

运动目标辐射声场干涉结构映射域特征研究*

林旺生¹⁾²⁾ 梁国龙^{1)†} 王燕¹⁾ 付进¹⁾ 张光普¹⁾

1) (哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

2) (杭州应用声学研究所声纳技术重点实验室, 杭州 310012)

(2013年8月26日收到; 2013年11月4日收到修改稿)

浅海低频声场呈稳定而显著的干涉特征, 并蕴含声源状态和波导特性等信息. 本文研究运动目标辐射声场干涉结构的简化映射以及映射域能量分布对目标运动状态的指示特征. 理论分析了声压场和矢量声场空(时)频干涉谱图的二维傅里叶变换映射特征, 推导了匀速运动目标时频干涉谱图映射域能量脊斜率与波导不变量以及距变率、航向角的关系式, 证明了映射域脊斜率符号、脊斜率绝对值变化等对目标来袭或远离以及目标威胁程度的指示, 并进行了数值仿真和海上试验研究. 实测结果与理论、仿真分析有较好的一致性. 研究表明: 二维傅里叶变换可将声压场和矢量场时(空)频谱图干涉结构简化, 匀速运动目标辐射声场干涉结构映射域的能谱脊斜率、距变率、航向角与波导不变量有解析关系式, 声强谱、动能密度谱、声强流谱等声场干涉结构经映射后更为一致, 映射域脊能简明的指示目标运动状态和威胁程度.

关键词: 目标运动指示, 二维傅里叶变换, 波导不变量, 声场干涉结构

PACS: 43.20.Mv, 43.30.+m, 43.30.Bp

DOI: 10.7498/aps.63.034306

1 引言

浅海声场干涉结构是海洋声学研究的热点问题之一^[1-4]. 早在上世纪六七十年代, 便有浅海波导干涉现象的海上试验观测报道^[5]. 其后有大量学者研究了波导中宽带信号传播空频干涉结构特征与形成机理. 他们研究表明^[6], 号数相近的简正模式干涉会在距离-频率二维平面上形成条状明暗相间的干涉纹理结构. 到20世纪80年代初, Chuprov^[7]提出了具有开创意义的波导不变量理论, 指出空频干涉条纹可由不随频率和模式阶数变化的某个标量值 β 刻画, 称为波导不变量. 随后, 大量学者就不同波导条件下空频干涉结构和波导不变量的时空稳定性展开充分的研究^[8-11]. 近10年来, 浅海声场干涉结构和波导不变量基础及应用研究更是兴起热潮^[12-21], 声场干涉结构的物理特征

研究已深入到矢量场^[15-17,19-21], 而干涉结构的应用更是涉及地声参数反演、海洋参数监测、提高水平纵向相关性、被动测距、时反聚焦等水声物理和水声信号处理的诸多方面^[1-4].

经常观测到的浅海波导声场干涉结构是运动舰船(目标)辐射声场的时频干涉条纹, 众多学者^[11,22-24]对其时频干涉谱图二维平面条纹分布特征进行了深入的研究. D'Spain和Kuperman^[11]海试观测到了运动目标辐射声强谱的干涉谱图, 导出了具有普遍意义的条纹强度等值线方程. Tao等^[22]研究了匀速直线运动目标辐射时频干涉谱图特征, 基于简正波和波导不变量理论推导了条纹强度等值线的波导不变量抛物线族方程. Turgut等^[23]对运动目标辐射时频干涉谱图特征展开了全面更细致的分析, 指出条纹强度等值线的抛物线开口宽度取决于波导不变量, 当声源在近距离高速通过时干涉条纹呈直线状分布; 运动目标辐射时频干

* 国家自然科学基金(批准号: 51279043, 61201411, 51209059, 51009042)、水声技术重点实验室基金(批准号: 9140C200203110C2003, 9140C200802110C2001)和黑龙江省普通高等学校青年学术骨干支持计划(批准号: 1253G019)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lianguolong@hrbeu.edu.cn

涉谱图蕴含了最近通过时刻、伪距速比(最近通过距离与速度的比)、波导不变量等参数,通过Hough变换可以提取目标运动参数和 β ,联合方位时间历程图估计能得到目标运动航向和最近通过时刻等更多信息.余贇等^[24]也研究了基于运动目标辐射时频干涉谱图特征的目标运动参数和波导不变量估计算法.李启虎等^[13]基于双路径射线声学理论分析了匀速运动目标时频谱图干涉条纹分布特征,得到了条纹强度等值线的双曲线方程.

总体而言,空(时)频干涉谱图条纹分布是复杂的,除条纹斜率外,条纹尺寸、位置均蕴含有声源状态和信道特性等丰富的信息.有学者^[25-28]将空频干涉谱图复杂的条纹分布简化映射至映射域用于提取更为关注的条纹斜率(波导不变量)信息.Yang^[25]对空频干涉谱图的二维傅里叶变换映射进行了深入的分析,他的研究表明,波导不变量能由空频干涉谱图的映射域脊斜率计算得到,作者通过数值仿真研究还指出近距离快速目标与远程缓变干扰的辐射声场干涉谱图映射域脊斜率存在差异,并可利用映射域脊斜率抗干扰,抗干扰的增益约为5—7 dB. Rouseff 等^[26]也推导了空频干涉谱图映射域脊的波导不变量公式,并认为 β 应建模成受影响的一种分布形式,仿真研究了海洋环境对 β 值的影响. Baggeroer^[27]则使用地震拖缆测量甚低频声源辐射声场空频干涉结构,并通过映射域的脊估计了波导不变量的分布.安良等^[28]提出了利用被动声纳信号LOFAR谱图的二维傅里叶变换计算波导不变量的方法,并通过海试数据验证了方法的正确性,指出波导不变量随深度分布的值可以为声源的分类识别提供依据.以上研究针对的均是声强空频谱图的映射域,且较少涉及映射域脊与目标运动状态关系的指示特征.普遍观测或待应用的干涉结构往往是运动目标的时频干涉谱图,并已深入到矢量场,因此,研究运动目标辐射声压场和矢量场时频干涉谱图的映射域物理特征具有理论和实际意义.

本文主要研究匀速运动目标辐射声场时频干涉结构的简化映射,着重分析映射域能量分布对目标运动状态的指示特征,主要包括揭示目标来袭或远离的脊极性指示和脊绝对值的变化指示特征,以及对Yang^[25]指出的脊绝对值大小对目标距速比指示特征的数学证明,并利用海试数据对匀速运动目标辐射声场时频干涉结构的映射域特征进行了验证,论文对声强谱、动能密度谱、声强流谱等声压场和矢量场的干涉结构形式的映射域特征均有涉及.

