002.01.006.

[3] TOURNERET J Y. Statistical properties of line spectrum pairs[J]. Signal Processing, 1998,65(2):239-255. doi:10.1016/S0165-1684(97)00221-1.

[4] 马世龙. 基于无人移动平台的目标线谱被动检测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2019. (MA Shilong. Research on target line spectrum passive detection technology based on unmanned mobile platform[D]. Harbin,China:Harbin University of Engineering, 2019.)

[5] 陶笃纯. 噪声和振动谱中线谱的提取和连续谱平滑[J]. 声学学报, 1984,9(6):337-344. (TAO Duchun. Extraction of line spectra and smoothing of continuous spectra in noise and vibration spectra[J]. Acta Acustica, 1984,9(6):337-344.) doi:10.15949/j.cnki.0371-0025.1984.06.001.

[6] 严争通,张群飞. 基于Welch功率谱估计和中值滤波的水下目标辐射噪声线谱提取[J]. 计算机工程与应用, 2017,53(S2):231-234. (YAN Zhengtong,ZHANG Qunfei. Radiated noise line spectrum extraction of underwater targets based on Welch power spectrum estination and median filtering[J]. Computer Engineering and Applications, 2017,53(S2):231-234.)

[7] 陈杭,张伯彦,陈映. 关联深度自适应的多假设跟踪研究[J]. 系统工程与电子技术, 2016,38(9):2000-2007. (CHEN Hang,

ZHANG Boyan, CHEN Ying. Multiple hypothesis tracking with adaptive association depth[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016,38(9):2000–2007.) doi:10.3969/j.issn.1001-506X.2016.09.06.

[8] 王燕,李想,齐滨,等. 无源声呐场景中使用辅助粒子滤波的邻近目标检测前跟踪方法[J]. 声学学报, 2023,48(2):277–290. (WANG Yan, LI Xiang, QI Bin, et al. A track-before-detect method for neighboring targets based on auxiliary particle filter in passive sonar scenarios[J]. Acta Acustica, 2023,48(2):277–290.) doi:10.15949/ j.cnki.0371-0025.2023.02.015.

[9] 崔恩永. 基于多特征的多假设跟踪算法及航迹融合技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2021. (CUI Eenyong. Research on multi-hypothesis tracking algorithm and track fusion technology based on multi-features[D]. Xi'an, China: Xi'dian University, 2021.)

[10] 谢志华,蒋丞,吴俊超,等. 水下目标多平台协同定位和跟踪方法[J]. 声学学报, 2021,46(6):1028–1038. (XIE Zhihua, JIANG Cheng, WU Junchao, et al. Method of multi-platform cooperative localization and tracking for underwater targets[J]. Acta Acustica, 2021,46(6):1028–1038.) doi:10.15949/j.cnki.0371-0025.2021.06.022.

[11] 李羿萱,杜选民,周胜增,等. 多目标干扰环境中威胁目标自动跟踪方法[J]. 舰船科学技术, 2021,43(2):172–175. (LI Yixuan, DU Xuanmin, ZHOU Shengzeng, et al. Threat target automatic tracking method in multi-target jamming environment[J]. Ship Science and Technology, 2021,43(2):172–175.)

[12] XU Luxiao, LIU Chengyuan, YI Wei, et al. A particle filter based track-before-detect procedure for towed passive array sonar system[C]// 2017 IEEE Radar Conference. Seattle, WA, USA: IEEE, 2017:1460–1465. doi:10.1109/RADAR. 2017.7944437.

[13] SHAO Pengfei, LI Qing, ZHOU Bin. An improved tracking method for distributed passive sonar system[C]// 2022 the 7th International Conference on Signal and Image Processing(ICSIP). Suzhou, China: IEEE, 2022: 100–105. doi: 1109/ICSIP55141. 2022.9886599.

[14] WANG Jun, JIAO Junsheng. Research on autonomous detection sonar system of UUV flank array[C]// 2019 IEEE the 2nd International Conference on Electronics Technology(ICET). Chengdu, China: IEEE, 2019:349–353. doi:10.1109/ELTECH.2019. 8839488.

[15] WANG Jun, JIAO Junsheng. Track before detect for low frequency active towed array sonar[C]// 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing(ICSIDP). Chongqing, China: IEEE, 2019:1–5. doi:10.1109/ ICSIDP47821. 2019.9173085.

[16] 李晓花,李亚安,鲁晓锋,等. 强干扰环境下水下纯方位PMHT多目标跟踪[J]. 西北工业大学学报, 2020,38(2):359–365. (LI Xiaohua, LI Ya'an, LU Xiaofeng, et al. Underwater bearing-only PMHT multi-target tracking under strong jamming environment[J]. Journal of Northwestern University of Technology, 2020,38(2):359–365.) doi:10.1051/jnwpu/20203820359.

[17] 陈韶华,陈川,赵冬艳. 噪声中的线谱检测及自动提取研究[J]. 应用声学, 2009,28(3):220–225. (CHEN Shaohua, CHEN Chuan, ZHAO Dongyan. Study on line spectrum detection and automatic extraction in noise[J]. Applied Acoustics. 2009,28(3): 220–225.) doi:10.3969/j.issn.1000-310X.2009.03.011.

[18] 陈春风. 复杂环境下多目标跟踪技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009. (CHEN Chunfeng. Research on multi-target tracking technology in complex environment[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2009.)

作者简介：

李彦楠(1988–)，男，硕士，工程师，主要研究方向为声呐信号处理.email:bn471057167bn@126.com.

史明佳(1999–)，女，在读硕士研究生，主要研究方向为通信技术、信号分析和安全分析.

王　伟(1978–)，男，硕士，研究员，主要研究方向为声呐信号处理.

刘志鹏(1994–)，男，硕士，工程师，主要研究方向为声呐信号处理.