

利用线谱声强干涉起伏相关系数估计波导不变量

姚远^{1,2}, 孙超^{1,2}, 刘雄厚^{1,2}, 李明杨³

(1.西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072; 2.陕西省水下信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072; 3.浙江大学 信息与工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要:针对低信噪比时难以利用低频分析记录谱中宽带连续谱条纹状干涉图样提取波导不变量的问题,提出了一种利用线谱声强干涉起伏相关系数估计波导不变量方法。该方法根据参考线谱声强干涉起伏与经过尺度伸缩变换的线谱声强干涉起伏之间存在的正比关系包含波导不变量这一事实,构造线谱声强干涉起伏相关系数以实现波导不变量估计。讨论在声源相对水听器径向和非径向2种运动模型下,将原始采样时刻代换为新的采样时刻,得到重采样后的线谱声强干涉起伏;利用相关系数表示重采样后的参考线谱声强干涉起伏与经过尺度伸缩变换后的线谱声强干涉起伏之间的相似程度,得到不同波导不变量搜索值下的相关系数,其峰值对应的搜索结果就是波导不变量真值。仿真实验和实测数据处理结果表明,所提方法能有效实现波导不变量估计。

关键词:线谱声强;干涉起伏;相关系数;波导不变量

中图分类号: TB56

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2023)03-0612-09

波导不变量最先由学者 Chuprov 提出并用于描述浅海波导简正波频散特性^[1],它定义为简正波相慢度差与群慢度差之比,可以描述声场干涉条纹斜率与声源距离、频率之间的关系,在反演、定位等方面有广泛应用,因此,估计波导不变量具有重要意义。目前常见的波导不变量估计方法主要分为三类。第一类是利用声场仿真软件计算简正波的相群速度,根据波导不变量定义,获取简正波相干项的波导不变量。然而该方法需要事先获取波导环境参数信息,以保证估计结果的准确性。第二类是利用人工投掷爆炸声源或其他类似的脉冲声源,对水听器接收信号声强进行频移补偿实现波导不变量估计。任云等^[2]利用一定水平间距的双水听器接收宽带脉冲声源信号,计算双水听器接收信号的空间相关系数,提取相关系数峰值对应的波导不变量作为估计结果。该类方法一般要求信号来自双水听器的端射方向附近。第三类是利用舰船辐射噪声源运动形成低频分析记录谱(low frequency analysis and recording, LOFAR)中条纹状干涉图样,通过提取条纹

信息估计波导不变量。Rouseff 等^[3]将距离-频率域干涉谱变换到波数-时延域,通过极坐标变换估计能应脊斜率实现波导不变量估计;Gall 等^[4]对干涉谱进行距离域傅里叶变换得到相对频散曲线,其斜率对应波导不变量的倒数;Turgut 等^[5]采用 Hough 变换参数映射方法,得到最符合声强干涉条纹特征的波导不变量值。然而,在一些场景下,机会声源(商船、货轮等)辐射噪声 LOFAR 谱中宽带连续谱干涉条纹非常微弱,上述估计方法应用效果欠佳。鉴于机会声源辐射噪声中线谱成分比连续谱成分平均高 10~20 dB,相较连续谱而言能量高的线谱更易观测^[6]。因此,研究利用线谱信息实现波导不变量估计具有可行性。

与连续谱干涉条纹物理机理类似,线谱声强随距离起伏变化也是由简正波两两干涉引起的。与连续谱干涉条纹不同的是,线谱声强干涉起伏体现在距离维度。Harms 和 Young 等^[7-8]发现在距离域上经过尺度伸缩变换的不同频率线谱声强干涉起伏之间存在正比关系,并且基于正比关系包含波导不变

收稿日期:2022-08-22

基金项目:国家自然科学基金(11534009, 12004335)资助

作者简介:姚远(1990—),西北工业大学博士研究生,主要从事水声目标位置估计研究。

通信作者:孙超(1965—),西北工业大学教授,主要从事水声信号处理研究。e-mail:csun@nwpu.edu.cn

量这一事实,通过构建似然函数实现波导不变量估计;随后研究人员在此基础上开展了一系列线谱声源参数估计研究^[9-11]。然而,上述波导不变量估计方法需要将线谱附近(不包含线谱)的接收辐射噪声视作瑞利分布,用来估计似然函数未知参数——噪声方差;而线谱附近的辐射噪声是由服从对数正态分布的连续谱和服从瑞利分布的噪声共同构成,这会导致噪声方差估计结果存在误差进而影响波导不变量估计结果。此外,通常水听器记录声场以时间作为自变量,而在上述估计方法中线谱声强以距离作为自变量,需要通过声源径向速度将随时间变化的声强映射到随距离变化的声强,其前提是声源径向运动速度恒定且已知。而实际中,由于存在声源相对水听器的最近通过距离,声源径向运动速度会随时间发生变化。

针对已有研究的不足,本文提出一种利用线谱声强干涉起伏相关系数估计波导不变量方法。考虑声源沿水听器径向运动和非径向运动2种模型,对线谱声强干涉起伏进行重采样以及利用包含波导不变量的尺度伸缩变换关系,得到满足正比关系的线谱声强干涉起伏。在假设区间范围内对波导不变量进行搜索,计算参考线谱声强干涉起伏与尺度伸缩变换后的线谱声强干涉起伏之间的相关系数,相关系数峰值对应的波导不变量搜索值作为估计结果。由于线谱声强干涉起伏的准周期结构,相关系数变化曲线会出现旁瓣,通过多线谱声强处理可以有效降低旁瓣影响。所提方法直接对水听器记录的以时间为自变量的声场进行处理,无需声源径向运动速度恒定且已知。