2 声场空频干涉结构的映射变换

浅海声源辐射声场可表示为波导共振模态之和,距声源 r 处的声强为^[4,11]

$$\begin{aligned} I(r, \omega) &= \sum_n B_n^2 + 2 \sum_n \sum_{m \neq n} B_n B_m \cos\{\Delta k_{nm}(\omega)r\} \\ &= \sum_{n,m} B_n B_m^* \exp\{j\Delta k_{nm}(\omega)r\}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 B_n 为模态幅度, $\Delta k_{nm}(\omega) = k_{rn}(\omega) - k_{rm}(\omega)$ 为第 n 阶与第 m 阶简正波水平波数差.(1)式表明多模相干使声强距离-频率平面上呈明暗条纹结构.干涉条纹斜率可由波导不变量 β 刻画,即^[7]

$$\frac{d\omega}{dr} = \beta \frac{\omega}{r}. \quad (2)$$

波导不变量定义如下^[7]:

$$\beta \equiv - \frac{\frac{\Delta k_{nm}(\omega)}{\omega}}{\frac{\partial \Delta k_{nm}(\omega)}{\partial \omega}}. \quad (3)$$

在远离模态截止频率时,波导不变量值与频率及模态阶数无关或弱相关.

假定在有限空间($r_{\min} < r < r_{\max}$)和频段($\omega_{\min} < \omega < \omega_{\max}$)内对声场时空采样的声强干涉谱图为 $I(\omega, r)$,其二维傅里叶变换(two dimension fourier transform, 2DFT)为

$$\begin{aligned} \tilde{I}(\xi, \tau) &= \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} I(\omega, r) \\ &\quad \times \exp[-j(\omega\tau + r\xi)] d\omega dr, \end{aligned} \quad (4)$$

称 (ξ, τ) 平面为声场空频干涉结构的映射域,将仅含模态相干项的 $I(\omega, r)$,代入(4)式中,

$$\begin{aligned} \tilde{I}(\xi, \tau) &= \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \sum_{m \neq n} B_n B_m^* \\ &\quad \times \exp\{j\Delta k_{nm}(\omega)r\} \\ &\quad \times \exp[-j(\omega\tau + r\xi)] d\omega dr. \end{aligned} \quad (5)$$

将模态相干项在 ω_{mid} 处泰勒级数展开,可得

$$\begin{aligned} \tilde{I}(\xi, \tau) &= \iint \sum_{m \neq n} B_n B_m^* \exp\left[j(\hat{k}_{rn} - \hat{k}_{rm})r_{\text{mid}}\right] \\ &\quad \times \exp\left[j(\hat{k}_{rn} - \hat{k}_{rm})dr\right] \\ &\quad + j\left(\frac{d\hat{k}_{rn}}{d\omega} - \frac{d\hat{k}_{rm}}{d\omega}\right)r_{\text{mid}}d\omega \\ &\quad \times \exp[-j(\omega\tau + r\xi)] d\omega dr, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\hat{k}_{rn,m} = k_{rn,m}(\omega_{\text{mid}})$.

映射域中 ξ, τ 满足下式:

$$\xi = \frac{\omega_{\text{mid}} \frac{\hat{k}_{rn} - \hat{k}_{rm}}{\omega}}{r_{\text{mid}} \left(\frac{d\hat{k}_{rn}}{d\omega} - \frac{d\hat{k}_{rm}}{d\omega} \right)} \tau = -\frac{\omega_{\text{mid}}}{r_{\text{mid}}} \beta \tau \quad (7)$$

时, (6) 式右侧积分呈现极大值, 其物理含义是干涉条纹经二维傅里叶变换映射其能量汇聚于 (ξ, τ) 平面过原点的一条直线, 此为 (ξ, τ) 模糊表面的脊.

对距离、频率离散化,

$$r_l = r_{\text{mid}} + l\Delta r, \quad l = -L/2, \dots, 0, 1, \dots, L/2,$$

$$\omega_h = \omega_{\text{mid}} + h\Delta\omega, \quad h = -H/2, \dots, 0, 1, \dots, H/2,$$

式中 $\Delta r, \Delta\omega$ 为对应的离散化步长, l, h 为整数. (7) 式化为 [25,28]

$$\beta = -\frac{r_{\text{mid}}}{\omega_{\text{mid}}} \frac{\Delta\xi}{\Delta\tau} \kappa, \quad (8)$$

式中 $\Delta\xi = (L\Delta r)^{-1}, \Delta\tau = (H\Delta\omega)^{-1}$. 直线斜率 κ 用 ξ, τ 的角标计算得到. (8) 式表征了干涉谱图二维傅里叶变换域模糊表面的脊与波导不变量的关系, 换言之映射域集中体现了空频干涉谱图的条纹斜率.

前述分析表明二维傅里叶变换可将空频声强干涉条纹简化为映射域的能量脊. 进一步探讨动能密度谱、声强流谱等矢量场空频干涉结构体现形式的简化映射. 动能密度谱水平分量为 [21]

$$\begin{aligned} I_{v_r}(r, \omega) &= \sum_n C_n^2 + 2 \sum_n \sum_{m \neq n} C_n C_m \cos\{\Delta k_{nm}(\omega)r\} \\ &= \sum_{n,m} C_n C_m^* \exp\{j\Delta k_{nm}(\omega)r\}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $C_n = \frac{1}{\rho\omega} k_{rn} B_n$ 为水平振速的模式幅度. 水平声能流对应的有功声强和无功声强分别为 [21]

$$I_{pv_r}^a(r, \omega) = \frac{1}{\rho\omega} \left\{ \sum_n k_n B_n^2 + \sum_n \sum_{m \neq n} k_m B_n B_m \times \cos[\Delta k_{nm}(\omega)r] \right\}, \quad (10)$$

$$I_{pv_r}^r(r, \omega) = \frac{1}{\rho\omega} \left\{ \sum_n \sum_{m \neq n} k_m B_n B_m \times \sin[\Delta k_{nm}(\omega)r] \right\}, \quad (11)$$

动能密度谱、声强流谱可统一记为

$$I_{\varepsilon,i}(r, \omega) = \sum_{n,m} F_{\psi,i} \exp[j(k_{rn} - k_{rm})r], \quad (12)$$

其中 $i = v_r, pv_r, \text{Re}(I_{pv_r}), \text{Im}(I_{pv_r})$, 其各系数不一列出. 将 (12) 式的模态相干项在 ω_{mid} 处泰勒级数展开, 并进行 2DFT, 可得

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{\varepsilon,i}(\xi, \tau) &= \iint \sum_{m \neq n} F_{\psi,i} \exp\left[j(\hat{k}_{rn} - \hat{k}_{rm})r_{\text{mid}} \right] \\ &\quad \times \exp\left[j(\hat{k}_{rn} - \hat{k}_{rm})r \right] \\ &\quad + j \left(\frac{d\hat{k}_{rn}}{d\omega} - \frac{d\hat{k}_{rm}}{d\omega} \right) r_{\text{mid}} d\omega \left[\right] \\ &\quad \times \exp[-j(\omega\tau + r\xi)] d\omega dr, \end{aligned} \quad (13)$$

式中 $\hat{k}_{rn,m} = k_{rn,m}(\omega)$. 显然, 除去模糊表面脊等级的差异, 同样有 (8) 式成立. 声强谱、动能密度谱、声强流谱等在条纹强度、尺度和位置上的差异在映射域仅仅体现在脊强度的差别, 它们映射域脊斜率通过波导不变量统一起来. 因而矢量场干涉结构的各种体现形式经映射后更为一致.

