

引用格式: 王学成, 王鲁军, 洪常委. 一种基于 DOA 分布信息熵加权的线谱目标检测方法[J]. 声学技术, 2021, 40(1): 117-122. [WANG Xuecheng, WANG Lujun, HONG Changwei. A linear spectrum target detection method based on DOA distribution information entropy weighting[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(1): 117-122.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.01.018

一种基于 DOA 分布信息熵加权的 线谱目标检测方法

王学成^{1,2}, 王鲁军^{1,3}, 洪常委²

(1. 声呐技术重点实验室, 浙江杭州 310012; 2. 杭州应用声学研究所, 浙江杭州 310012;
3. 中国船舶集团有限公司军工部, 北京 100097)

摘要: 针对常规宽带能量检测方法对低信噪比线谱目标检测性能较差的不足, 文章在分析目标线谱波达方向(Direction of Arrival, DOA)估计分布信息熵的基础上, 提出一种基于 DOA 分布信息熵加权的线谱目标检测方法。通过仿真对比分析了该方法的检测性能, 并利用海上实验数据验证了其有效性。结果表明, 当目标方位较为稳定时, 该方法可有效检测低信噪比线谱目标, 并可适用存在多个同频线谱目标的情况。

关键词: 线谱目标; 检测方法; 信息熵; 波达方向估计

中图分类号: TN911.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-01-0117-06

A linear spectrum target detection method based on DOA distribution information entropy weighting

WANG Xuecheng¹, WANG Lujun^{1,3}, HONG Changwei¹

(1. Science and Technology on Sonar Laboratory, Hangzhou 310012, Zhejiang, China; 2. Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310012, Zhejiang, China; 3. Military Industry Department, China State Shipbuilding Corporation Limited, Beijing 100097, China)

Abstract: In view of the poor performance of conventional wideband energy detection methods for detecting low signal to noise ratio (SNR) line spectrum targets, a linear spectrum target detection method based on target DOA distribution information entropy weighting is proposed in this paper. The detection performance of this method is analyzed through simulation and its effectiveness is verified by the offshore experimental data. The results show that, when the target orientation is relatively stable, this method can effectively detect line spectrum targets with low SNR, and can be applied in the case of multiple line spectrum targets at the same frequency.

Key words: line spectrum target; detection method; information entropy; direction of arrival (DOA) estimation

0 引言

被动声呐信号处理主要利用宽带信号检测, 采用常规能量检测(Conventional Energy Detection, CED)的方法^[1]。随着隐身技术的不断提高, 被动声呐接收信号的信噪比不断降低, 传统基于能量的被动声呐检测方法已很难满足远程弱目标检测的需求。

舰船辐射噪声一般具有丰富的单频分量, 且线谱谱级通常比连续谱谱级高 5~25 dB^[2]。因此, 针对弱目标的被动检测, 通过窄带方法实现对水下弱目标的检测在理论上比宽带检测有着更大的信噪

比增益^[3]。但是, 窄带检测方法首先需要确知线谱的频率。目前, 线谱检测技术已经较为成熟。李启虎等^[4-5]在理论上研究并数值仿真了自相关线谱检测、快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)、分段 FFT 分析、自适应线谱增强等线谱检测方法, 研究表明分段 FFT 检测对频率漂移有较好的宽容性。王逸林等^[6]根据自适应线谱增强器能够对未知线谱进行自适应跟踪滤波, 构建了一种自适应空时联合滤波器, 在自适应匹配多个未知的目标线谱的同时可抑制背景干扰, 在多目标复杂情况下具有较好的线谱检测性能。郑恩明等^[7]利用线谱的相位稳定性, 提出瞬时相位方差加权的线谱检测器, 提高了线谱检测性能。水下目标辐射噪声含有高强度稳定线谱这一特性, 为被动声呐实现目标探测提供了一种技术途径。陈新华等^[8]提出一种基于目标方位稳定性的线谱目标检测方法, 在目标方位变化缓慢