1 浅海波导线谱声强干涉起伏

1.1 接收信号模型

以自身旋转部件的机械噪声和螺旋桨推进噪声为主的噪声源可以建模为 K 个低频线谱分量的叠加^[8]

$$s(t) = \sum_{k=1}^K A_k e^{i(\omega_k t + \varphi_k)} \quad (1)$$

式中: k 表示线谱分量的号数; A_k 和 ω_k 分别表示第 k 个线谱的幅度和角频率; φ_k 表示线谱的相位。本文主要关注声源与水听器传播距离变化引起的幅度起伏,暂不考虑声源线谱幅度起伏,假设声源在线谱频率处辐射能量是稳定的。

根据简正波理论,波导中位于 $(0, z_s)$ 的声源到单水听器 (r, z_r) 的信道传递函数 $G(r, \omega)$ 可以表示为^[12]

$$G(r, \omega) = \frac{ie^{-i\pi/4}}{\rho(z_s) \sqrt{8\pi}} \sum_{m=1}^M \phi_m(z_s) \phi_m(z_r) \frac{e^{ik_{rm}r}}{\sqrt{k_{rm}r}} \triangleq \sum_{m=1}^M B_m e^{ik_{rm}r} \quad (2)$$

式中: k_{rm} 表示第 m 阶简正波的水平波数; ϕ_m 表示第 m 阶简正波的模式深度函数; B_m 表示声压的幅度项。水听器接收信号频谱表示为

$$P(r, \omega) = S(\omega) G(r, \omega) \quad (3)$$

式中, $S(\omega)$ 为声源 $s(t)$ 的频谱。

1.2 线谱声强干涉起伏

定义第 k 个线谱声强为^[12]

$$I_k(r) \propto P(r, \omega_k) * P^*(r, \omega_k) \approx$$

$$|A_k|^2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1, n \neq m}^M B_m B_n^* \cos(\Delta k_{rmn}(\omega_k)r) \quad (4)$$

式中, Δk_{rmn} 为第 m 阶与第 n 阶简正波的水平波数差,即 $\Delta k_{rmn} = k_{rm} - k_{rn}$ 。(4)式省略了随距离和频率慢变的非相干项,保留了简正波两两干涉叠加的相干项,该项决定了线谱声强随距离的起伏变化^[13]。

通常在多号简正波频散特性非常一致的浅海波导中,波导不变量与相互干涉的简正波号数 m, n 无关。宽带连续谱辐射噪声的接收信号声强在距离-频率平面上的恒定强度条纹轨迹满足^[12]

$$r = r_0(\omega/\omega_0)^{1/\beta} \quad (5)$$

式中, r_0 和 ω_0 分别表示参考距离和参考频率, β 表示波导不变量。根据(5)式和文献[7],轨迹上任意两频率点 ω_1 和 ω_2 处声强 $I_1(r_1)$ 和 $I_2(r_2)$ 满足如下关系

$$I_2(r_2) = I_1 \left(r_1 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^{1/\beta} \right) = \frac{A_2^2}{A_1^2} I_1(r_1) \quad (6)$$

式中: A_1 和 A_2 分别表示频率 ω_1 和 ω_2 的声源频谱幅度; r_1 和 r_2 为轨迹上两频率点声强对应的距离。

由于简正波干涉效应,在一段距离区间内线谱声强呈现起伏变化,把变化的声强称为线谱声强干涉起伏。(6)式表明,参考频率 ω_1 的线谱声强干涉起伏与经过距离域尺度伸缩变换后频率 ω_2 的线谱声强干涉起伏满足正比关系,且该正比关系包含波导不变量。这是本文估计波导不变量的基础。然而,以上的正比关系是相对距离而言,在大多数情况下,水听器记录声场是以时间作为自变量,此时正比关系并不直接满足。因此,有必要研究时间域接收

信号线谱声强干涉起伏估计波导不变量方法。

2 波导不变量估计

声源相对水听器的运动方式可以分为径向运动和非径向运动。不同运动方式下的时间域接收信号线谱声强干涉起伏不同。下面分别对这2种情况下的波导不变量估计方法进行研究。

2.1 径向运动情形

声源以绝对速度 v_0 沿水听器径向匀速运动,任意时刻 t 的声源与水听器之间的距离表示为

$$r = v_0(t_{CPA} - t) = v_0\tau \quad (7)$$

式中, t_{CPA} 表示最近通过时刻,即声源运动到相对水听器的最近通过位置 (the closest position of approach, CPA) 处的时刻。对于浅海波导中单水听器接收的机会声源线谱而言,可基于文献[14]事先获知最近通过时刻 t_{CPA} 。 τ 表示以 t_{CPA} 为参考的相对时间(下文称为相对时间)。

将(7)式代入(6)式,由于频率 ω_1 和 ω_2 声强之间的正比关系与声源绝对速度 v_0 无关,于是有

$$I_2(\tau_2) = I_2\left(\tau_1\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^{1/\beta}\right) = \frac{A_2^2}{A_1^2} I_1(\tau_1) \quad (8)$$

式中, τ_1 和 τ_2 为轨迹上两频率点声强对应的相对时间。

为利用(8)式估计波导不变量,引入相关系数概念,并利用相关系数刻画参考频率线谱声强干涉起伏与经过时间域尺度伸缩变换后的频率线谱声强干涉起伏的相似程度,实现波导不变量估计,具体过程如下。