3 运动目标辐射声场时频干涉结构映射域特征

上一节讨论的基本假设是声源位置不变, 对声场进行空间等间隔采样或者是目标距离均匀变化且已知情况下, 即空频谱图 (ω - r 域) 的 2DFT, 而在目标距离未知的情况下, 时频干涉谱图 (ω - t 域) 的映射域及其与波导不变量的关系如何? 考虑处于匀速直线巡航状态的远程目标, 其运动态势如图 1 所示.

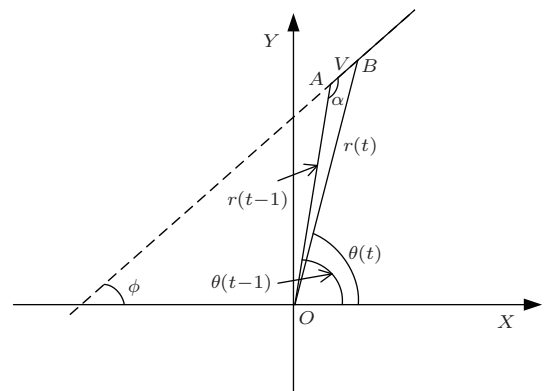


图 1 目标运动态势

由图 1 所示几何关系, $\triangle AOB$ 三边满足余弦定理:

$$r^2(t) = r^2(t-1) + V^2$$

$$-2Vr(t-1)\cos(\alpha), \quad (14a)$$

式中 $r(t)$, $\theta(t)$, ϕ 分别为目标距离、方位角和航向角, $\alpha = \pi - \{\theta(t-1) - \phi\}$. 由 (14a) 式推导可得到 t 时刻其距离变化为

$$\begin{aligned} \Delta r(t) &= r(t) - r(t-1) \\ &= \frac{1}{r(t) + r(t-1)} [-2Vr(t-1) \\ &\quad \times \cos[\pi - \{\theta(t-1) - \phi\}] + V^2] \\ &\approx V \cos[\theta(t-1) - \phi], \end{aligned} \quad (14b)$$

式中 $r(t)$, $\theta(t)$, ϕ 分别为目标距离、方位角和航向角. 在较短的观测时间窗内, 则有

$$\Delta r(t) \approx \Delta r(t+1) \approx V \cos[\theta(t) - \phi]. \quad (15)$$

此式表明, 匀速直线运动的远程目标在较短的观测时间之内其距离可视作均匀变化的. 这样就可以直接对时频谱图进行 2DFT. 将 (15) 式代入 (8) 式, 得时频谱图 2DFT 的脊与 β 的关系式

$$\beta = -\frac{r_{\text{mid}}}{\omega_{\text{mid}}} \frac{H\Delta\omega}{VT \cos(\theta_{\text{mid}} - \phi)} \kappa \approx \mu r_{\text{mid}} \kappa, \quad (16)$$

式中 $\mu \equiv -H\Delta\omega/[\omega_{\text{mid}}VT \cos(\theta_{\text{mid}} - \phi)]$. T 为观测时间, θ_{mid} 是观测时间中点对应的目标方位角.

由 (16) 式可得

$$\begin{aligned} r_{\text{mid}} &= -\left(\frac{\beta}{\omega_{\text{mid}}} \frac{H\Delta\omega}{VT \cos(\theta_{\text{mid}} - \phi)} \kappa\right)^{-1} \\ &= \beta(\mu\kappa)^{-1}. \end{aligned} \quad (17)$$

在目标航速、航向角以及波导不变量已知时, 用 (17) 式可估计目标距离. 目标航速、航向角的实际获取往往较为困难, 但还是蕴含着较为有用的相对距离信息.

假定时间间隔不是很长的两次观测目标, 有

$$r_{\text{mid},i} = \beta(\mu_i\kappa)^{-1}, \quad i = 1, 2. \quad (18)$$

在同一频段和目标方位角变化缓慢的情况下,

$$\begin{aligned} \mu_1 &= -H\Delta\omega/[\omega_{\text{mid}1}VT \cos(\theta_{\text{mid}1} - \phi)] \\ &\approx -H\Delta\omega/[\omega_{\text{mid}2}VT \cos(\theta_{\text{mid}2} - \phi)] \\ &= \mu_2. \end{aligned} \quad (19)$$

故

$$r_{\text{mid}1}/r_{\text{mid}2} = \kappa_2/\kappa_1. \quad (20)$$

此式表明, 相同时窗、频窗内观测目标, 时频谱图二维傅里叶变换域脊斜率的变化反映着目标远近的

变化, 脊斜率增大目标靠近, 反之亦然. 脊斜率的变化指示了目标是处于来袭或者远离状态.

由 (8) 式可以得到变换域模糊表面脊的正负号为

$$\begin{aligned} \text{sgn}(\kappa) &= -\text{sgn}\left(\frac{r_{\text{mid}}}{\omega_{\text{mid}}} \frac{H\Delta\omega}{L\Delta r}\right) \text{sgn}(\beta) \\ &= -\text{sgn}(\Delta r) \text{sgn}(\beta), \end{aligned} \quad (21)$$

式中 $\text{sgn}(\cdot)$ 为取符号运算. β 符号是容易获知的, 脊的符号决定于距离变化的正负, 故脊的符号也指示了目标是来袭或者远离.

Yang^[25] 通过分析数值仿真结果, 曾指出近距离快速目标与远程缓变干扰的辐射声场干涉谱图映射域脊斜率存在差异, 换言之, 映射域脊斜率指示了目标的距速比, 下面对这一特征予以数学证明.

由 (16) 式可得

$$\begin{aligned} \kappa &= -\beta \left(\frac{r_{\text{mid}}}{VT \cos(\theta_{\text{mid}} - \phi)} \frac{H\Delta\omega}{\omega_{\text{mid}}} \right)^{-1} \\ &\approx -\beta \left(\zeta \frac{H\Delta\omega}{\omega_{\text{mid}}} \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (22)$$

式中 $\zeta = \frac{r_{\text{mid}}}{VT \cos(\theta_{\text{mid}} - \phi)}$, 因此, 映射域脊斜率决定于波导不变量和目标运动状态参数.

当目标径向运动时,

$$\frac{r}{V} = -\beta T \left(\frac{H\Delta\omega}{\omega_{\text{mid}}} \kappa \right)^{-1} \propto \kappa^{-1}, \quad (23)$$

式中 r/V 为距变率, 距变率反比于脊的斜率. 距变率小的目标为近程快速的目标.

而目标非径向运动时,

$$\begin{aligned} \frac{r}{V} &= -\beta T \left(\frac{H\Delta\omega}{\omega_{\text{mid}}} \kappa \right)^{-1} \cos(\theta - \phi) \\ &\propto \cos(\theta - \phi) \kappa^{-1}, \end{aligned} \quad (24)$$

即距变率反比于脊的斜率在航向角方向的投影. (23) 式为 (24) 式的特例.

综上所述, 距变率反比于脊的斜率在航向角方向的投影, 即映射域脊斜率指示了目标的距速比.