收稿日期: 2020-06-22; 修回日期: 2020-07-21

作者简介: 王学成(1996—), 男, 安徽怀宁人, 硕士研究生, 研究方向为水声信号处理。

通信作者: 王鲁军, E-mail: wanglj@csc.net.cn

时检测性能较好,但当其他方位存在强度较为接近的同频线谱信号时,该方法的检测性能将大幅度下降。陈阳等^[9]基于目标波束内峰值能量对应的频率较为稳定的特征,提出一种基于频率方差加权的线谱目标检测方法,在一定程度上改善了声呐检测的效果,但该方法在目标有多个线谱时,所估计的频率方差误差较大。蒋小勇等^[10]利用鱼雷辐射噪声线谱的特征,通过对宽带波束输出进行加权提高了检测性能。

本文基于线谱频率和背景噪声频率的波达方向(Direction of Arrival, DOA)估计的差异性,通过构建频率的多帧 DOA 分布信息熵对目标线谱频率进行加权增强。该方法在具有多个同频线谱目标的情况下,仍可实现对低信噪比目标的检测。

1 线谱 DOA 分布特性

设空间中来自不同方向的 P 个未知线谱信号与线列阵法线方向的夹角为 θ_p , $p=1,2,\dots,P$ 。某一单频信号以远场平面波的形式入射到 M 个阵元的均匀阵列,均匀阵列接收信号模型如图 1 所示。

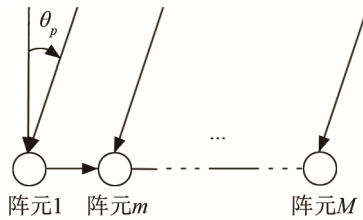


图 1 均匀线列阵接收信号模型

Fig.1 Signal receiving model of uniform linear array

图 1 中,第 m 个阵元接收信号可以表示为

$$x_m(n) = \sum_{p=1}^P A_p \cos[2\pi f_p n / f_s + m\phi_p + \phi_p] \quad (1)$$

$$\phi_p = 2\pi f_p d \sin(\theta_p) / c \quad (2)$$

其中:线谱 p 的信号幅度为 A_p ;信号频率为 f_p ; n 为离散时间序列号; ϕ_p 表示线谱 p 的初相位; ϕ_p 表示相邻阵元接收线谱 p 的相位差; θ_p 表示线谱信号 p 的来波方向与线列阵法线的夹角; d 为相邻阵元之间的间距; c 是水中的声速。

第 m 个阵元接收数据表示为

$$x_m = [x_m(1) \cdots x_m(l) \cdots x_m(L)] \quad (3)$$

式中: $l=1,2,\dots,L$ 。对 x_m 进行 L 点离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT),将阵元数据转至频域,则:

$$X_m(k) = \text{DFT}[x_m(l)] \quad (4)$$

将各阵元在某子带的数据写成向量形式:

$$X(k) = [X_1(k) \cdots X_m(k) \cdots X_M(k)] \quad (5)$$

式中, $k=1,2,\dots,L$ 。第 m 号阵元在频率 f_k 处常规波束形成的复数加权值为 $w_m(f_k)$,该窄带权向量为

$$w(f_k) = [w_1(f_k) \cdots w_m(f_k) \cdots w_M(f_k)] \quad (6)$$

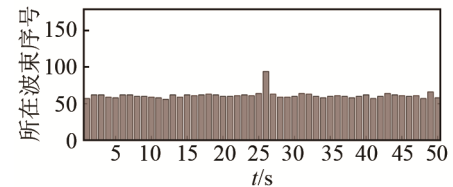
各子带波束输出为

$$P(k) = w^H(f_k) X(k) w(f_k) \quad (7)$$

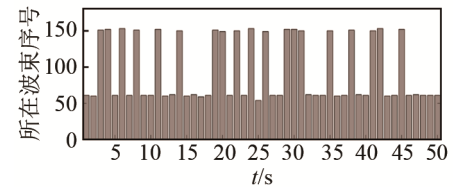
其中: w^H 为 w 的转置共轭矩阵。

假设背景噪声为各向同性的高斯白噪声,目标 1 位于 -30° 方向,其辐射噪声中线谱信号的频率为 100 Hz 和 300 Hz。目标 2 位于 60° 方向,其辐射噪声中线谱信号的频率为 300 Hz。添加 0~500 Hz 的高斯白噪声,使得线谱谱级和噪声平均谱级之比为 -5 dB。采样率为 1 000 Hz,处理总时长为 50 s,分 50 帧处理,每帧时长为 1 s,线列阵阵元数为 32,阵元间距为 2 m。