首先,利用(5)式和(7)式,可得尺度伸缩关系

$$\tau_2 = \tau_1(\omega_2/\omega_1)^{1/\beta} \quad (9)$$

给定一段时间区间 $[\tau_L, \tau_H]$ 内的参考频率 ω_1 线谱声强干涉起伏 I_1 (下文称为参考线谱声强干涉起伏),基于尺度伸缩关系对频率 ω_2 线谱声强干涉起伏 I_2 进行插值变换,得到 \hat{I}_2 (下文称为经过尺度伸缩变换后的线谱声强干涉起伏),即

$$\hat{I}_2\left(\tau\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^{1/\beta}\right) \leftarrow \frac{\tau(\omega_2/\omega_1)^{1/\beta}}{\tau} I_1(\tau), \tau \in [\tau_L, \tau_H] \quad (10)$$

式中, τ_L 和 τ_H 分别表示起始时刻和结束时刻。定义 I_1 与 \hat{I}_2 之间的相关系数为

$$F(\beta_s) = \frac{\int_{\tau_L}^{\tau_H} \bar{I}_1(\tau) \hat{I}_2\left(\tau\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^{1/\beta_s}\right) d\tau}{\sqrt{\int_{\tau_L}^{\tau_H} \bar{I}_1^2(\tau) d\tau \int_{\tau_L}^{\tau_H} \hat{I}_2^2\left(\tau\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^{1/\beta_s}\right) d\tau}} \quad (11)$$

式中, $\bar{I}_1(\tau)$ 表示对时间区间 $[\tau_L, \tau_H]$ 内的 $I_1(\tau)$ 进行中心化处理,即 $\bar{I}_1(\tau) = I_1(\tau) - E[I_1(\tau)]$, $E[I_1(\tau)]$ 表示 $I_1(\tau)$ 的均值。 $\hat{I}_2\left(\tau\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^{1/\beta_s}\right)$ 表示对 $\hat{I}_2\left(\tau\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^{1/\beta_s}\right)$ 进行中心化处理, β_s 表示波导不变量搜索量。

由(11)式可知,相关系数随着波导不变量的变化而变化,当波导不变量是真值时,相关系数达到最大值,表明 I_1 与 \hat{I}_2 之间的相似度最高,满足正比关系。因此,本文在 $[\beta_1, \beta_2]$ 区间范围内对不同波导不变量计算相关系数,相关系数峰值对应的 β 便是参数估计结果。

2.2 非径向运动情形

图1中 CPA 处与水听器之间存在一段距离,称为最近通过距离,记为 r_{CPA} ;运动声源以 v_0 匀速驶向 CPA 处,任意时刻 t 运动声源与水听器之间的距离为

$$r = \sqrt{r_{CPA}^2 + v_0^2(t_{CPA} - t)^2} \quad (12)$$

显然,距离和时间之间是非线性关系。若声强在时间域是均匀采样,则在距离域是非均匀采样。

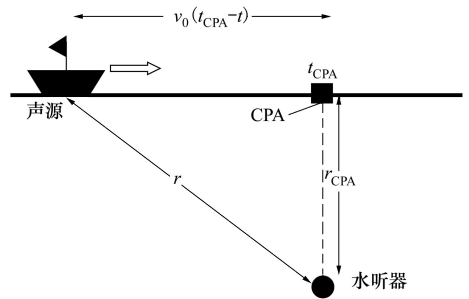


图1 声源相对水听器的非径向运动示意图

(12)式两端同时除以 v_0 ,得到新的时间^[11]

$$t' = \frac{r}{v_0} = \sqrt{b^2 + (t_{CPA} - t)^2} \quad (13)$$

将原始采样时间 t 替换为新的采样时间 t' ,对线谱声强干涉起伏 $I_k(t)$ 进行重采样,得到重采样后的线谱声强干涉起伏

$$I'_k(t') \sqrt{\frac{b^2 + (v_{\text{CPA}})^2}{v_0^2}} I_k(t) \quad (14)$$

式中, $b = \frac{r_{\text{CPA}}}{v_0}$ 表示声源的最近通过距离与速度之比,简称距速比。根据(6)式,声强在距离域均匀采样是正比关系存在的基础,由于 t' 与 r 之间满足正比关系并且 $I'_k(t')$ 是在新的时间域 t' 均匀采样,所以条纹轨迹上任意两频率点 ω_1 和 ω_2 处声强 $I'_1(t'_1)$ 和 $I'_2(t'_2)$ 满足

$$I'_2(t'_2) = I'_1\left(t'_1 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^{1/\beta}\right) = \frac{A_2^2}{A_1^2} I'_1(t'_1) \quad (15)$$

式中, t'_1 和 t'_2 为轨迹上两频率点声强对应的时间。

利用相关系数刻画在一段新的时间区间内参考频率重采样线谱声强干涉起伏与经过尺度伸缩变换后的重采样线谱声强干涉起伏之间的相似程度,实现距速比和波导不变量联合估计,具体过程如下。

首先,利用(5)式和(12)式,可得尺度伸缩关系

$$t'_2 = t'_1 (\omega_2 / \omega_1)^{1/\beta} \quad (16)$$

给定一段时间区间 $[t'_L, t'_H]$ 内的参考频率 ω_1 重采样线谱声强干涉起伏 I'_1 (下文称为重采样参考线谱声强干涉起伏),基于尺度伸缩关系对频率 ω_2 重采样线谱声强干涉起伏 I'_2 进行插值变换,得到 \hat{I}'_2 (下文称为经过尺度伸缩变换后的重采样线谱声强干涉起伏),即

$$\hat{I}'_2\left(t' \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^{1/\beta}\right) \xleftarrow{t'(\omega_2/\omega_1)^{1/\beta}} I'_1(t'), t' \in [t'_L, t'_H] \quad (17)$$