以上便是干涉结构映射域脊的目标状态指示的几项特征, 综合上述特征便可判断目标的威胁程度. 以上推导对动能密度谱、声强流谱等矢量场时频干涉结构的映射域也适用, 矢量场时频干涉结构映射域亦存在目标状态指示特征.

4 仿真研究

实验基本条件如下: 海深约 100 m, 水文为南中国海三月典型的浅海负梯度声速分布 [28], 海水密度 1024 kg/m^3 , 均匀海底, 海底声速 1690 m/s , 海底密度为 1890 kg/m^3 , 吸收系数 $2 \text{ dB}/\lambda$. 目标处于匀速直线巡航状态, 深度为 4 m, 航速为 20 kn, 单基元接收器深度为 53 m, 图 2 为目标运动态势图.

对接收信号进行非相干处理得到运动目标辐射声场时频干涉结构示于图 3. 图 3(a) 为声强谱, 图 3(b) 为动能密度谱水平分量, 图 3(c), (d) 分别为水平有功和无功声强流. 可以看到, 运动目标辐射矢量场时频谱图呈明显的干涉特征, 声强谱、动能密度谱水平分量在条纹尺寸、位置等分布上较为一致, 无功声强流条纹更加密集, 因为无功声强流仅含有模态相干项; 声场这四种能谱条纹斜率总体一致.

实验 1 运动目标辐射声场干涉结构映射域的一致性.

对运动目标辐射声场时频干涉结构进行二维傅里叶映射变换得到其映射域, 结果示于图 4, 图 4(a)—(d) 分别对应声强谱、动能密度谱水平分

量、水平有功和无功声强流的映射域, 图 4(e) 为前四幅子图提取得到的脊. 处理的频率范围为 $150\text{--}250 \text{ Hz}$, 时间范围为 $1\text{--}100 \text{ s}$, 此时目标处于来袭状态. 从图 4 可见, 时频干涉谱图各个映射域均呈现过中心点的能量脊, 二维傅里叶变换将干涉结构简化, 各个子图提取得到的脊几乎重合, 表明它们有相同的波导不变量. 此种波导条件下, 理论计算的波导不变量约为 1, 映射域的脊斜率为正, 指示了目标处于来袭状态.