图 2 为 100、300 Hz 线谱 DOA 估计对应的波束分布。背景噪声中频率的 DOA 估计对应的波束分布如图 3 所示。

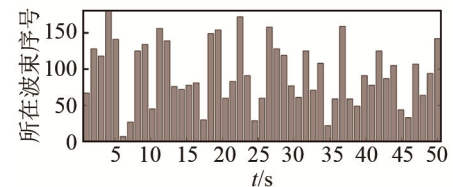


(a) 100 Hz 的 DOA 估计分布

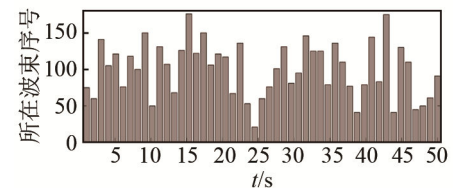


(b) 300 Hz 的 DOA 估计分布

图 2 100 Hz 和 300 Hz 频率空间谱估计峰值对应的波束分布
Fig.2 Beam distributions corresponding to the peak values of spatial spectrum estimates at 100 and 300 Hz



(a) 200 Hz 的 DOA 估计分布



(b) 400 Hz 的 DOA 估计分布

图 3 200 Hz 和 400 Hz 频率空间谱估计峰值对应的波束分布
Fig.3 Beam distributions corresponding to the peak values of spatial spectrum estimates at 200 and 400 Hz

由图 2 和图 3 可以看出, 来自目标线谱频率的 100 Hz 和 300 Hz 的 DOA 估计的波束基本较为稳定, 而对于来自背景噪声中频率为 200 Hz 和 400 Hz 的 DOA 估计对应的波束则分布散乱。

2 基于 DOA 分布信息熵加权的线谱目标检测方法

2.1 理论基础

根据香农定理, 随机变量 X 的某一个结果 $x=a$ 的香农信息含量定义为^[11]

$$h(x) = \log_2\left(\frac{1}{p(x=a)}\right) \quad (8)$$

式中: $h(x)$ 单位为 bit, $p(x=a)$ 表示 $x=a$ 发生的概率。香农信息含量 $h(x)$ 是 $x=a$ 事件的一种自然度量, 称其为信息量。

一个随机变量 X , 其所有可能的取值集合为 A , 那么该过程熵 $H(X)$ 的定义为一个结果的平均香农信息量:

$$H(X) = \sum_{x \in A} p(x) \log_2 \frac{1}{p(x)} \quad (9)$$

信息熵是信息论中用于度量信息量的一个概念, 信息熵越大, 包含的信息量越大, 当给予系统约束条件时, 其信息熵减小。

由上述线谱 DOA 分布特性的分析可知, 若目标线谱在某些波束中出现的时间变长, 那么该线谱的 DOA 的方位估计就受到了限制, 即施加了确定性方位强约束, 由此大幅度降低了 DOA 的方位估计过程的信息熵。基于以上分析, 针对各频点 DOA 估计分布的信息熵大小差异构建权值, 即可实现增强目标线谱功率, 抑制背景噪声的目的。

2.2 实现方法

阵列接收信号经宽带常规波束形成预处理后, 设离散频点数为 N , 总时间帧数为 L , 得到的波束个数为 M , 设每一帧的方位频率波束为 R 。首先, 统计各帧各频率的 DOA 估计结果, 记为第 l 帧第 i 个频点 DOA 估计所在方位 I 。然后对波束进行划分, 每 m 个波束为一簇, 并分频率地将 I 归类至各簇。在此基础上, 分频率计算 I 的分布及其信息熵 $H(f_i)$ 。最后, 基于信息熵 $H(f_i)$ 构建权值 w , 并将各频率的权值 w 加权至分频率的各波束中, 融合多帧信息得到目标方位历程估计, 具体算法步骤如下:

(1) 对第 l 时刻各阵元接收信号做宽带频域常规波束形成, 得到频率 f_i 在角度 θ_j 处对应的波束输

出结果为 $R_l(f_i, \theta_j)$ 。 f_i 为第 i 个频率点, θ_j 为第 j 个波束对应方位角; $i=1, 2, \dots, N$, $j=1, 2, \dots, M$; $l=1, 2, \dots, L$ 。

(2) 将第 l 时刻, $R_l(f_i, \theta_j)$ 最大值所在的波束记为 $I(f_i, T_l)$, 则 $I(f_i, T_l)$ 为第 i 频点在第 l 时刻的 DOA 估计对应的波束。

(3) 更新接收信号, 重复进行步骤(1)、(2), 直至处理时间帧数 $l=L$, 得到频率 f_i 在 L 个时刻的 DOA 估计所对应的波束。

(4) 对波束按照顺序进行划分, 以 m 个波束为一簇, m 取值与目标方位变化有关, 最好是使得目标线谱频率 DOA 估计恰好分布在 1~2 簇波束内, 这有益于后续用 DOA 分布的信息熵特征区分线谱成分和背景干扰成分。

(5) 将 $I(f_i, T_l)$ 归类至各簇, 统计所有频率 DOA 在各簇中出现的次数并计算其分布 $H(f_i)$, 令 $H_1(f_i) = 1/H(f_i)$ 。

(6) 定义频率 f 权值为

$$w(f_i) = \exp\{k_0 [H_1(f_i) - \text{mean}(H_1)]\} \quad (10)$$

其中: k_0 为一个大于 0 的常数, $\text{mean}(\cdot)$ 表示求均值。若某一线谱 DOA 分布的信息熵为 0, 则令其权值等于某一个较大的常数。

(7) 将步骤(6)中的权值 $w(f_i)$ 加权至频率为 f_i 的各波束中, 融合多帧信息得到方位历程图。

信息熵的物理含义是描述随机过程信息量大小或者随机变量取值分布的散乱程度。权值 $w(f_i)$ 与目标线谱频率 f_i 在多帧时刻 DOA 估计分布的散乱程度有关。考虑 DOA 分布信息熵加权的线谱权值大小, 本文方法要求目标必须有较为稳定的线谱成分存在, 且目标在批处理的时间内方位变化较小, 多帧统计的 DOA 分布在较少的波束簇内。

为了方便讨论目标方位变化方位的快慢对检测性能的影响, 这里假设目标相对接收阵方位变化速率均匀变化, 平均方位变化率越大, 其 DOA 估计的分布则相对越乱。为研究平均方位变化率对该方法检测性能的影响, 在第 1 节的仿真条件下, 目标方位变化率从 0 逐渐增加至 $2^\circ \cdot \text{s}^{-1}$, 以线谱频率 f_i 的权值和除 f_i 外的背景噪声频率权值的平均值的比值作为线谱检测性能的衡量标准, 简记为权值。经多次仿真, 并对每个方位变化率得到的权值结果取平均, 得到权值与方位变化速率的关系如图 4 所示。

