

双谱分析的辐射噪声线谱源深度辨识方法

宋楠楠^{1,2}, 王晓燕^{1,2}, 梅贝宁^{1,2}, 安良^{1,2}

(1. 东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 211189; 2. 东南大学 水声信号处理教育部重点实验室, 江苏 南京 211189)

摘要:针对基于功率谱线谱幅度起伏的水面/水下目标辨识方法在低信噪比条件下性能下降问题, 本文利用高阶谱抑制高斯噪声的特性, 提出了一种基于辐射噪声高阶谱线谱起伏特性的声源深度辨识方法。采用频谱分析法, 在理论上证明了双谱分析对声源深度差异导致的线谱起伏特性差异的敏感性, 建立了双谱线谱起伏指数模型, 并用于辐射噪声线谱源的深度辨识。研究表明: 相较于功率谱分析方法, 本文提出的双谱线谱起伏指数将水面和 underwater 声源线谱的差异性区间拓宽约 5.7 倍, 提高了利用辐射噪声线谱起伏特性进行声源深度辨识的稳健性, 对水声目标的特征提取与识别具有重要意义。

关键词:辐射噪声; 高阶谱; 双谱分析; 深度辨识; 线谱起伏; 特征提取; 目标识别; 水声信号处理

DOI: 10.11990/jheu.202506003

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20250623.1123.002>

中图分类号: O427.3 文献标志码: A 文章编号: 1006-7043(2025)08-1609-09

Bispectral analytical method for depth identification of radiated line spectrum sources

SONG Nannan^{1,2}, WANG Xiaoyan^{1,2}, MEI Beining^{1,2}, AN Liang^{1,2}

(1. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Key Laboratory of Underwater Acoustic Signal Processing, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: To address the performance limitations of surface/underwater target identification methods based on power spectrum line amplitude fluctuations under low signal-to-noise ratio conditions, a source depth identification approach that exploits the fluctuation characteristics of radiated noise line spectra in the higher-order spectral domain is proposed herein. This method leverages the noise suppression capability of higher-order spectra. Using spectral analysis, the sensitivity of bispectral analysis to differences in the fluctuation of line spectra induced by variations in the source depth was theoretically analyzed. On this basis, a bispectral line spectrum fluctuation index model was established and used for depth identification using radiated line spectrum sources. Compared with power spectral analysis, the proposed bispectral fluctuation index expands the discriminative interval between surface and underwater sources by approximately 5.7 times, as indicated by simulation and analysis of the sea trial data, thereby enhancing the robustness of source depth identification using line spectrum fluctuation and providing significant value for the feature extraction and identification of underwater acoustic targets.

Keywords: radiated noise; high-order spectrum; bispectral analysis; depth identification; line spectrum fluctuation; feature extraction; target recognition; underwater acoustic signal processing

舰船辐射噪声主要包含机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声^[1], 通过功率谱分析提取线谱^[2]、调制谱分析提取螺旋桨轴频和叶片数^[3]等方法, 获取

辐射噪声中与舰船结构、运行状态等相关的特征信息。其中, 辐射噪声的低频线谱具有稳定性较好、传播距离远等特点, 成为被动声呐目标识别所依赖的重要特征。

舰船目标的深度是判别目标类型的重要依据, 根据不同的目标航行深度, 将舰船目标分为水面目标和水下目标。目标的深度变化是导致辐射噪声起伏的主要因素。Clay 等^[4]证明了水面目标吃水深度随波高变化会导致模态函数幅度的起伏。George

收稿日期: 2025-06-04.

网络出版日期: 2025-06-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(91938203); 中央高校基本科研业务费项目(2242024K30004).

作者简介: 宋楠楠, 女, 博士研究生;
王晓燕, 女, 副教授, 硕士生导师;
安良, 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 王晓燕, E-mail: xyan@seu.edu.cn.

等^[5]在此基础上提出了一种非高斯型声强级概率密度函数作为深度起伏与声强起伏对应关系的理论模型。Wagstaff等^[6]提出了适用于二元深度辨识的AWSUM指数。海洋环境对舰船目标辐射噪声的线谱具有深度调制作用^[7],张莉等^[8]基于该调制作用提出了一种基于时空起伏特性的辐射噪声线谱源深度辨识方法。邓玉鑫等^[9]从理论上证明了采用声压幅值构建的线谱深度属性判别特征量具有更好的性能。以上研究均表明利用线谱的起伏特性能够有效实现线谱源深度属性的判别。

然而,随着近年减振降噪^[10-11]技术的发展,舰船辐射噪声的线谱强度大幅降低,中高频线谱得到了有效的抑制,低频线谱的提取也变得愈发困难。此外,受到海洋环境低频段干扰影响,提取出的辐射噪声线谱中混杂了大量干扰成分^[12],使得上述基于功率谱线谱起伏特性的声源深度辨识方法的性能受到较大影响。

高阶累积量具有抑制高斯噪声的能力且同时包含了线谱的幅度和相位信息^[13],利用高阶谱能够有效提取出线谱的特征。近年来,基于高阶谱的特征分析方法逐渐成为主被动声呐目标识别领域的热点方向。张晓云等^[14]利用双谱和相干谱完成舰船目标特征信息的提取。关键等^[15]提出了基于对角积分双谱的三特征融合海面慢速小目标检测方法。Tang等^[16]提出了一种基于复双谱对角切片特征提取与分类的目标识别方法。王佳维等^[17]利用目标高分辨距离像(high resolution range profile, HRRP)的双谱对角切片特征实现了水下小目标识别。

此外,双谱特征和神经网络相结合的方法也在目标识别领域得到了有效应用。刘赢等^[18]将雷达信号的双谱特征作为输入,训练出了能够准确识别调制样式各异的雷达信号的深层卷积神经网络模型。张帅钦等^[19]提出了一种基于一维像选择双谱的神经网络识别算法,达到了较高的目标识别概率。以上研究表明高阶谱在目标特征提取和识别方面具有一定的理论研究价值和实践可行性。