式中, t'_L 和 t'_H 分别表示起始时刻和结束时刻。定义 I'_1 与 \hat{I}'_2 之间的相关系数为

$$F(b_s, \beta_s) = \frac{\int_{t'_L}^{t'_H} I'_1(t') \hat{I}'_2\left(t' \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^{1/\beta_s}\right) dt'}{\sqrt{\int_{t'_L}^{t'_H} \bar{I}'_1{}^2(t') dt' \int_{t'_L}^{t'_H} \bar{\hat{I}}_2{}^2\left(t' \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^{1/\beta_s}\right) dt'}} \quad (18)$$

式中: b_s 表示距速比搜索量; β_s 表示波导不变量搜索量。

由(18)式可知,相关系数随着距速比和波导不变量的变化而变化,当距速比及波导不变量都是真值时,相关系数达到最大值,表明 I'_1 与 \hat{I}'_2 之间的相似度最高,满足正比关系。因此,在区间 $[b_1, b_2]$ 和 $[\beta_1, \beta_2]$ 对不同距速比和波导不变量计算相关系数,相关系数峰值对应的 b, β 便是参数估计结果。

3 仿真实验与分析

为利用数值仿真验证前述波导不变量估计方法的有效性,假设波导环境为:水深为 100 m,水体声速为 1 500 m/s,半空间声速为 1 750 m/s,密度为 1 750 kg/m³,吸收系数为 0.2 dB/λ,其中 λ 为波长。声源深度为 40 m,水听器深度为 70 m。仿真利用 Kraken 声场仿真软件。

3.1 径向运动情形

假设声源以 2 m/s 匀速运动,时间区间为 0 ~ 4 200 s,运动声源在 CPA 处的时刻为 3 800 s。信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)定义为带宽内信号功率与高斯白噪声功率的比值。水听器接收信号信噪比为 0 dB,由于运动声源辐射噪声 LOFAR 谱中线谱成分较连续谱成分能量高,将 225, 250 和 275 Hz 线谱声强提高 15 dB 作为已知线谱声强起伏,如图 2 所示。

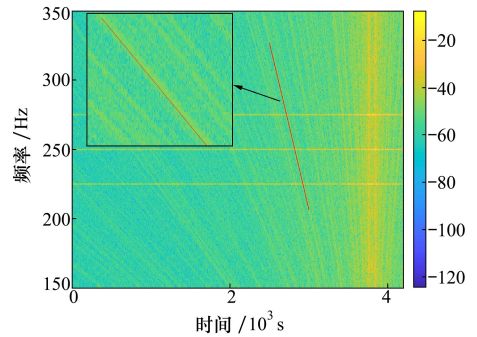


图2 水听器接收信号的 LOFAR 谱

可以看出,简正波之间的相互干涉作用致使运动声源多频点声强随时间发生明暗起伏变化,产生了类似干涉条纹在特定频率上调制的结果。3 条线谱声强干涉起伏随相对时间的变化曲线,如图 3 所示,图中黑色实线表示频率 225 Hz 参考线谱声强干涉起伏 I'_1 与经过尺度伸缩变换后的 275 Hz 线谱声强干涉起伏 \hat{I}'_2 的 3 对声强极大值的连线,它们是波导不变量真值条件下尺度伸缩关系的示意。黑色虚线表示在波导不变量非真值条件下尺度伸缩关系的示意。时间区间 $[1\ 500, 2\ 300]$ 内,频率 225 与 275 Hz 对应 I'_1 与 \hat{I}'_2 的相关系数随波导不变量的变化曲线如图 4 所示。

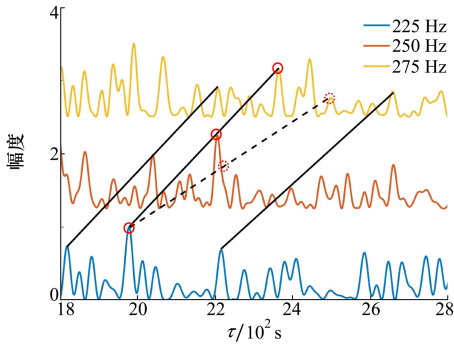


图 3 频率 225,250 和 275 Hz 线谱声强干涉起伏

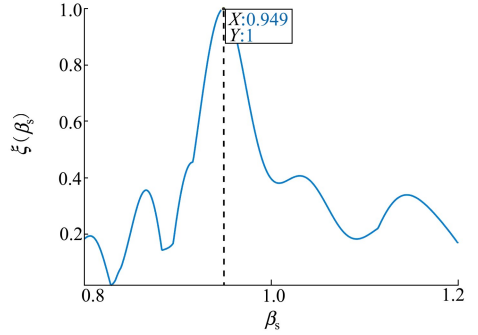


图 5 多线谱声强干涉起伏相关系数随波导不变量的变化

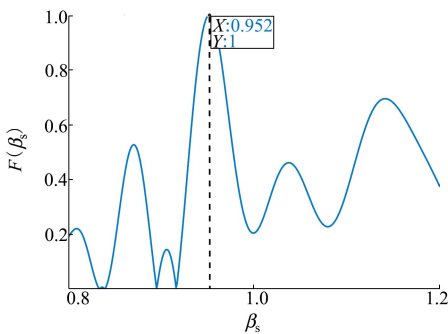


图 4 相关系数随波导不变量的变化曲线

图 4 表明,一方面,相关系数在波导不变量真值处达到峰值;另一方面,相关系数在某些波导不变量搜索值处存在较高的旁瓣。这主要是由于在波导不变量非真值条件下的尺度伸缩关系指向其他的声强极大值(如图 3 黄色线上的红色虚线圈),此时 I_1 与 I_2 具有一定的相似性,相关系数较高。当存在噪声干扰,这些旁瓣可能高于真实峰,成为伪解。因此,需要对旁瓣进行抑制。