由图 4 可知, 随着平均方位变化速率的增大, 目标线谱权值和背景噪声频率的平均权值的比值就越小。能量累积时背景干扰带宽的能量越高, 检测性能越差。

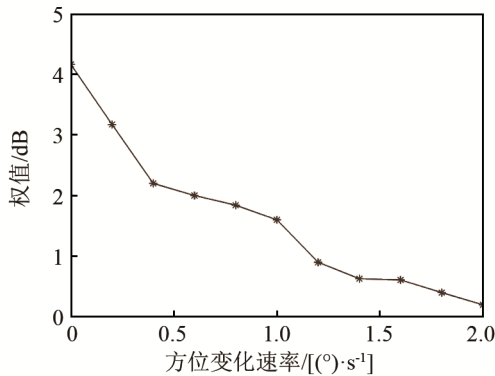


图4 权值和方位变化速率的关系

Fig.4 Relationship between weight and azimuth change rate

3 仿真分析

假设目标辐射噪声中包含高斯带限白噪声和线谱成分,白噪声带宽为 75~375 Hz,线谱频率为 300 Hz,线谱谱级和白噪声平均谱级比为 14 dB。干扰为带限白噪声,目标辐射噪声谱级和干扰噪声谱级比为-21 dB,则线谱谱级和干扰噪声平均谱级比为-7 dB。目标初始位于-30°方向,以 $0.4 (^\circ)\cdot s^{-1}$ 的方位变化速率变化至-10°方向,其他仿真参数同上。图 5 为第一秒数据波束形成后对应-30°方位波束信号的频谱图。

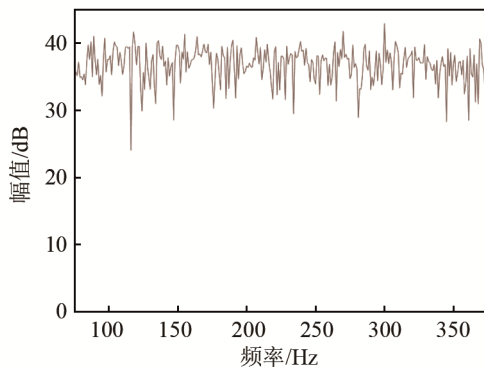


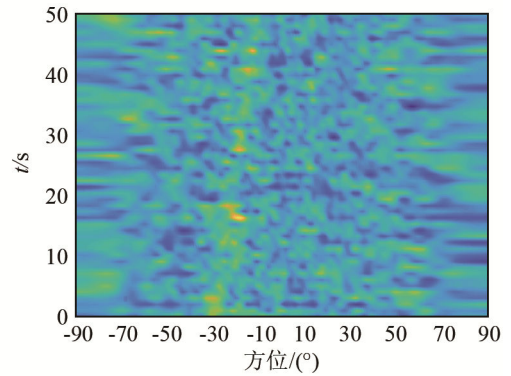
图5 在-30°方位波束信号频谱

Fig.5 Spectrum of the signal received at the azimuth of -30°

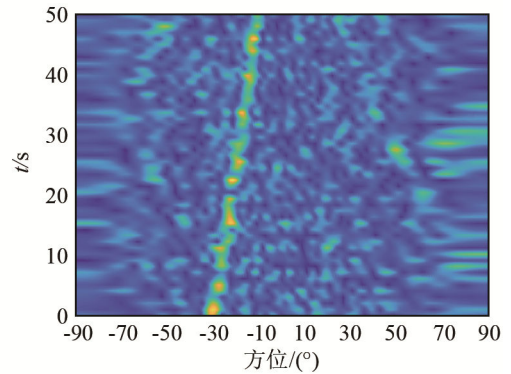
图 6(a)、6(b)、6(c)为分别采用常规宽带能量检测、窄带检测和本文的信息熵加权检测三种方法得到的目标检测瀑布图。

由图 6 可以看出,宽带能量检测中线谱目标淹没于背景噪声中。采用本文信息熵加权检测方法与已知线谱频率的窄带检测方法的性能相当。

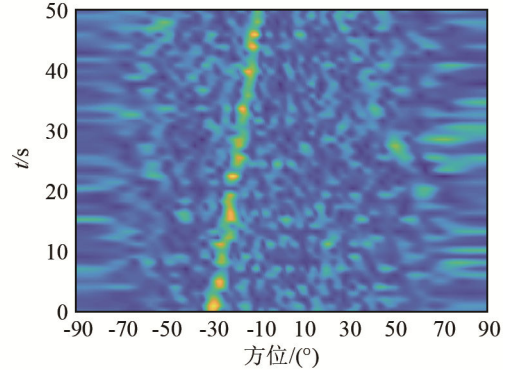
进一步仿真存在同频率干扰的多线谱目标情况,假设各目标线谱谱级和背景干扰噪声平均谱级比为-7 dB。线谱目标 1 的频率为 100、300 Hz,初始方位为-30°,以 $0.4 (^\circ)\cdot s^{-1}$ 的方位变化率经 50 s 变化至-10°方向。线谱目标 2 的频率为 300 Hz,