本文将高阶谱处理方法和海洋对辐射噪声线谱源的深度调制作用相结合,提出了一种基于双谱分析的辐射噪声线谱源深度辨识方法。该方法通过利用高阶累积量对高斯噪声的抑制特性来提取舰船辐射噪声中的线谱及其起伏特征,有效保留了舰船辐射噪声的非高斯成分。

1 基于双谱的线谱源深度辨识

1.1 随机过程的高阶累积量及高阶谱

假设 n 维高斯随机变量 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots$

$x_n]^T$, 对应的均值向量为 $\mathbf{a} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n]^T$, 任意两维随机变量 x_i 和 x_j 的协方差为 c_{ij} 。可以计算得到高斯随机变量 x 的联合累积量 $c_{k_1 k_2 \dots k_n}$ 为:

$$c_{k_1 k_2 \dots k_n} = \begin{cases} E[x_i] = a_i, & r = 1 \\ E[(x_i - a_i)(x_j - a_j)] = c_{ij}, & r = 2 \text{ 且 } i \neq j \\ E[(x_i - a_i)^2] = \sigma_i^2, & r = 2 \text{ 且 } i = j \\ 0, & r \geq 3 \end{cases} \quad (1)$$

将 n 维高斯随机变量推广至高斯平稳随机过程 $\{x(n)\}$, 得到其联合累积量 $c_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1})$ 为:

$$c_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) \equiv 0, \quad k \geq 3 \quad (2)$$

从式(1)、(2)中可以看出,对于三阶及以上阶数,高斯随机过程的累积量为零,对应的高阶谱也恒为零。因此,三阶及以上阶数的高阶累积量和高阶谱在理论上对于高斯随机过程不敏感^[20],故利用三阶及以上阶数的高阶累积量和高阶谱可抑制高斯噪声。

1.2 双谱及其对角切片

高阶累积量和高阶谱估计的运算量会随着阶数的增加而快速增长^[21],三阶谱能够在保持噪声抑制特性的同时最大程度上减少计算复杂度,因此三阶谱(即双谱)成为了实际应用中最为常用的一种高阶谱。

双谱定义三阶累积量的二维傅里叶变换为:

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{+\infty} c_{3x}(\tau_1, \tau_2) \exp(-j \sum_{i=1}^2 \omega_i \tau_i) \quad (3)$$

假设 $x(n)$ 为离散时间确定性信号,记 $x(n)$ 对应的离散时间傅里叶变换和功率谱分别为 $X(\omega)$ 和 $P(\omega)$ 。根据式(3)中双谱的定义,双谱可以用频谱 $X(\omega)$ 表示为:

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = X(\omega_1)X(\omega_2)X^*(\omega_1 + \omega_2) \quad (4)$$

在实际信号处理中,双谱的维数随原始信号的维数呈现平方增长趋势,本文使用双谱的对角切片来实现目标特征的降维处理,提升高阶谱分析的计算效率^[22]。根据式(4)中双谱的频域表达式,取 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$,可以得到双谱对角切片为:

$$B_x(\omega, \omega) = X(\omega)X(\omega)X^*(2\omega) \quad (5)$$

此外,对于有限长的数据,需要采用近似的方法估计双谱,本文选用非参数化估计方法中的直接法^[23]进行双谱估计。

1.3 基于双谱的线谱幅度及起伏特性分析

假设水听器接收的辐射噪声信号为 $x(t)$ 为:

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (6)$$

式中: $s(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi)$ 为声源发出的线谱信号;

A, ω_0 和 φ 分别为线谱信号的幅度、频率和初始相位; $n(t)$ 为高斯分布的背景噪声。

$x(t)$ 经过采样后得到 N 点序列 $x(n), n = 1, 2, \dots, N$ 。对 $x(n)$ 作离散时间傅里叶变换,可以得到:

$$X(\omega) = S(\omega) + N(\omega) \quad (7)$$

式中: $X(\omega), S(\omega)$ 和 $N(\omega)$ 分别为水听器接收信号、线谱信号和背景噪声的频谱。

将式 (5) 代入式 (7), 可以得到 $x(n)$ 的双谱对角切片为:

$$B_x(\omega, \omega) = (S(\omega) + N(\omega))^2(S^*(2\omega) + N^*(2\omega)) \quad (8)$$

将式 (8) 进一步展开, 可以发现 $x(n)$ 的双谱对角切片由 8 项 $S(\omega), N(\omega), S(2\omega)$ 和 $N(2\omega)$ 的组合式构成:

$$B_x(\omega, \omega) = |S(\omega)|^2 S^*(2\omega) + |S(\omega)|^2 N^*(2\omega) + S^*(\omega) N(\omega) S^*(2\omega) + S^*(\omega) N(\omega) N^*(2\omega) + N^*(\omega) S(\omega) S^*(2\omega) + N^*(\omega) S(\omega) N^*(2\omega) + |N(\omega)|^2 S^*(2\omega) + |N(\omega)|^2 N^*(2\omega) \quad (9)$$

在研究辐射噪声线谱源的起伏特性时, 不仅要关注线谱频率处的双谱对角切片取值, 还需重点分析 $\omega = \omega_0$ 处的 $B_x(\omega_0, \omega_0)$ 取值情况。

由于频率为 ω_0 的线谱信号的频谱模值仅在 $\pm\omega_0$ 处为 $A/2$, 在其余频点处均为 0, 故 $B_x(\omega_0, \omega_0)$ 中所有包含 $S(2\omega_0)$ 的项的取值均为 0。将 $\omega = \omega_0$ 代入式 (9) 中, 化简后可以得到:

$$B_x(\omega_0, \omega_0) = |S(\omega_0)|^2 N^*(2\omega_0) + S^*(\omega_0) N(\omega_0) N^*(2\omega_0) + N^*(\omega_0) S(\omega_0) N^*(2\omega_0) + |N(\omega_0)|^2 N^*(2\omega_0) = (S(\omega_0) + N(\omega_0))(S^*(\omega_0) + N^*(\omega_0)) N^*(2\omega_0) = |X(\omega_0)|^2 N^*(2\omega_0) \quad (10)$$