从图 3 可以看出,在波导不变量真值条件下,黑色实线经过 250 Hz 线谱声强干涉起伏的极大值(如橙色线的红色实线圈),而黑色虚线对应非极大值(如橙色线的红色虚线圈),基于此,通过分别求取多个频率的参考线谱声强干涉起伏和经过尺度伸缩变换后的线谱声强干涉起伏之间相关系数之和(下文称为多线谱声强干涉起伏相关系数),可以实现相关系数旁瓣抑制效果。

频率 225 Hz 和 250 Hz 的参考线谱声强干涉起伏分别与经过尺度伸缩变换后的 275 Hz 线谱声强干涉起伏之间的相关系数之和的变化曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出,相关系数最高的旁瓣由图 4 中的 0.7 降低到了 0.4,得到有效抑制。相关系数峰值对应波导不变量为 0.949,与之前波导不变量估计结果之间相差 0.003。这主要由于不同频率线谱声强干涉起伏结构存在细小差别,致使波导不变量估计结果存在细微差异,认为它们都是真实波导不变量的反映。为不失一般性,给出各个时间区间的波导不变量估计结果,如图 6 所示。

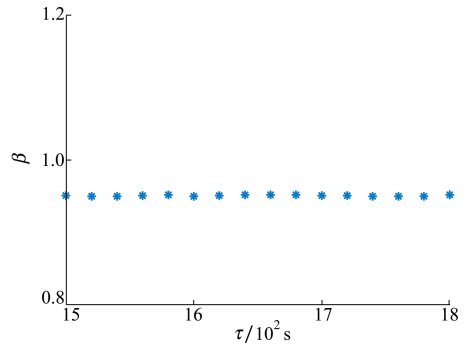


图 6 不同时间区间的多线谱声强干涉起伏的波导不变量估计结果

其中,时间区间长度保持一定,起始时间从 1 500 s 变化到 1 800 s,步长为 20 s。可以看出,各时间区间下的波导不变量估计结果基本一致,以它们的均值 0.95 作为估计结果。为验证波导不变量结果的准确性,将基于 $\beta=0.95$ 得到的时间-频率关系曲线(图 2 中红色实线)与干涉条纹进行对比。可见,它与干涉条纹保持一致,表明估计结果的正确性。

3.2 非径向运动情形

假设运动声源在 CPA 处的时刻为 3 800 s,该时刻声源相对水听器的最近距离为 800 m。水听器接收信号的 LOFAR 谱如图 7 所示。给出时间区间 2 000~3 800 s 内频率 225,250 和 275 Hz 线谱声强

干涉起伏如图 8a) 所示。通过 (14) 式对原始采样时间的线谱声强进行重采样, 声强随新的采样时间的干涉起伏如图 8b) 所示。黑色实线表示 3 条重采样线谱声强干涉起伏的极大值的对应关系, 即波导不变量为真值时的尺度伸缩关系。与之前类似, 依据此关系通过尺度伸缩变换得到的多线谱声强干涉起伏之间满足正比关系, 此时相关系数最大。当距速比和波导不变量的搜索值偏离真实值时, 正比关系不满足, 相关系数减小。

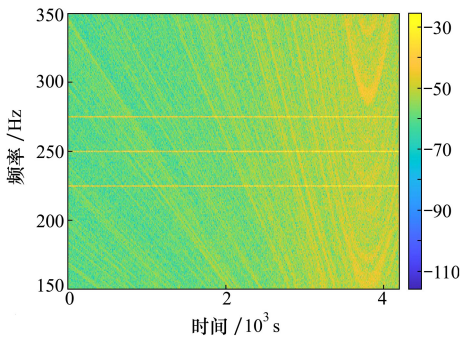


图 7 水听器接收信号的 LOFAR 谱

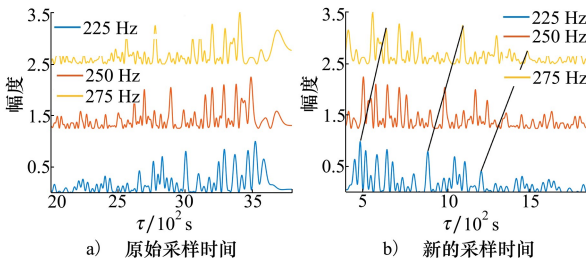


图 8 频率 225, 250 和 275 Hz 多线谱声强干涉起伏

设距速比的搜索区间为 $[200, 600]$, 搜索间隔为 1; 波导不变量的搜索区间为 $[0.8, 1.2]$, 搜索间隔为 0.001。根据 (14) 式和 (17) 式, 利用时间区间 $[2\ 700, 3\ 800]$ 内重采样后的频率 225 Hz 和 250 Hz 参考线谱声强干涉起伏, 分别与尺度伸缩变换后的重采样 275 Hz 线谱声强干涉起伏之间的相关系数如图 9 所示。