(a) 宽带能量检测



(b) 线谱波束检测



(c) 信息熵加权检测

图6 三种不同检测方法的目标检测结果

Fig.6 Target detection results of three different detection methods

初始方位为 60°,以 $0.4 (^\circ)\cdot s^{-1}$ 的方位变化速率经 50 s 变化至 40°。线谱目标 3 的频率为 100 Hz 和 200 Hz,一直位于 0°方向。图 7(a)为窄带线谱波束检测方法的处理结果,图 7(b)为文献[8]中基于频率 DOA 估计的方差加权方法的处理结果,图 7(c)为基于信息熵加权方法的处理结果。

由图 7 可以看出,当空间中存在同频的线谱目标干扰时,文献[8]中基于频率 DOA 估计的方差加权方法检测性能较差,且无法检测出线谱目标 2。基于信息熵加权方法与窄带检测方法的性能相当,且均可全部检测出 3 个目标。

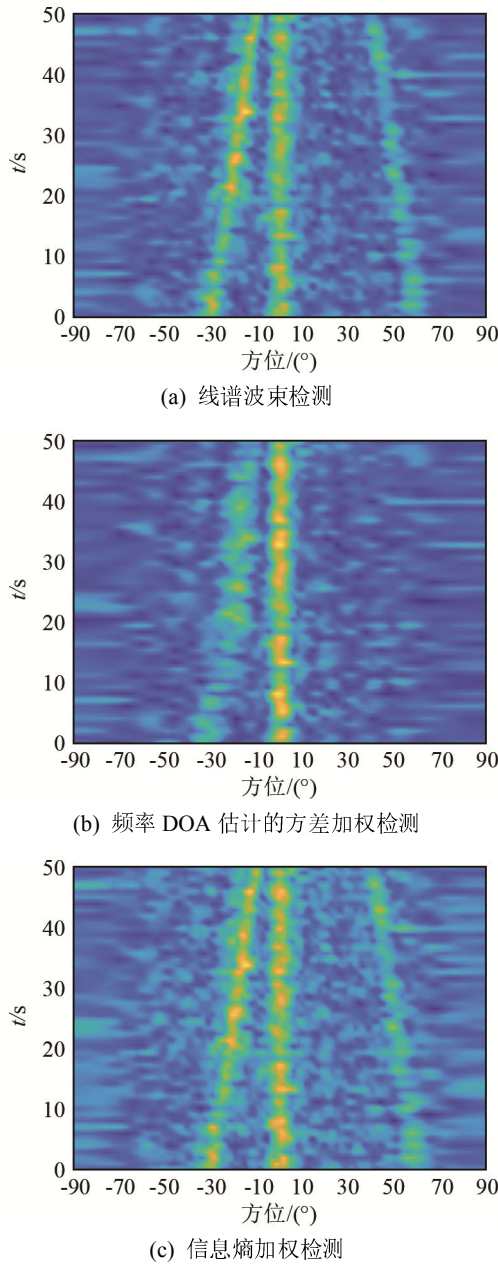


图 7 多目标情况下 3 种不同检测方法的线谱目标检测性能比较
Fig.7 Comparison of line spectrum target detection performance of three different methods in multi-targets situation

4 实验数据验证

为了验证基于信息熵加权的线谱目标检测方法,利用在某海域进行的某次远距离探测水声试验获取的目标数据进行分析。试验中,声源距离接收阵 7 km 左右,接收阵深度为 10 m,阵元个数为 64 个。接收处理带宽为 10~200 Hz。合作目标为主动声源,主动声源持续发射低频线谱信号,入射方向与线列阵的法向之间的夹角为 $\theta=10^\circ$ 。图 8 为主动声源发射信号的频谱图。