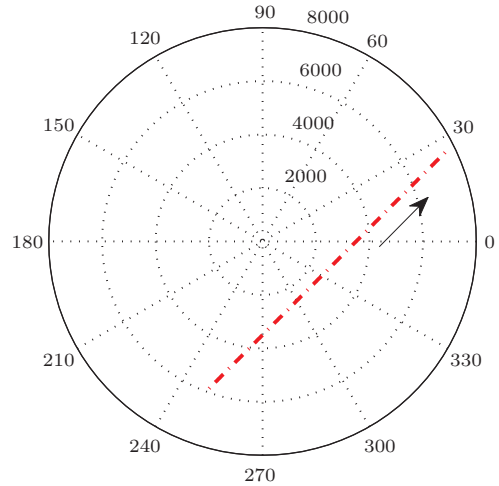


图 2 目标运动态势图

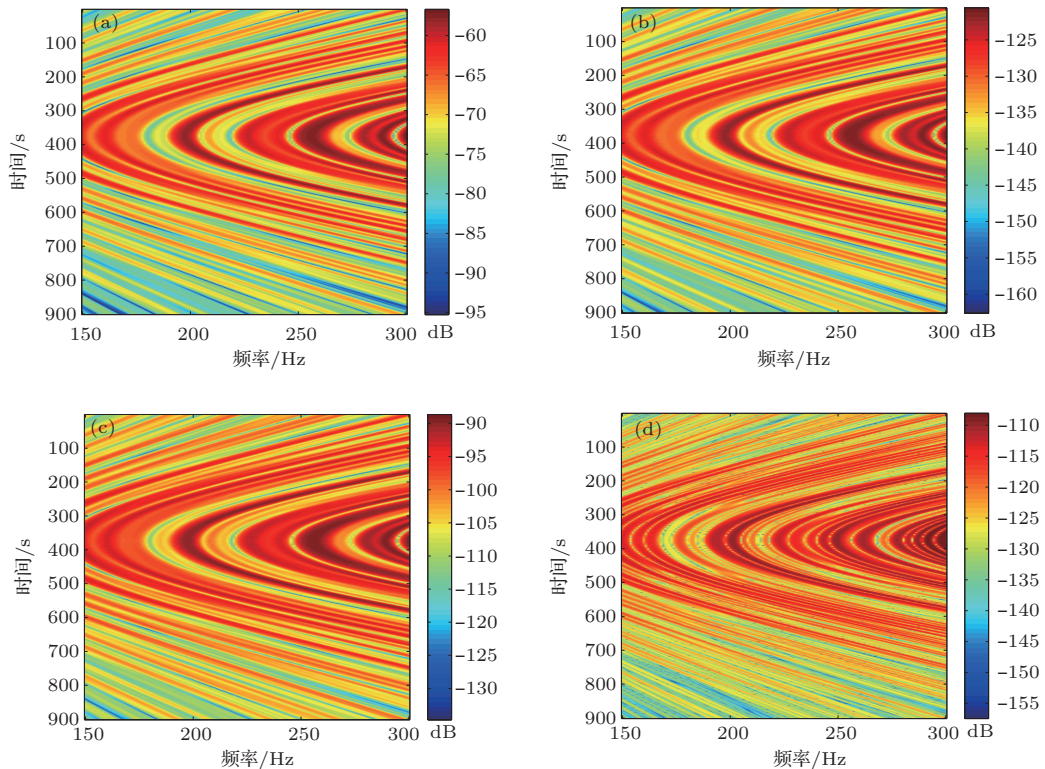


图 3 运动目标辐射矢量场时频干涉结构 (a) 声强谱; (b) 动能密度谱水平分量; (c) 水平有功声强流; (d) 水平无功声强流

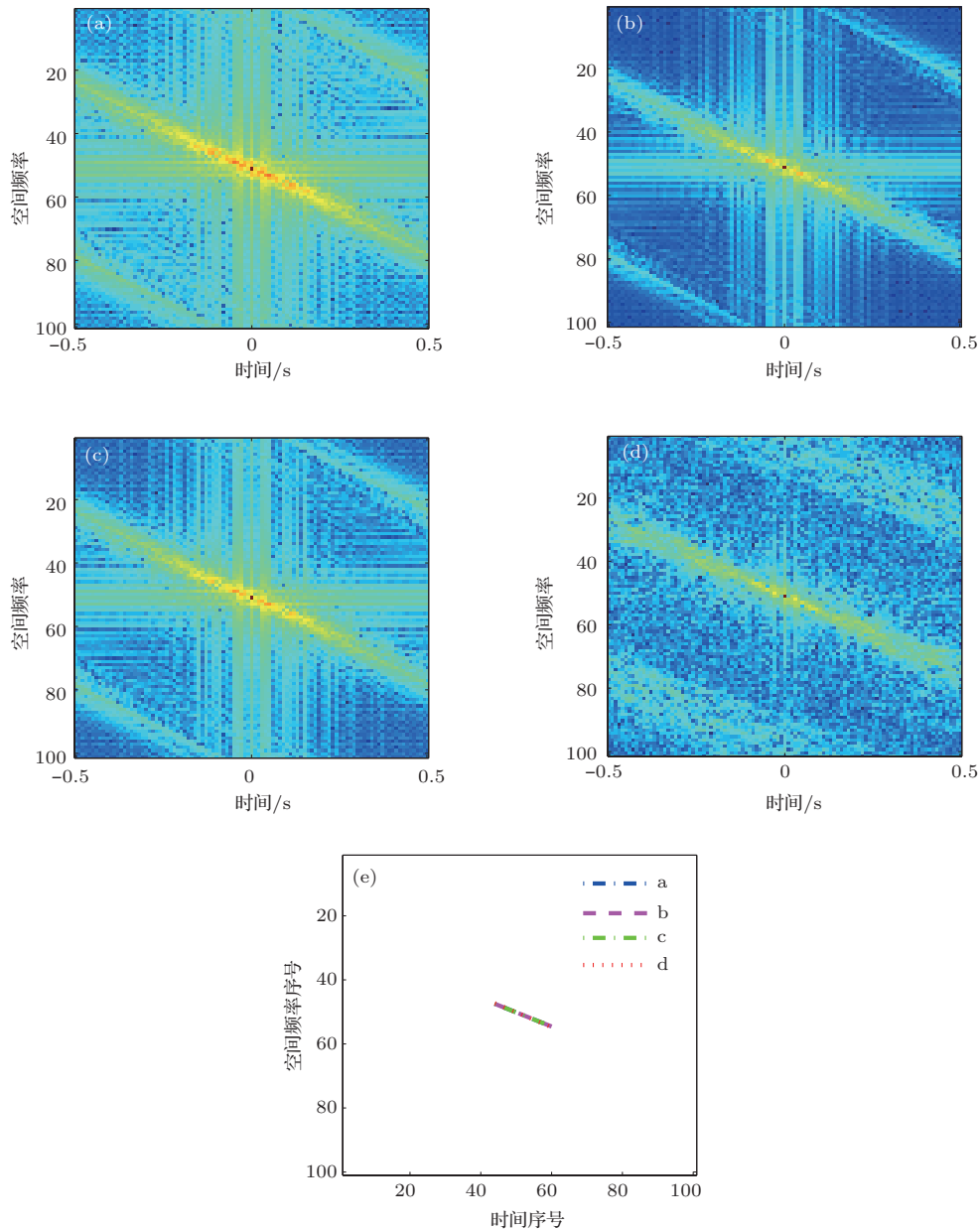


图4 运动目标辐射矢量场时频干涉结构映射域 (a) 声强谱映射域; (b) 动能密度水平分量映射域; (c) 水平有功声强流映射域; (d) 水平无功声强流映射域; (e) 映射域脊

实验2 映射域目标运动状态的极性指示特征.

对水平有功声强流进行两组映射变换, 处理时间段分别 51—151 s 和 600—700 s, 频率范围均为 150—250 Hz, 获得的映射域为图 5. 图 5(a) 和 (b) 分别对应目标来袭 (51—151 s) 和目标远离 (600—700 s) 的映射域. 从图可知, 目标由来袭变为远离时, 脊斜率的极性改变. 声强谱、动能密度谱也有相同的指示特征, 其映射域的仿真结果这里不一一给出.

实验3 映射域脊斜率绝对值的目标运动状态指示特征.

将不同时段 (距离处) 的水平有功声强流谱由二维傅里叶变换至映射域, 处理的频率范围为 150—250 Hz, 结果见图 6. 图 6(a), (b) 分别对应时间段 300—400 s, 800—900 s, 图 6(c) 是 (a), (b) 提取得到的脊. 结果表明, 随目标的远离, 脊的斜率绝对值变小. 声强谱、动能密度谱也有相同的指示特征, 其映射域的仿真结果这里不一一给出.

综上所述, 仿真结果表明, 二维傅里叶变换可将时 (空) 频谱图干涉结构映射简化, 映射域能谱呈现过中心点的脊, 声场干涉结构的多种体现形式经映射后更为一致. 声压和矢量场时频干涉谱图映射域的脊具有目标运动状态指示特征.

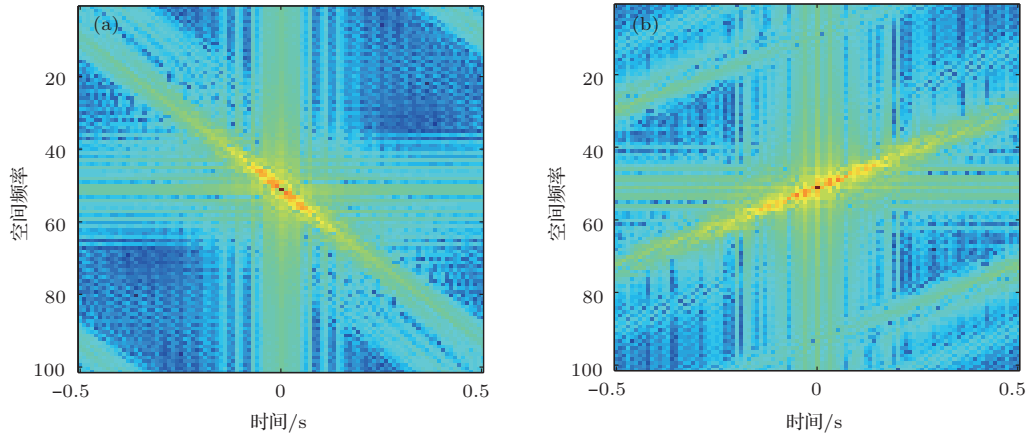


图5 水平有功声强流谱映射域 (a) 目标来袭; (b) 目标远离

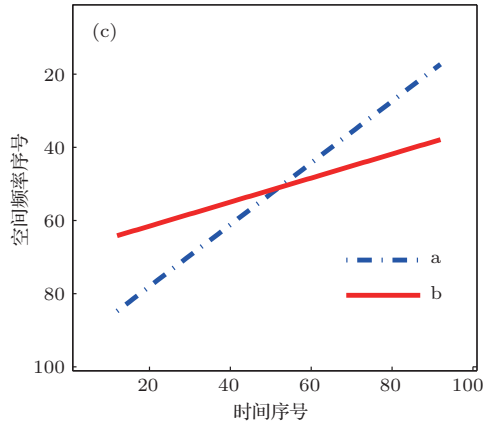
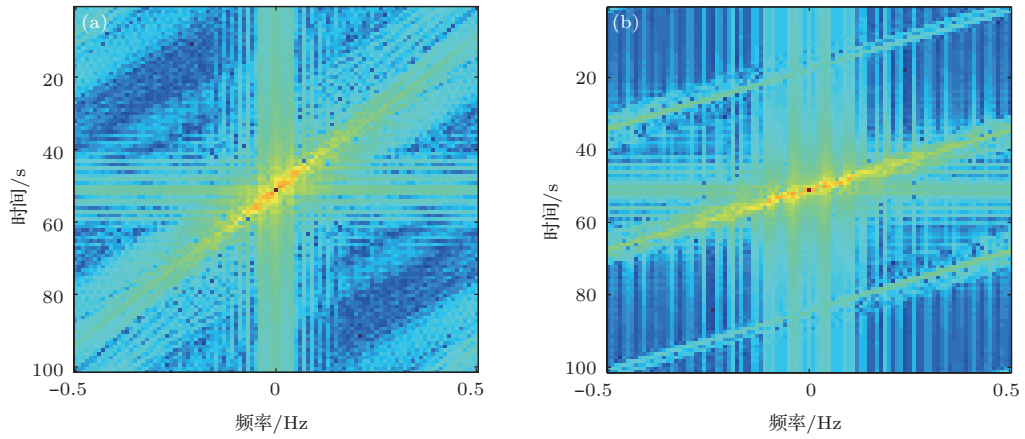