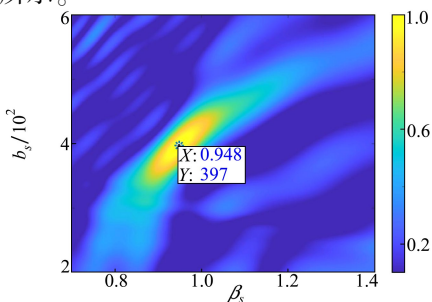


图 9 利用多线谱声强干涉起伏计算得到相关系数

从图 9 可以看出, 相关系数主瓣集中分布在真实距速比和波导不变量附近, 其中相关系数峰值对应波导不变量和距速比分别为 0.948 和 397, 相较于 3.1 节估计结果 0.95 仅存在微小偏差。

图 10 给出了不同时间区间的波导不变量和距速比估计结果。其中, 时间区间从 $[2\ 300, 3\ 500]$ 到 $[2\ 600, 3\ 800]$, 步长为 20 s。蓝色星号表示各时间区间的参数估计结果。红色方框表示通过 K-means 聚类算法求得各区间参数估计结果分布的质心, 对应距速比和波导不变量估计值分别为 398.8 和 0.947, 后者与 3.1 节估计结果 0.95 几乎一致, 表明所提方法能有效实现波导不变量估计。

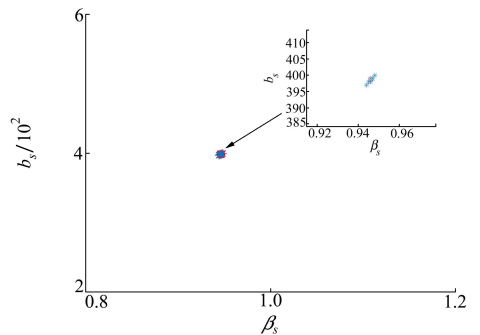


图 10 不同时间区间多线谱声强干涉起伏的参数估计结果

4 实测数据验证

数据选自 SWellEx-96 水声试验^[15], 由于本文假设声源在线谱频率处辐射能量是稳定的, 故采用试验 S5 单频信号数据对波导不变量估计方法有效性进行验证。垂直线列阵 (vertical line array, VLA) 位置处水深约为 213 m, 海底有 23.5 m 的泥沙层, 覆盖在 800 m 厚的岩石层上, 声速剖面选自第 5 个站点 CTD 数据, 如图 11 所示。声源深度为 9 m, 接收器为 VLA 的第 10 号水听器 (以下简称水听器), 深度大约为 150 m。

声源沿着 200 m 等水深线以 2.5 m/s 速度自南向北运动, 行进时长 75 min。根据安装在声源和 VLA 的 GPS 系统, 声源-接收器之间的实际距离随时间变化如图 12 所示。声源相对水听器的最近通过时间约为 3 540 s, 最近通过距离约为 900 m。图 12 中的模拟距离表示运动声源与 CPA 位置之间的距离随时间的变化。蓝色括号表示 0~30 min 时间区间, 此区间内声源相对水听器距离较远, 模拟距离与实际距离基本一致, 最近通过距离的影响可以忽

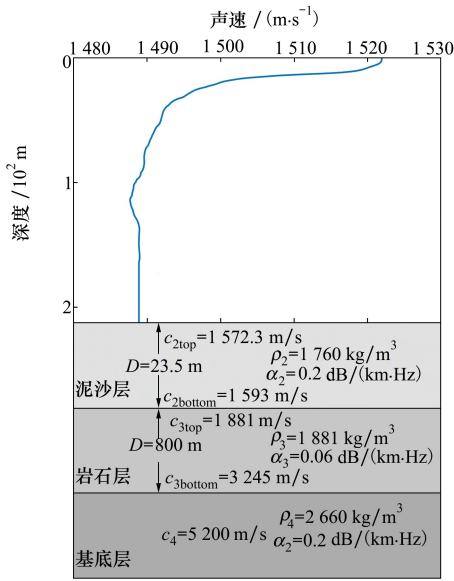


图 11 SWellEx-96 试验的波导环境

水听器采样频率是 1 500 Hz, 约以 1.36 s 为间隔(采样点数为 2 048), 重叠率为 50%。图 13 给出了水听器记录时间区间 0 ~ 75 min 内接收信号 LOFAR 谱。由于声源-水听器相对运动产生的多普勒效应, 选取声源相邻频率窗中最大声强作为该时刻声强值。

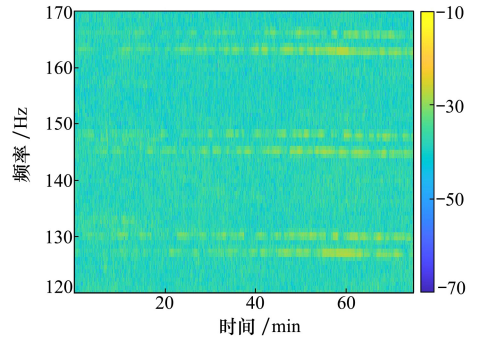


图 13 带宽 120~170 Hz 内水听器接收信号 LOFAR 谱

略, 可以将声源看作沿着水听器径向运动; 绿色括号表示 45~59 min 时间区间, 声源随着时间增加逐渐接近水听器, 最近通过距离的影响不可忽略, 模拟距离与实际距离之间的差异明显。下面将使用上述 2 段时间区间内声强干涉起伏对第 3 节中 2 种运动模型估计波导不变量方法的有效性进行验证。