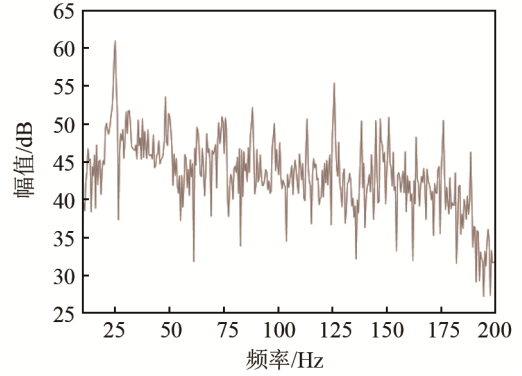


图 8 10° 方位波束信号频谱
Fig.8 Spectrum of the signal received at the azimuth of 10°

对阵列接收数据降采样、低通滤波处理后分别用常规能量检测和本文信息熵加权检测方法进行数据分析,方位历程估计结果分别如图 9 和图 10 所示。图 11 为某一时刻宽带常规能量检测(CED)方法和本文检测方法得到的幅值归一化的方向图对比结果。

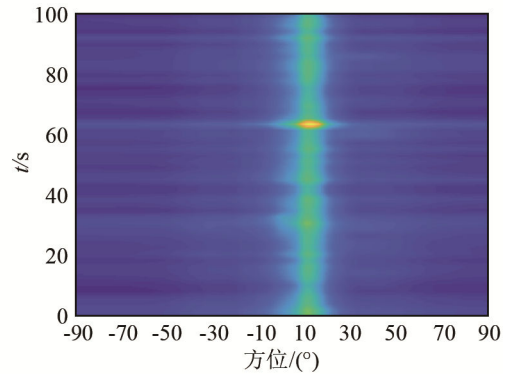


图 9 常规能量检测输出的时间方位历程图
Fig.9 Time-bearing track obtained by conventional energy detection

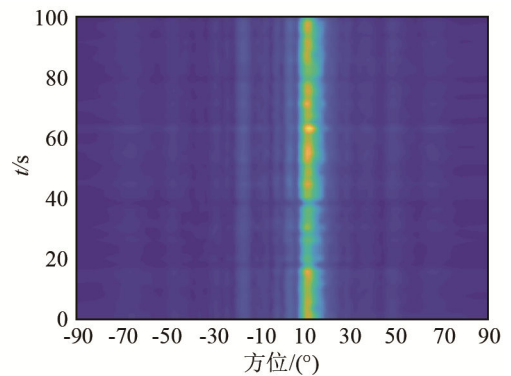


图 10 信息熵加权方法输出的时间方位历程图
Fig.10 Time-bearing track obtained by the entropy weighted method

由图 9、10、11 可知,与常规能量检测方法相比,信息熵加权检测方法对线谱目标信号的检测能力更强。由于常规能量检测方法将带宽内所有频点的功率进行累加,这使得背景噪声功率相对较高,

得到的波束能量曲线也较为平滑。而信息熵加权检测方法是通过对加权后再进行功率累积,线谱成分的功率被放大而背景噪声功率相对被压制,因此得到的主瓣宽度更窄,旁瓣也较低,如图 11 所示。

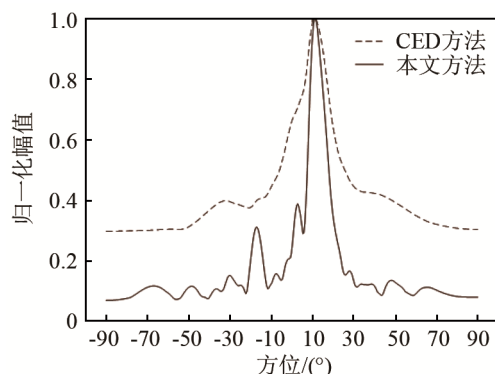


图 11 宽带能量检测和本文检测方法得到的方向图
Fig.11 Directional patterns of the conventional energy detection and the method in this paper