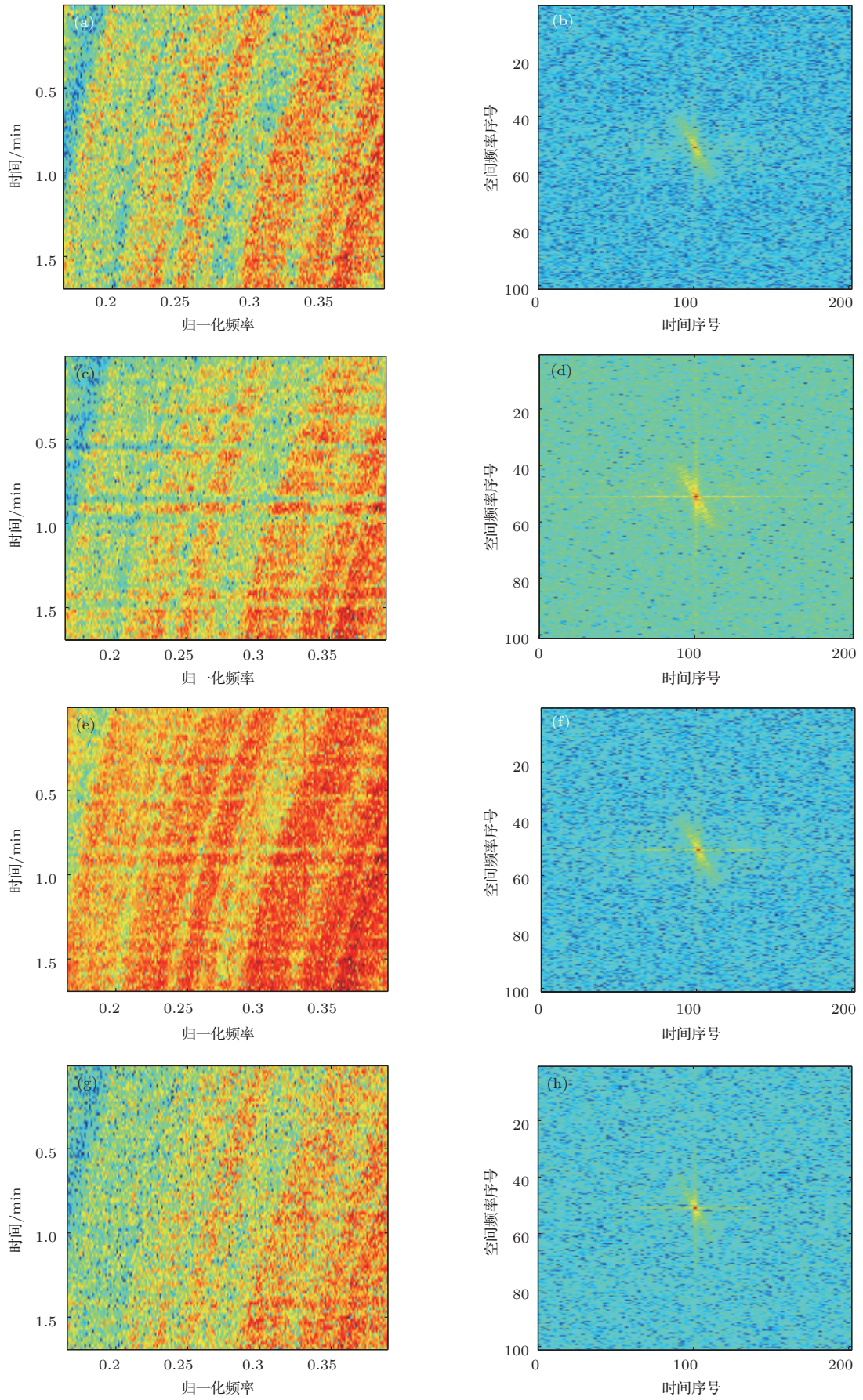
图6 水平有功声强流谱映射域 (a) 目标较近; (b) 目标较远; (c) 为 (a), (b) 提取得到的脊

5 试验研究

2011年在中国南海某海域系统的开展了低频宽带声源辐射低频矢量声场干涉特性相关试验. 试验时利用二维矢量水听器观测到了匀速直航行船辐射宽带噪声场时频干涉结构. 关于试验条件和矢

量声场干涉结构更多的结果参见文献 [21], 这里对试验数据进行处理分析二维傅里叶变换对声场时频干涉结构的简化映射, 以及验证映射域的目标指示特征.

先对海试测量的干涉谱图做二维傅里叶变换得到映射域, 结果示于图7, 图7(a), (c), (e), (g) 分别对应声强谱、动能密度谱 x 轴分量, 水平有功和



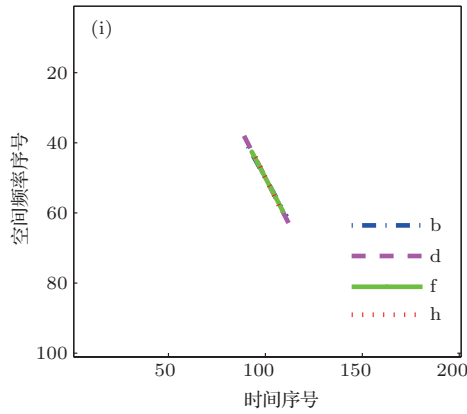


图7 运动目标来袭时辐射声场时频干涉结构及其映射域 (a) 声强谱; (b) 声强谱映射域; (c) 动能密度谱 x 轴分量; (d) 动能密度谱 x 轴分量映射域; (e) 水平有功声强流 x 轴分量; (f) 水平有功声强流 x 轴分量的映射域; (g) 水平无功声强流 x 轴分量; (h) 水平无功声强流 x 轴分量的映射域; (i) 映射域的脊

无功声强流 x 轴分量, 图 7 (b), (d), (f), (h) 分别为对应的映射域. 图 7 反映了三方面内容, 其一时频谱图映射域的能谱呈现过中心点的脊, 体现的是干涉条纹的斜率, 直接与波导不变量关联; 其二矢量场干涉结构的多种体现形式(声能量谱)经映射后

较时频干涉结构更为一致; 其三脊的斜率极性为正, 与目标来袭的状态一致.

为进一步验证映射域目标运动状态的极性指示特征, 将目标远离时辐射矢量场时频干涉谱图变换至映射域, 图 8 给出了相关结果.