从式 (10) 中可以看出, $x(n)$ 的双谱对角切片在线谱频率 ω_0 处的取值不仅和 $x(n)$ 的频谱 $X(\omega)$ 有关, 还与背景噪声频谱 $N(\omega)$ 有关。

记 $x(n)$ 的功率谱 $P_x(\omega)$ 在线谱频率 ω_0 处的取值为:

$$P_x(\omega_0) = |X(\omega_0)|^2 \quad (11)$$

根据式 (10), 可以得到 $x(n)$ 的双谱对角切片在 ω_0 处的模值为:

$$|B_x(\omega_0, \omega_0)| = |X(\omega_0)|^2 |N^*(2\omega_0)| = |X(\omega_0)|^2 |N(2\omega_0)| \quad (12)$$

由式 (11)、(12) 可得, 双谱对角切片的模值在 ω_0 处等于信号的功率谱乘以噪声频谱在 $2\omega_0$ 处的模值 $|N(2\omega_0)|$ 。若 $N(\omega)$ 在频率 $2\omega_0$ 处的模值大于 1, 则 $B_x(\omega_0, \omega_0)$ 的模值大于功率谱 $P_x(\omega_0)$, 此时 $|N(2\omega_0)|$ 等价于一个放大因子, 能

够放大线谱处的幅值。

使用直接法估计双谱时, 功率谱和双谱对角切片估计的方差分别为^[24]:

$$\text{var}\{P_x(\omega)\} = \frac{M^2 T}{N} P^2(\omega) \quad (13)$$

$$\text{var}\{B_x(\omega_1, \omega_2)\} = 2 \frac{M^2 T}{N} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) P(\omega_1) P(\omega_2) P(\omega_1 + \omega_2) \quad (14)$$

式中: $T = 1/f_s$ 为采样间隔; M 为子序列长度; N 为采样序列的总点数, 相邻 2 个子序列的重叠率为 α , 重叠长度为 αM 。

将 $\omega = \omega_0$ 代入式 (13)、(14), 可以得到在线谱频率 ω_0 处的功率谱和双谱对角切片估计的方差为:

$$\text{var}\{P_x(\omega_0)\} = \frac{M^2 T}{N} P^2(\omega_0) \quad (15)$$

$$\text{var}\{B_x(\omega_0, \omega_0)\} = 2 \frac{M^2 T}{N} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) P^2(\omega_0) P(2\omega_0) \quad (16)$$

由式 (15)、(16) 可以得到:

$$\frac{\text{var}\{B_x(\omega_0, \omega_0)\}}{\text{var}\{P_x(\omega_0)\}} = 2 \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) P(2\omega_0) \quad (17)$$

由于相邻 2 个子序列的重叠率 α 的取值为 $[0, 1]$, 故 $2(1 - \alpha/2)$ 的取值为 $[1, 2]$ 。因此, 当 $x(n)$ 的功率谱 $P_x(\omega)$ 在 $2\omega_0$ 频率处取值大于 1 时, 双谱对角切片在线谱频率 ω_0 处的方差将大于功率谱的方差, 此时线谱频率处的起伏得到了凸显。当功率谱 $P_x(\omega)$ 在 $2\omega_0$ 频率处的取值越大时, 该线谱起伏凸显作用越明显。分析表明, 在线谱频率处, 双谱的对角切片的起伏更加明显, 在低信噪比海洋环境下可以利用双谱对角切片的特性凸显线谱的起伏, 为线谱源深度辨识提供了理论基础。

1.4 基于双谱的线谱源深度辨识方法

本文将双谱对角切片和基于时空起伏特性的辐射噪声线谱幅度起伏指数(line spectrum fluctuation index, LSF)模型^[8]相结合, 提出一种基于双谱分析的线谱源深度辨识方法。

对辐射噪声采样序列 $x(n)$ 作 DFT 后得到序列 $X(k)$, 根据式 (5), 计算 $x(n)$ 的双谱对角切片 $B_x(k, k)$, 取 $B_x(k, k)$ 在线谱频率对应的 k_0 处的模值可以得到双谱对角切片线谱幅度 $B(k_0)$:

$$B(k_0) = |B_x(k, k)|_{k=k_0} \quad (18)$$

若有辐射噪声的双谱对角切片的线谱幅度序列 $B(m)$, 将 $B(m)$ 分割为 Q 个长度为 L 的子序列, 相邻 2 个子序列的重叠长度为 K , 将第 q 个子序列记作 $B_q(m_q), 1 + (L - K)(q - 1) \leq m_q \leq 2L + (L - K)(q - 1)$

1), $q=1, 2, \dots, Q$ 。计算每个子序列的一阶幂平均函数 $M_1(q)$ 和三阶幂平均函数 $M_3(q)$:

$$M_1(q) = \frac{1}{L} \sum_{k_q=1+(q-1)(L-K)}^{L+(q-1)(L-K)} B_q(m_q) \quad (19)$$

$$M_3(q) = \left\{ \frac{1}{L} \sum_{k_q=1+(q-1)(L-K)}^{L+(q-1)(L-K)} [B_q(m_q)]^{-3} \right\}^{-\frac{1}{3}} \quad (20)$$