5 结 论

本文在分析目标线谱 DOA 估计的基础上,提出一种基于信息熵加权的线谱目标检测方法,并分析了目标方位的平均变化速率对该方法检测性能的影响。通过仿真对比了常规宽带能量检测方法、线谱波束检测方法和本文算法的性能,并利用实际海试数据验证了本文方法的有效性。通过研究可以得到以下结论:

(1) 目标线谱 DOA 分布较为稳定,而来自背景噪声的其他频率 DOA 估计所在方位的分布非常散乱。

(2) 在本文的低信噪比仿真条件下,宽带能量检测性能较差,由于目标的线谱频率难以获取,线谱波束检测方法也无法适用。针对各频点 DOA 估计分布的信息熵大小差异构建权值,并将各频率的权值加权至分频率的各波束中,可实现频率未知情形下的线谱功率的增强,提高对线谱目标的检测性能。

(3) 通过仿真分析可知,采用信息熵加权的检测方法性能优于宽带常规能量检测方法,其性能与已知目标线谱频率的窄带线谱检测方法基本相当,且可检测出空间中存在的多个同频线谱目标。海试数据处理结果验证了该方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] 肖国有,屠庆平. 声信号处理及其应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,1994.
- [2] 程玉胜,李智忠,邱家兴. 水声目标识别[M]. 北京:科学出版社,2018:66-90.
- [3] 周胜增,杜选民. 宽带检测和窄带检测的比较研究[J]. 声学技术,2017,36(5):329-330.
ZHOU Shengzeng, DU Xuanmin. Comparative research of wide-band and narrowband for passive sonar[J]. Technical Acoustics, 2017, 36(5): 329-330.
- [4] 李启虎,李敏,杨秀庭. 水下目标辐射噪声中单频信号分量的检测:理论分析[J]. 声学学报,2008,33(3):193-196.
LI Qihu, LI Min, YANG Xiuting. The detection of single frequency component of underwater radiated noise of target: theoretical analysis[J]. Acta Acustica, 2008, 33(3): 193-196.
- [5] 李启虎,李敏,杨秀庭. 水下目标辐射噪声中单频信号分量的检测:数值仿真[J]. 声学学报,2008,33(4):289-293.
LI Qihu, LI Min, YANG Xiuting. The detection of single frequency component of underwater radiated noise of target: digital simulation[J]. Acta Acustica, 2008, 33(4): 289-293.
- [6] 王逸林,马世龙,邹男,等. 时空域联合的水下未知线谱目标检测方法[J]. 电子与信息学报,2019,41(7):1682-1689.
WANG Yilin, MA Shilong, ZOU Nan, et al. Detection of unknown line-spectrum underwater target using space-time processing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(7): 1682-1689.
- [7] 郑恩明,余华兵,陈新华,等. 一种基于瞬时相位方差加权的线谱检测器[J]. 电子与信息学报,2015,37(7):1763-1768.
ZHENG Enming, YU Huabing, CHEN Xinhua, et al. Weighted line spectrum detector based on instantaneous phase variance[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(7): 1763-1768.
- [8] 陈新华,鲍习中,李启虎,等. 水下声信号未知频率的目标检测方法研究[J]. 兵工学报,2012,33(4):471-475.
CHEN Xinhua, BAO Xizhong, LI Qihu, et al. Research on detection of underwater acoustic signal with unknown frequency[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(4): 471-475.
- [9] 陈阳,王自娟,朱代柱,等. 一种基于频率方差加权的线谱目标检测方法[J]. 声学学报,2010,35(1):76-80.
CHEN Yang, WANG Zijuan, ZHU Daizhu, et al. A detecting method for line-spectrum target based on variance-of-frequency weight[J]. Acta Acustica, 2010, 35(1): 76-80.
- [10] 蒋小勇,杜选民. 强干扰背景下的鱼雷辐射噪声信号检测方法[J]. 声学技术,2010,29(1):18-22.
JIANG Xiaoyong, DU Xuanmin. Detection of torpedo radiated noise in strong interference background[J]. Technical Acoustics, 2010, 29(1): 18-22.
- [11] MCELIECE R J. 信息论与编码理论[M]. 李斗,殷悦,罗燕,等译. 北京:电子工业出版社,2003:13.