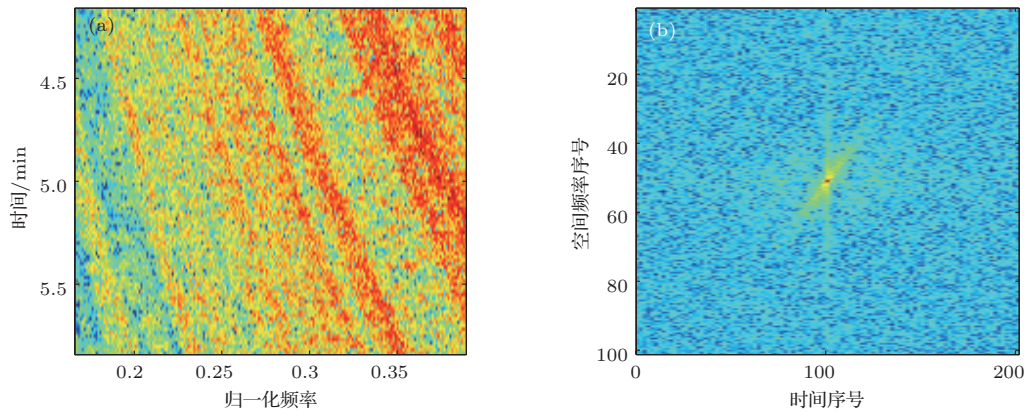


图8 目标远离时辐射矢量场时频干涉结构及其映射域 (a) 水平有功声强流 x 轴分量; (b) 水平有功声强流 x 轴分量的映射域

图 8 (a) 为水平有功声强流 x 轴分量, 图 8 (b) 为水平有功声强流 x 轴分量的映射域. 对比图 7 (e) 和 (f), 可见, 目标由来袭变为远离时, 脊斜率的极性改变.

指示特征.

至此, 海上试验已验证了时频干涉谱图的二维傅里叶变换简化映射了声场的干涉结构, 映射域脊有目标指示特征等.

将不同时段(距离处)的水平有功声强流谱由二维傅里叶变换至映射域, 结果见图 9. 图 9 (a), (b) 分别对应时间段分别 220—320 s 和 300—400 s 的时频干涉谱图, 图 9 (c), (d) 为相应的映射域, (e) 是前二幅子图提取得到的脊. 声强谱、动能密度谱映射域也有相似的结果, 这里不一一给出. 根据试验记录 200—400 s 水面越行愈远. 脊的斜率绝对值变小, 印证了映射域脊斜率绝对值的目标运动状态

6 结 论

本文研究了声压和矢量场时(空)频干涉结构的二维傅里叶变换映射, 着重分析映射域脊对目标运动状态的指示特征. 理论、仿真和试验研究表明, 二维傅里叶变换可将声压和矢量场时(空)频谱图干涉结构简化, 映射域的能谱呈现过中心点的脊,

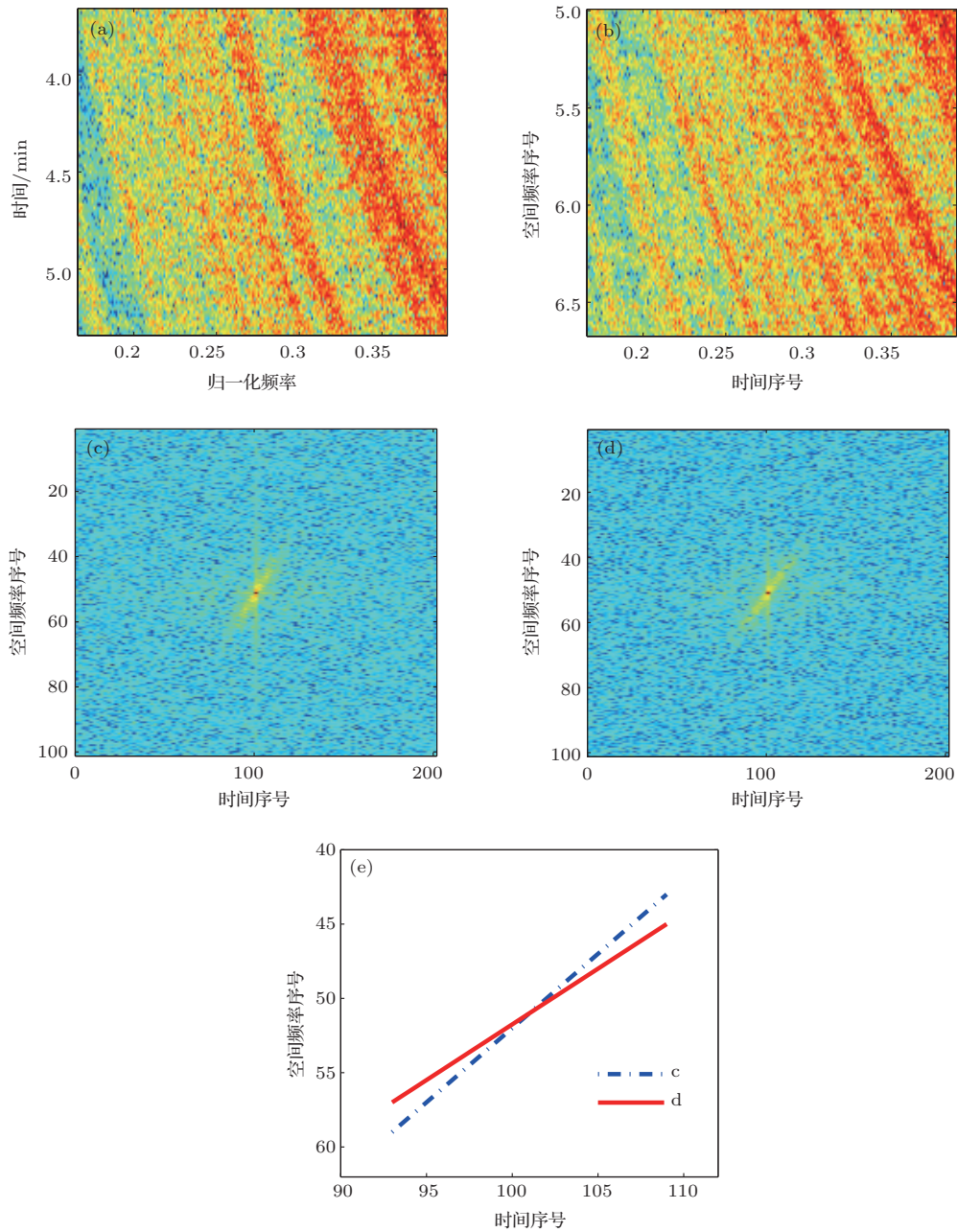


图9 运动目标辐射矢量场时频干涉结构及其映射域 (a) 时段220—320 s水平有功声强流 x 轴分量; (b) 时段220—320 s水平有功声强流 x 轴分量; (c) 时段300—400 s干涉结构映射域; (d) 时段300—400 s干涉结构映射域; (e) 映射域的脊

匀速运动目标辐射声场干涉结构映射域的能谱脊斜率、距变率、航向角与波导不变量有解析关系式, 声强谱、动能密度谱、声强流谱等声压和矢量场的干涉结构形式经映射后更为一致. 脊斜率符号可判断目标来袭或远离; 脊斜率绝对值的变化反映着目标远近的变化, 绝对值增大目标靠近, 反之亦然; 距变率反比于脊的斜率在航向角方向的投影, 综合目标来袭和远离状态可以判断目标威胁程度. 声压和矢量场干涉结构映射域的脊均具有目标运动状态指示特征.