计算每个子序列的双谱线谱幅度起伏指数 (bispectral line spectrum fluctuation index, BLSFI), 得到的 BLSFI(q) 为:

$$\text{BLSFI}(q) = \frac{M_1(q)}{M_3(q)} \quad (21)$$

统计所有子序列的 BLSFI(q) 超过门限 λ 的概率 p 为:

$$p = \frac{M\{\text{BLSFI}(q) > \lambda\}}{Q} \quad (22)$$

式中 $M\{\cdot\}$ 表示辐射噪声双谱对角切片线谱幅度起伏指数序列中大于等于门限 λ 的个数。

根据 p 的大小可以对线谱进行二元深度辨识, 如果 $p > 0.5$, 则辐射噪声线谱属于水面目标, 反之则属于水下目标。

2 双谱分析方法的性能仿真

2.1 高斯背景噪声下双谱对角切片的性能分析

通过仿真分析在较低信噪比环境下双谱对角切片的性能。声源 S_1 辐射 400 Hz 线谱信号, 线谱信号的宽带信噪比均为 -20 dB, 海洋背景噪声设置为高斯白噪声, 数据的采样率为 3.2 kHz, 信号发射持续时间为 300 s。

仿真得到的声源 S_1 发射信号的频谱如图 1(a) 所示。取双谱对角切片的模值, 得到的声源 S_1 发射信号的归一化幅度如图 1(b) 所示。图 1(a) 中 400 Hz 线谱信号完全淹没在环境噪声中, 较多干扰频点处的归一化幅度均超过了 400 Hz 线谱处的归一化幅度, 而图 1(b) 中 400 Hz 线谱更加清晰, 仅有少量干扰频点处的归一化幅度高于 400 Hz 线谱处的归一化幅度。从图 1(b) 中可以看出, 双谱的对角切片具备更强的背景干扰抑制能力, 在双谱对角切片处理后高斯宽带噪声强度大幅降低, 全频带范围内的谱图更加纯净。

选取 1 s 谱估计窗长和 1 s 步进, 计算 300 s 信号发射持续时间内的功率谱和双谱对角切片能量谱, 对 2 种谱分别进行归一化后得到的 LOFAR 图如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 在较低信噪比的环境下, 基于双谱对角切片的 LOFAR 图能够在全频带范围内较好地抑制高斯分布的环境噪声, 与 1.1 节中给出的结论相符。

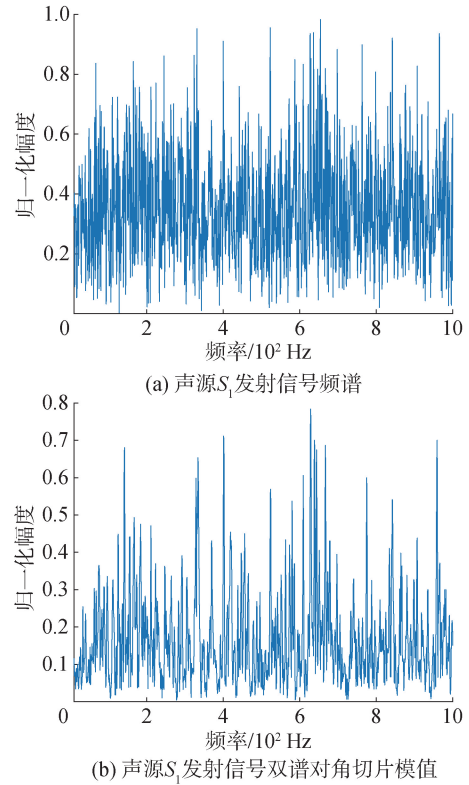


图 1 声源 S_1 发射信号在不同谱上的归一化幅度

Fig. 1 Normalized amplitudes of signal emitted by acoustic source S_1 over different spectra

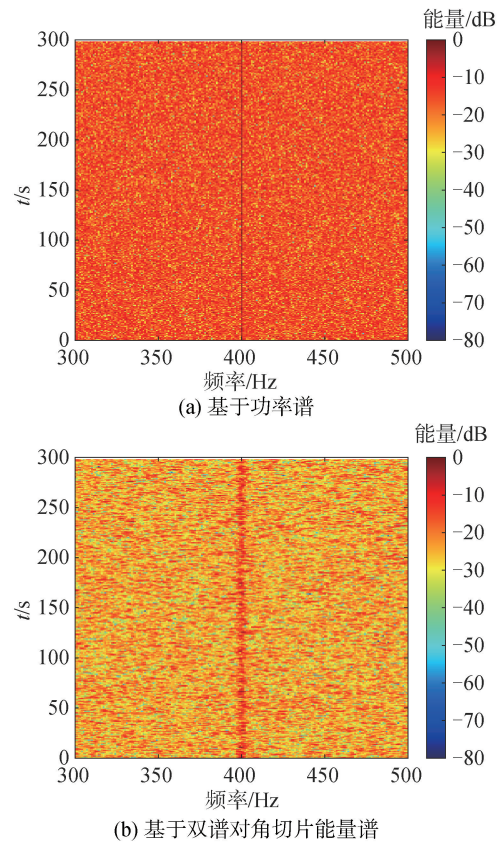


图 2 基于功率谱和基于双谱对角切片能量谱的 LOFAR 图
Fig. 2 Lofargrams based on power spectra and bispectral diagonal slice energy spectra

2.2 高斯背景噪声下低频线谱的起伏特性分析

通过仿真分析高斯背景噪声下低频线谱的起伏特性。利用 Kraken 模型仿真生成浅海信道,采用蒙特卡罗方法模拟声源在实际海洋环境中深度波动情况,水面声源的深度为 5 m,水下声源的深度为 50 m,水面声源和 underwater 声源的深度均发生服从高斯分布的随机起伏。水面声源 S_a 辐射 21 Hz 线谱信号,水下声源 S_b 辐射 23 Hz 线谱信号,2 线谱信号的宽带信噪比均为 0 dB,海洋环境噪声设置为高斯有色噪声,噪声谱级图如图 3 所示。