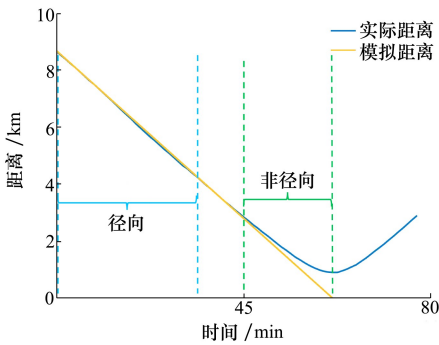


图 12 声源与水听器之间距离随时间的变化曲线

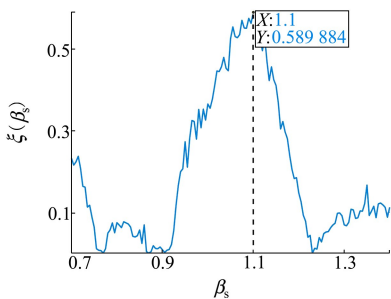


图 14 径向运动模型下的相关系数随波导不变量变化曲线

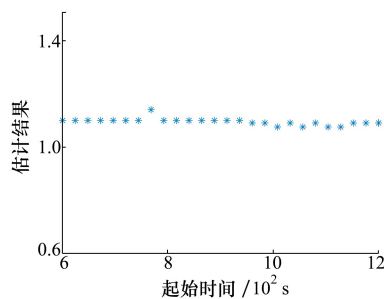


图 15 不同时间区间的波导不变量估计结果

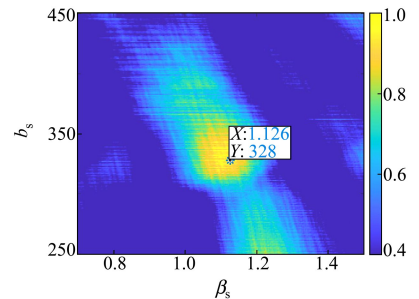


图 16 非径向运动模型下利用多线谱声强干涉起伏计算得到相关系数

利用 15~27 min 时间区间内频率 127 和 145 Hz 参考线谱声强干涉起伏, 通过 (10) 式得到尺度伸缩变换后的频率 163 Hz 线谱声强干涉起伏, 多线谱声强干涉起伏相关系数随波导不变量搜索值的变化曲线如图 14 所示。

考虑不同时间区间下的波导不变量估计结果。时间区间长度保持不变, 起始时间从 10~20 min, 步长为 0.4 min。不同时间区间的多线谱声强干涉起伏相关系数峰值对应波导不变量估计结果如图 15 所示。可以看出, 不同时间区间波导不变量估计结果基本稳定在 1.11 左右, 相较图 6 估计结果存在起伏, 可能是由于试验海域地形不平坦、海深变化对波导不变量产生影响。

时间区间 45~57 min 内的频率 127 和 145 Hz 重采样参考线谱声强干涉起伏与尺度伸缩变换后的频率 163 Hz 重采样线谱声强干涉起伏之间的相关

系数如图 16 所示。其中,波导不变量估计结果为 1.126,与径向运动模型下的估计结果 1.11 基本保持一致。保持时间区间长度不变,起始时间从 45 ~ 47 min,步长为 0.2 min,各时间区间的波导不变量和距速比估计结果,如图 17 所示。蓝色星号表示各时间区间的参数估计结果。红色方框表示各区间参数估计结果分布的质心。对应距速比和波导不变量估计值分别为 312.3 和 1.15。表明所提方法能有效实现波导不变量估计。

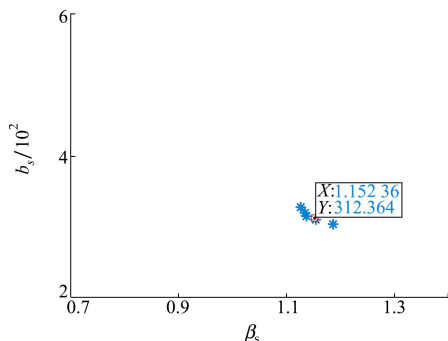


图 17 不同时间区间多线谱声强干涉起伏的参数估计结果

5 结 论

本文研究了低信噪比下利用线谱声源提取波导不变量的问题,根据参考线谱声强干涉起伏与尺度伸缩变换后的线谱声强干涉起伏存在的正比关系包含波导不变量这一事实,提出了一种利用时间域线谱声强干涉起伏相关系数估计波导不变量方法。通过理论分析、仿真实验和实测数据处理得到了如下结论:①对于声源相对水听器径向和非径向 2 种运动模型,通过对原始采样时间的线谱声强干涉起伏在新的采样时间下进行重采样,参考线谱声强干涉起伏与经过尺度伸缩变化的线谱声强干涉起伏满足正比关系。无需声源相对水听器径向运动,也不要已知声源运动速度;②相关系数旁瓣由线谱声强干涉起伏准周期结构导致,通过采取多线谱处理一定程度上降低了相关系数旁瓣;③相比宽带连续谱,机会声源线谱声强干涉起伏可以在更低信噪比下实现波导不变量估计。

参考文献:

- [1] BREKHOVSKIKH L, LYSANOV Y. Fundamentals of Ocean Acoustics[M]. 2nd ed. New York, USA: Springer-Verlag, 1991: 140-145
- [2] 任云, 戚聿波, 周士弘, 等. 声强谱频移补偿的波导不变量和距离估计方法[J]. 声学学报, 2014, 39(3): 319-323
REN Yun, QI Yubo, ZHOU Shihong, et al. Waveguide invariant and range estimation based on frequency-shift-compensation of underwater acoustic intensity spectrograms[J]. Acta Acustica, 2014, 39(3): 319-323 (in Chinese)
- [3] ROUSEFF D, SPINDEL R C. Modeling the waveguide invariant as a distribution[C]// American Institute of Physics Conference, 2002: 137-148
- [4] GALL Y L, BONNEL J. Passive estimation of the waveguide invariant per pair of modes[J]. The Journal of the Acoustic Society of America, 2013, 134(2): EL230-EL236
- [5] TURGUT A M, ROUSEFF D. Broadband source localization using horizontal-beam acoustic intensity striations[J]. The Journal of the Acoustic Society of America, 2010, 127(1): 73-83
- [6] 吴国清, 李靖, 陈耀明, 等. 舰船噪声识别(I)——总体框架线谱分析和提取[J]. 声学学报, 1998, 23(5): 394-400
WU Guoqing, LI Jing, CHEN Yaoming, et al. Ship radiated-noise recognition(I) the overall framework, analysis and extraction of line-spectrum[J]. Acta Acustica, 1998, 23(5): 394-400 (in Chinese)
- [7] HARMS A, ODOM J L, KROLIK J. Ocean acoustic waveguide invariant parameter estimation using tonal noise sources[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2015
- [8] YOUNG A, HARMS H, HICKMAN G. Waveguide-invariant-based ranging and receiver localization using tonal sources of opportunity[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2019, 45(2): 631-644
- [9] 高大治, 翟林, 王好忠, 等. 利用线谱起伏实现目标测距[J]. 声学学报, 2017, 42(6): 669-676
GAO Dazhi, ZHAI Lin, WANG Haozhong, et al. Passive ranging using the fluctuation of target tonal acoustic intensity[J]. Acta Acustica, 2017, 42(6): 669-676 (in Chinese)
- [10] 徐国军, 笮良龙, 赵建昕, 等. 声场干涉结构相似度匹配的目标运动参数估计[J]. 声学学报, 2020, 45(4): 527-534
XU Guojun, DA Lianglong, ZHAO Jianxin, et al. The target motion parameters estimation based on the acoustic interference

structure similarity match[J]. *Acta Acustica*, 2020, 45(4): 527-534 (in Chinese)

- [11] CHI Jing, GAO Dazhi, ZHAO Jianxin, et al. Motion parameter estimation of multitone sources with a single hydrophone[J]. *The Journal of the Acoustic Society of America*, 2021, 1(1): EL1-EL6
- [12] JENSEN F, KUPERMAN W, PORTER M, et al. *Computational ocean acoustics*[M]. New York, USA: Springer Science & Business Media, 2011: 133-360
- [13] 郭国强, 杨益新, 孙超, 等. 浅海低频本地海底混响的波导不变性结构及抑制方法研究[J]. *声学学报*, 2009, 34(6): 506-514
- GUO Guoqiang, YANG Yixin, SUN Chao, et al. Waveguide invariance structure for low frequency monostatic bottom reverberation mitigation in shallow water[J]. *Acta Acustica*, 2009, 34(6): 500-501 (in Chinese)
- [14] 张博轩, 杨益新, 郭西京. 抵消 Wigner-Ville 分布交叉项的窄带运动声源无源测速[J]. *声学学报*, 2021, 46(6): 974-982
- ZHANG Boxuan, YANG Yixin, GUO Xijing. Cross-term rejection in the Wigner-Ville distribution for velocity estimation of a narrowband sound source[J]. *Acta Acustica*, 2021, 46(6): 974-982 (in Chinese)
- [15] Marine Physical Laboratory. The SWellEx-96 Experiment[EB/OL]. (1996-05-10)[2023-02-15]. <http://swellx96.ucsd.edu/index.htm>

Waveguide invariant estimation based on correlation coefficient of tonal acoustic intensity interference fluctuation

YAO Yuan^{1,2}, SUN Chao^{1,2}, LIU Xionghou^{1,2}, LI Mingyang³

- (1.School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.Shaanxi Key Laboratory of Underwater Information Technology, Xi'an 710072, China;
3.College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The waveguide invariant is usually not extracted from the striation pattern of broadband continuous spectrum in the low frequency analysis and recording spectrum at low signal-to-noise ratio. In this paper, the correlation coefficient of multi-tonal acoustic intensity interference fluctuation is utilized to estimate waveguide invariant. Since the proportional relationship between the reference intensity interference fluctuation and the scaled intensity interference fluctuation is dependent on waveguide invariant, the waveguide invariant estimation can be done. Firstly, the tonal intensity interference fluctuation has been resampled in the new time domain under the radial and non-radial motion models respectively. Then, the similarity degree between the resampling reference tonal intensity interference fluctuation and the scaling tonal intensity interference fluctuation can be described by correlation coefficient, and the peak of correlation coefficient is corresponding to the true value. Finally, the numerical results and the experimental results prove the proposed method's effectiveness.

Keywords: tonal acoustic intensity; interference fluctuation; correlation coefficient; waveguide invariant

引用格式: 姚远, 孙超, 刘雄厚, 等. 利用线谱声强干涉起伏相关系数估计波导不变量[J]. *西北工业大学学报*, 2023, 41(3): 612-620

YAO Yuan, SUN Chao, LIU Xionghou, et al. Waveguide invariant estimation based on correlation coefficient of tonal acoustic intensity interference fluctuation[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2023, 41(3): 612-620 (in Chinese)