参考文献

- [1] Kuperman W A, Song H C 2012 *AIP Conference Proceedings of Advances in Ocean Acoustics* Beijing, China, May 1-3, 2012 p69
- [2] Zhang R H, Li Z L, Peng Z H, Li F H 2012 *AIP Conference Proceedings of Advances in Ocean Acoustics* Beijing, China, May 1-3, 2012 p16
- [3] Li Q H 2012 *AIP Conference Proceedings of Advances in Ocean Acoustics* Beijing, China, May 1-3, 2012 p83
- [4] Brekhovskikh L M, Lysanov Y P 2002 *Fundamentals of Ocean Acoustics* (New York: Springer-Verlag)
- [5] Gershman S G, Tuzhilkin Yu I 1965 *Sov. Phys. Acoust.* 1 34

- [6] Weston D E 1972 *J. Sound. Vib.* **21** 57
- [7] Chuprov S D 1982 *Interference structure of a Sound Field in a Layered Ocean*, in Brekhovskih L M , Andreevoi L B (ed) *Ocean Acoustics. Current State* p71–91
- [8] Burenkov S V 1989 *Soviet Physical Acoustics* **35** 465
- [9] Grachev C A 1993 *Soviet Physical Acoustics* **39** 33
- [10] Kuz'kin C A 1999 *Soviet Physical Acoustics* **45** 224
- [11] D'Spain G L, Kuperman W A 1999 *J. Acoust. Soc. Am.* **106** 2454
- [12] D'Spain G L, Williams D P, Kuperman W A, 2002 *AIP Conference Proceedings of Ocean acoustic interference phenomena and signal processing* San Francisco, California, May 1–3, 2002 p171
- [13] Li Q H, Wang L, Wei C H, Li Y, Ma X J, Yu H C 2011 *Acta Acustica* **36** 253 (in Chinese) [李启虎, 王磊, 卫翀华, 李巍, 马雪洁, 于海春 2011 声学学报 **36** 253]
- [14] Dall'Osto D R, Dahl P H, Chol J W 2012 *J. Acoust. Soc. Am.* **127** 2023
- [15] Yu Y, Hui J Y, Zhao A B, Sun G C, Teng C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5742 (in Chinese)[余赟, 惠俊英, 赵安邦, 孙国仓, 滕超 2008 物理学报 **57** 5742]
- [16] Yu Y, Hui J Y, Chen Y, Sun G C, Teng C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6335 (in Chinese)[余赟, 惠俊英, 陈阳, 孙国仓, 滕超 2009 物理学报 **58** 6335]
- [17] Yu Y, Hui J Y, Chen Y, Sun G C, Teng C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 054303 (in Chinese)[余赟, 惠俊英, 陈阳, 惠娟, 殷敬伟 2012 物理学报 **61** 054303]
- [18] Rakotonariv S T, Kuperman W A 2012 *J. Acoust. Soc. Am.* **132** 2218
- [19] Ren Q Y, Hermand J P 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** 82
- [20] Lin W S 2013 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Engineering University) (in Chinese) [林旺生 2013 博士学位论文(哈尔滨: 哈尔滨工程大学)]
- [21] Lin W S, Liang G L, Fu J, Zhang G P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 4301 (in Chinese) [林旺生, 梁国龙, 付进, 张光普 2013 物理学报 **62** 4301]
- [22] Tao H L, Krolik J 2007 *Proceedings of IEEE Oceans* Aberdeen, Scotland, June 18–21, 2007 p1
- [23] Turgut A, Orr M 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **127** 73
- [24] Yu Y, Hui J Y, Ying J W, Hui J, Wang Z J 2011 *Acta Acustica* **36** 258 (in Chinese) [余赟, 惠俊英, 殷敬伟, 惠娟, 王自娟 2011 声学学报 **36** 258]
- [25] Yang T C 2003 *J. Acoust. Soc. Am.* **113** 1342
- [26] Rouseff D, Spindel R C 2002 *AIP Conference Proceedings of Ocean acoustic interference phenomena and signal processing* San Francisco, California, May 1–3, 2002 p137
- [27] Baggeroer A B 2002 *AIP Conference Proceedings of Ocean acoustic interference phenomena and signal processing* San Francisco, California, May 1–3, 2002 p151
- [28] An L, Wang Z Q, Lu J R 2008 *Journal of Electronics & Information Technology* **30** 2930 (in Chinese)[安良, 王志强, 陆佳人 2008 电子与信息学报 **30** 2930]

Characteristics of mapping domain of the acoustic field interference structures radiated by a moving target*

Lin Wang-Sheng¹⁾²⁾ Liang Guo-Long^{1)†} Wang Yan¹⁾ Fu Jin¹⁾ Zhang Guang-Pu¹⁾

1) (Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

2) (Science and Technology on Sonar Laboratory, Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hanzhou 310012, China)

(Received 26 August 2013; revised manuscript received 4 November 2013)

Abstract

In shallow water exist the stable and significant interference characteristics of low frequency sound propagation, which contain the information of the sound source state and waveguide peculiarity. A simplified mapping method for describing the scalar and vector sound field interference structure radiated by a moving target, and an indicatory mechanism of the target state implicated in the energy distribution of the mapping domain are investigated in this paper. The mapping characteristics of two-dimensional Fourier transform of the vector sound field time (space) frequency interference spectrum are analyzed theoretically. Relations among waveguide invariant, range-rate, heading angle, and energy ridge slope of the mapping domain for time-frequency interference spectrum produced by a uniformly moving target are derived. Indication of target attacking or moving away, and the degree of threatening through symbols or the absolute value change of mapping domain's ridge slope are demonstrated. Then numerical simulation and sea trial research are carried out. Experimental results with theoretical analysis and simulation results are in good agreement with each other. Research results show that the scalar and vector field time (space) frequency interference structure can be simplified by the two-dimensional Fourier transform. The mapping domain ridges, range-rate, heading angle and waveguide invariant show an analytic relationship among them. Variation embodied in the form of scalar and vector field interference structure obtained after mapping are more consistent with each other. The ridge of mapping domain can indicate the moving state of target concisely.

Keywords: indicatory characteristics for target move state, two-dimensional Fourier transform, waveguide invariant, acoustic interference structure

PACS: 43.20.Mv, 43.30.+m, 43.30.Bp

DOI: 10.7498/aps.63.034306

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51279043, 61201411, 51209059, 51009042), the Foundation of Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory (Grant Nos. 9140C200203110C2003, 9140C200802110 C2001), the Youth Scholar Backbone Supporting Plan for Colleges and Universities of Heilongjiang, China (Grant No. 1253G019).

† Corresponding author. E-mail: lianguolong@hrbeu.edu.cn