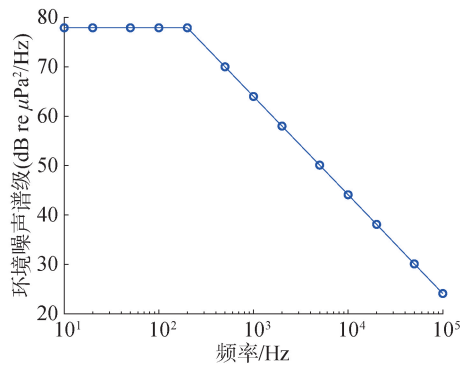


图 3 海洋环境噪声谱级

Fig. 3 Spectral level diagram of ocean ambient noise

在辐射信号的功率谱和双谱对角切片能量谱中将声源发射频率处的线谱成分提取出来,得到的线谱能量随时间变化情况如图 4 所示。

定量分析线谱能量起伏曲线的峰谷值,结果如表 1 所示。从表中可以看出,相较于功率谱,双谱对角切片能量谱可以将水面声源和 underwater 声源间的线谱能量起伏差距提升约 11.7 dB。对于水面声源 S_a 发射的 21 Hz 线谱,相较于功率谱,双谱对角切片能量谱将水面声源的线谱起伏放大了约 13.5 dB;对于水下声源 S_b 发射的 23 Hz 线谱,相较于功率谱,双谱对角切片能量谱将水下声源的线谱起伏放大了约 1.8 dB。

表 1 功率谱和双谱对角切片能量谱的线谱起伏峰谷值对比
Table 1 Peak-valley comparison in fluctuation between power spectrum and bispectral diagonal slice energy spectrum dB

声源	功率谱 峰值/谷值/峰谷值	双谱对角切片能量谱 峰值/谷值/峰谷值
水面声源 S_a	75.6/65.4/10.2	45.8/22.1/23.7
水下声源 S_b	82.5/74.8/7.7	61.7/52.2/9.5

根据 2.2 节提出的方法,选取子序列长度 $L=50$,相邻 2 个子序列的重叠率为 98%,计算得到的 222 帧基于功率谱的水面、水下声源线谱的 LSF1 起伏指数如图 5(a) 所示,222 帧基于双谱对角切片能量谱的水面、水下声源线谱的 BLSFI 起伏指数如

图 5(b) 所示。

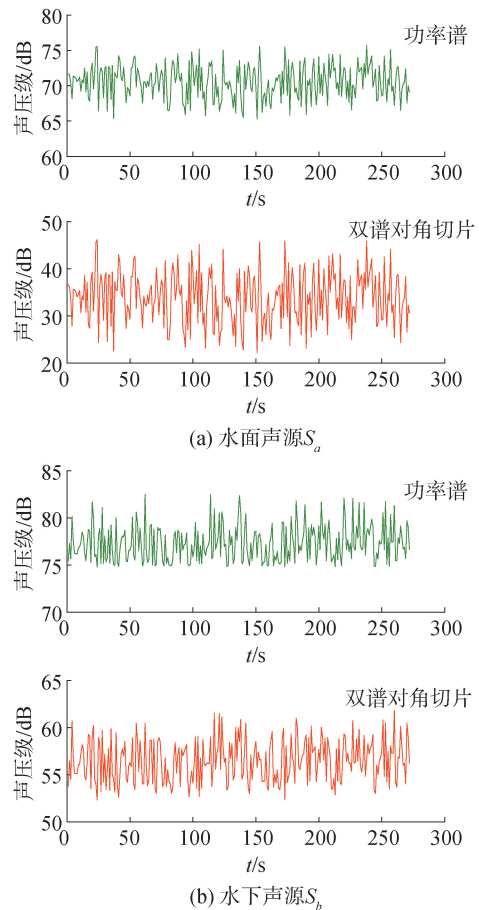


图 4 基于功率谱和基于双谱对角切片能量谱的线谱起伏情况对比

Fig. 4 Comparison of line spectral fluctuations based on power spectrum and bispectral diagonal slice energy spectrum

图 5(a) 中基于功率谱的水面/水下声源线谱有效判阀门限 λ 的取值范围为 $[1.108, 1.111]$,有效区间宽度仅为 0.003;图 5(b) 中基于双谱对角切片能量谱的水面/水下声源线谱有效判阀门限 λ 的取值范围为 $[1.153, 1.662]$,有效区间宽度扩大至 0.509。相较于传统的功率谱分析方法,所提算法将判阀门限的有效取值范围拓宽了 0.506,表明基于双谱对角切片能量谱的 BLSFI 指数能够更有效地增加水面与水下线谱起伏特性的区分度。

3 海试试验

为了验证所提出的双谱对角切片处理方法在真实海洋环境中的目标特征提取性能,在中国南海浅海水域进行了海试试验。试验环境水深 138 m,海面声速约为 1 547 m/s;负跃层在 8~90 m,声速由 1 547 m/s 减小至 1 519 m/s;下部 90~138 m 声速约为 1 519 m/s。海底声速 1 531 m/s,密度 ρ 为

$1\ 583\ \text{kg/m}^3$, 衰减系数 $\alpha=0.168\ \text{dB}/(\text{km}\cdot\text{Hz})$ 。

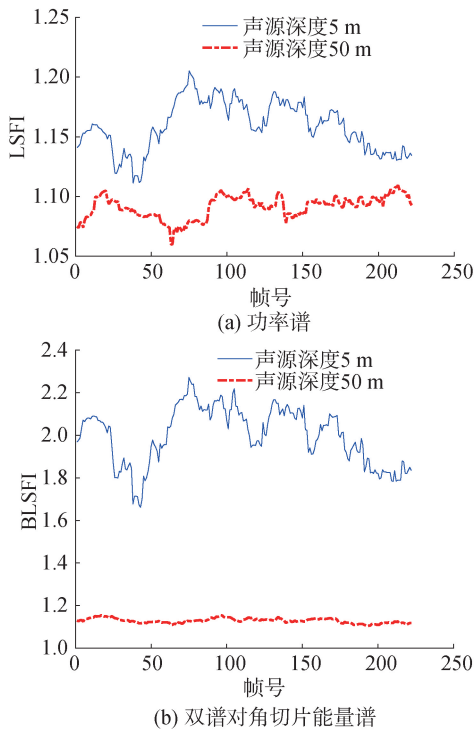


图 5 水面、水下声源线谱的起伏指数

Fig. 5 Line spectrum fluctuation index for surface and underwater sources

试验所用的接收阵为 16 阵元的圆环阵, 试验过程中, 目标船 1 携带深度为 10 m 的声源 S_l 漂流, 声源 S_l 发出频率为 21 Hz、源级为 158.8 dB 的线谱信号, 圆环阵与目标船 1 之间的距离约为 4.5 km; 目标船 2 携带深度为 50 m 的声源 S_d 漂流, 声源 S_d 发出频率为 23 Hz、源级为 158.8 dB 的线谱信号, 圆环阵与目标船 2 之间的距离约为 4.0 km。

选取第 16 阵元的接收数据进行处理与分析, 截取线谱信号持续发射时间内的 170 s 阵元接收信号, 分析声源 S_l 发射的 21 Hz 线谱信号和声源 S_d 发射的 23 Hz 线谱信号, 得到的归一化 LOFAR 图如图 6 所示。

从图 6 中可以看出, 基于双谱对角切片得到的 LOFAR 图对海洋环境噪声具有较好的抑制作用, 能够有效降低背景噪声强度, 同时, 图 6(c) 在 21 Hz 频率处的谱线相较于图 6(a) 中更加明亮, 同时图 6(d) 在 23 Hz 频率处的谱线相较于图 6(b) 中也更加清晰明亮, 这一结果与仿真实验结果相符合。

在功率谱和双谱对角切片能量谱中将声源发射频率 21、23 Hz 处的线谱成分提取出来, 得到的线谱能量随时间变化情况如图 7 所示。

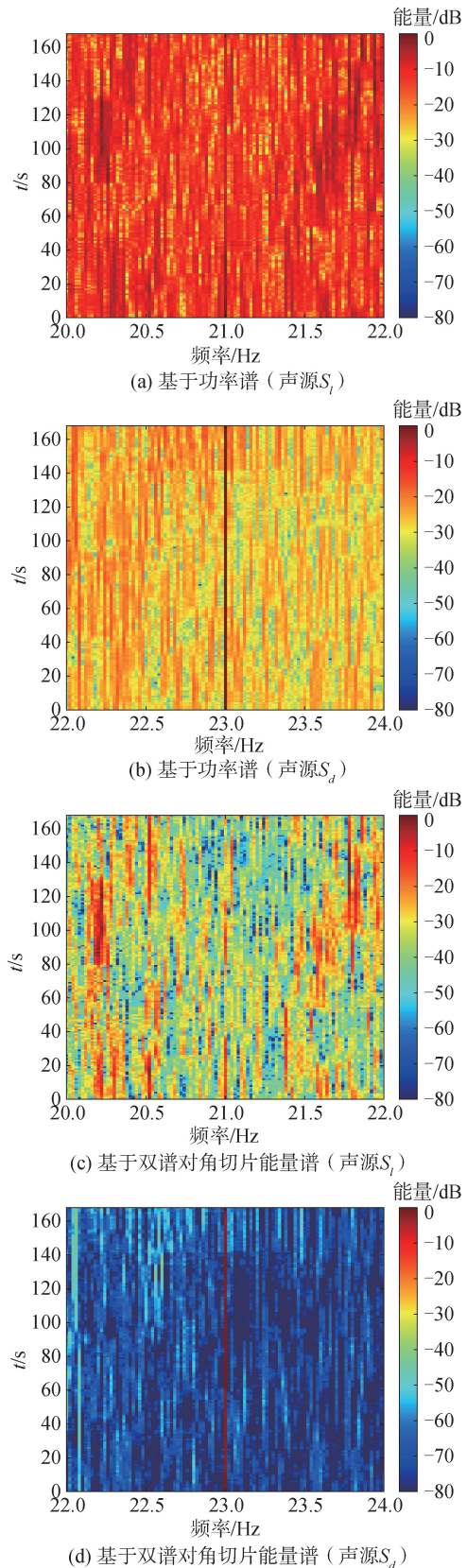


图 6 基于功率谱和基于双谱对角切片能量谱的 LOFAR 图 (海试数据)

Fig. 6 Lofargrams based on power spectra and bispectral diagonal slice energy spectra (sea trial data)

定量分析线谱能量起伏曲线的峰谷值, 结果如表 2 所示。相较于功率谱, 双谱对角切片能量谱可

以将水面声源和 underwater 声源间的线谱能量起伏差距提升约 19.6 dB。对于水面声源 S_l 发射的 21 Hz 线谱,相较于功率谱,双谱对角切片能量谱将线谱起伏的峰谷值放大了约 21.4 dB;对于水下声源 S_d 发射的 23 Hz 线谱,相较于功率谱,双谱对角切片能量谱将线谱起伏的峰谷值放大了约 1.8 dB。可见,对于水面和 underwater 目标,双谱对角切片能量谱均能够有效凸显线谱的起伏特性。

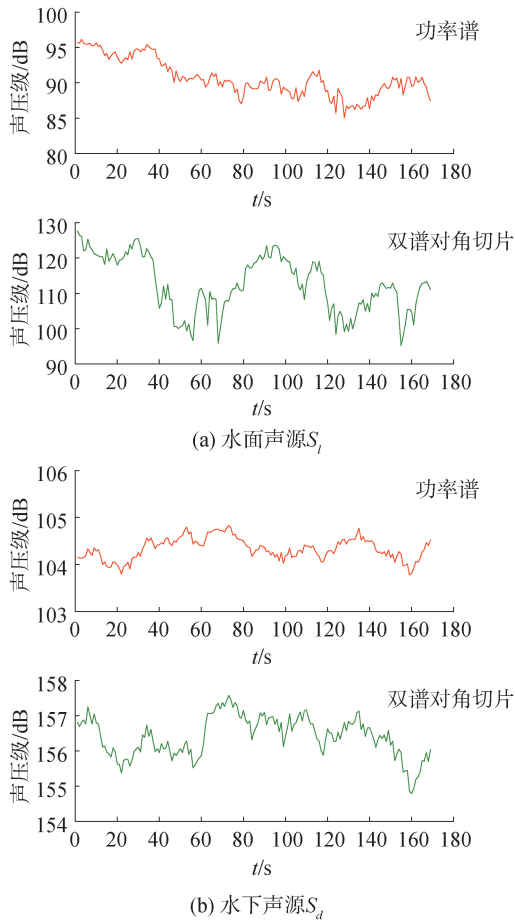


图 7 基于功率谱和基于双谱对角切片能量谱的线谱起伏情况对比(海试数据)

Fig. 7 Comparison of line spectral fluctuations based on power spectrum and bispectral diagonal slice energy spectrum (sea trial data)

表 2 功率谱和双谱对角切片能量谱的线谱起伏峰谷值对比(海试数据)

Table 2 Peak-valley comparison in fluctuation between power spectrum and bispectral diagonal slice energy spectrum (sea trial data) dB

声源	功率谱	双谱对角切片能量谱
	峰值/谷值/峰谷值	峰值/谷值/峰谷值
水面声源 S_l	96.1/85.0/11.1	127.7/95.2/32.5
水下声源 S_d	104.8/103.8/1.0	157.6/154.8/2.8

此外,双谱对角切片能量谱对水面目标的线谱起伏峰谷值放大量比其对水下目标的线谱起伏峰谷值放大量高出了 19.6 dB 左右,这说明双谱对角切

片能量谱能够有针对性地凸显不同深度的水声目标的线谱起伏特性。对于线谱能量起伏较大的水面目标,双谱能够显著凸显其起伏特征,而对于线谱能量起伏较小的水下目标,双谱虽然也能够一定程度上凸显其起伏特征,但是凸显程度远低于水面目标。这一有针对性的凸显特性可以使得水面和 underwater 线谱目标的起伏特性差异更明显、起伏曲线区分度更高。

选取子序列长度 $L=50$,相邻 2 个子序列的重叠率为 98%,计算得到的 119 帧基于功率谱的水面、水下声源线谱的 LSF 指数如图 8(a) 所示,119 帧基于双谱对角切片能量谱的水面、水下声源线谱的 BLSFI 指数如图 8(b) 所示。

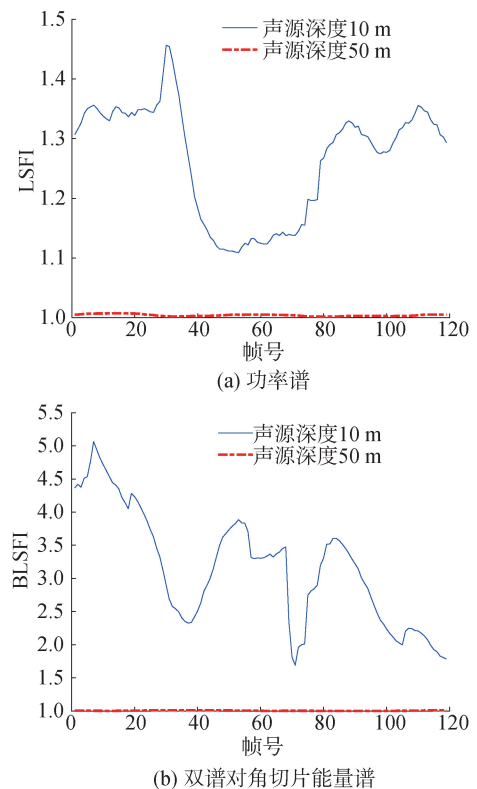


图 8 水面、水下声源线谱的起伏指数(海试数据)

Fig. 8 Line spectrum fluctuation index for surface and underwater sources (sea trial data)

图 8(a) 中基于功率谱的水面/水下声源线谱有效判决门限值 λ 的取值范围为 $[1.007, 1.109]$,有效区间宽度仅为 0.102;图 8(b) 中基于双谱对角切片能量谱的水面/水下声源线谱有效判决门限值 λ 的取值范围为 $[1.01, 1.69]$,有效区间宽度扩大至 0.68。相较于传统的功率谱分析方法,所提出的算法将判决门限 λ 的有效取值区间拓宽了约 5.7 倍。

以上海试数据处理结果和仿真实验结果相吻合,本文所提出的基于双谱分析的辐射噪声线谱源深度辨识方法可以大幅增加水面、水下目标线谱起伏的差异,基于双谱对角切片能量谱构建的 BLSFI 指数能够有效增强水面与水下声源的线谱可分性。

4 结论

1) 针对基于功率谱线谱幅度起伏的水面/水下目标辨识方法在低信噪比条件下性能下降问题,提出的一种基于双谱分析的辐射噪声线谱源深度辨识方法有效。

2) 本文阐述了双谱分析下线谱的幅度及起伏特征,并给出了基于双谱的 BLSFI 指数计算方法。此外,本文利用双谱对角切片实现了目标特征的降维处理,计算复杂度降低。

3) 仿真结果和海试试验结果均表明:利用本文所提方法可以使得水面、水下目标起伏特性差异更明显、起伏曲线区分度更高;基于双谱对角切片能量谱的 BLSFI 指数能够拓宽判决门限的有效取值范围,在辐射噪声线谱源深度辨识方面展现出更优的判别性能。

参考文献:

- [1] URICK R J. Principles of underwater sound [M]. 3rd ed. Los Altos; Peninsula Publishing, 1983.
- [2] 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.
- [3] 陈雪峰, 张中戈, 黄斌. 基于线谱和 DEMON 谱的水声目标分类[J]. 指挥信息系统与技术, 2019, 10(4): 61-65.
CHEN Xuefeng, ZHANG Zhongge, HUANG Bin. Classification for underwater acoustic targets based on line spectrum and DEMON spectrum [J]. Command information system and technology, 2019, 10(4): 61-65.
- [4] CLAY C S, WANG Y Y, SHANG E C. Effects of seafloor scattering on propagation in shallow water [J]. Journal of the acoustical society of America, 1985, 77(2): 424.
- [5] GEORGE J. Modal beamforming using a vertical array in shallow water [J]. Journal of the acoustical society of America, 1996, 99(6): 3439.
- [6] WAGSTAFF R A. The AWSUM filter: a 20 dB gain fluctuation-based processor [J]. IEEE journal of oceanic engineering, 1997, 22(1): 110-118.
- [7] PREMUS V. Modal scintillation index: a physics-based statistic for acoustic source depth discrimination [J]. Acoustical society of America journal, 1999, 105(4): 2170-2180.
- [8] 张莉. 基于时空起伏特性的线谱辨识方法[D]. 南京: 东南大学, 2021.
ZHANG Li. Line spectrum identification method based on spatio-temporal fluctuation characteristics [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [9] 邓玉鑫, 刘雄厚, 杨益新. 浅海环境中用于目标深度属性判别的线谱起伏特征量分析[J]. 物理学报, 2024: 1-36.
DENG Yuxin, LIU Xionghou, YANG Yixin. Analysis of line spectrum fluctuation characteristic for target depth attribute discrimination in shallow sea environment [J]. China industrial economics, 2024: 1-36.
- [10] 古龙, 闵捷. 船舶振动噪声控制技术的现状与发展 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41(23): 1-5.
GU Long, MIN Jie. Review of vibration and noise control technology for submarines [J]. Ship science and technology, 2019, 41(23): 1-5.
- [11] 张晗, 闫大海, 钱治强. 水面舰船隐身技术研究 [J]. 舰船科学技术, 2020, 42(19): 140-145.
ZHANG Han, YAN Dahai, QIAN Zhiqiang. Research on surface ship stealth technology [J]. Ship science and technology, 2020, 42(19): 140-145.
- [12] 夏鸿宝. 多传感器目标宽容性特征获取研究 [D]. 南京: 东南大学, 2007.
XIA Hongbao. Research on tolerant feature acquisition of multi-sensor targets [D]. Nanjing: Southeast University, 2007.
- [13] 张贤达. 时间序列分析: 高阶统计量方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [14] 张晓云. 高阶统计量在水雷目标特征提取中的应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
ZHANG Xiaoyun. Application of higher-order statistics in mine target feature extraction [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [15] 关键, 伍僖杰, 丁昊, 等. 基于对角积分双谱的海面慢速小目标检测方法 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44(7): 2449-2460.
GUAN Jian, WU Xijie, DING Hao, et al. A method for detecting small slow targets in sea surface based on diagonal integrated bispectrum [J]. Journal of electronics & information technology, 2022, 44(7): 2449-2460.
- [16] TANG Li, JIANG Ting. Target identification based on diagonal slice of the complex bispectrum [C]//2014 IEEE International Conference on Communication Problem-solving. Piscataway, NJ, 2014: 303-306.
- [17] 王佳维, 许枫, 杨娟. 基于核空间联合稀疏表示和指数平滑的多基地水下小目标识别 [J]. 电子学报, 2024, 52(1): 217-231.
WANG Jiawei, XU Feng, YANG Juan. Multi-base underwater small target recognition based on joint sparse repre-

- sensation of kernel space and exponential smoothing [J]. *China industrial economics*, 2024, 52(1): 217-231.
- [18] 刘赢, 田润澜, 王晓峰. 基于深层卷积神经网络和双谱特征的雷达信号识别方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(9): 1998-2005.
- LIU Ying, TIAN Runlan, WANG Xiaofeng. Radar signal recognition method based on deep convolutional neural network and bispectrum feature[J]. *Systems engineering and electronics*, 2019, 41(9): 1998-2005.
- [19] 张帅钦, 张荣杰, 温旭东. 基于一维像选择双谱的神经网络识别算法[J]. *现代雷达*, 2020, 42(4): 46-49.
- ZHANG Shuaiqin, ZHANG Rongjie, WEN Xudong. Neural network recognition algorithm based on HRRP selective bispectrum [J]. *Modern radar*, 2020, 42(4): 46-49.
- [20] 张贤达. *现代信号处理*[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [21] 樊养余, 陶宝祺, 熊克. 舰船噪声的 $1^{1/2}$ 维谱特征提取[J]. *声学学报*, 2002, 27(1): 71-76.
- FAN Yangyu, TAO Baoqi, XIONG Ke. $1^{1/2}$ -dimensional spectral feature extraction of ship noise [J]. *Acta acustica*, 2002, 27(1): 71-76.
- [22] 吴文兵, 黄宜坚. 双谱对角切片的两种计算方法[J]. *微计算机信息*, 2012, 28(10): 66-67.
- WU Wenbing, HUANG Yijian. The analysis of HOS's coupling performance based on mechincal fault diagnosis [J]. *Microcomputer information*, 2012, 28(10): 66-67.
- [23] NIKIAS C L, RAGHUVEER M R. Bispectrum estimation: a digital signal processing framework[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1987, 75(7): 869-891.
- [24] RICHARDSON A M, HODGKISS W S. Bispectral analysis of underwater acoustic data [J]. *The journal of the acoustical society of America*, 1994, 96(2): 828-837.

本文引用格式:

- 宋楠楠, 王晓燕, 梅贝宁, 等. 双谱分析的辐射噪声线谱源深度辨识方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2025, 46(8): 1609-1617.
- SONG Nannan, WANG Xiaoyan, MEI Beining, et al. Bispectral analytical method for depth identification of radiated line spectrum sources[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2025, 46(8): 1609-1617.