

基于时空滤波理论的低频声场干涉结构研究*

余赞^{1)2)†} 惠俊英²⁾ 陈阳²⁾ 惠娟²⁾ 殷敬伟²⁾

1) (海军装备研究院, 北京 100161)

2) (哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2010年10月26日收到; 2011年5月19日收到修改稿)

基于时空滤波理论, 采用相干函数、功率响应函数、扩展分布函数、双频函数四个系统函数较波导不变量更全面地描述了低频声场的相干结构. 理论分析、仿真研究和海试数据处理都验证了低频声场存在稳定的干涉结构, 当目标由远及近、又由近及远做匀速直线运动时, 相干函数 (LOFAR 图) 的干涉结构为一簇类双曲线; 功率响应函数的干涉图表征了简正波群时延的差分, 体现了其频散特性; 扩展分布函数能反映 LOFAR 图上干涉条纹的斜率大小; 而双频函数能体现相慢度的差分. 各个系统函数均能特别突出干涉结构的某方面的特征, 各有特色.

关键词: 干涉结构, 时空滤波理论, 波导不变量, 低频声场

PACS: 43.30.+m

1 引言

海洋波导的重要特点是低频声场存在稳定的干涉结构, 可分为线谱干涉结构和连续谱干涉结构. 前者的干涉结构特点和应用已在文献 [1—3] 中讨论, 本文关注后者. 俄国学者提出了波导不变量来描述之 [4], 用一个标量参数反映了在 LOFAR 图上距离、频率及其斜率的关系, 描述了声场的频散特性和相长相消的干涉结构 [4—10].

目前, 用波导不变量 β 描述连续谱声场相干结构特性是国际上流行的方法. 采用的处理器为 LOFAR 图, 或称之为相干函数, 该方法用 $P(t, f)$ (P 表示功率或能量) 描述声场的干涉结构, 利用波导不变量 β 描述 $P(t, f)$ 图中干涉条纹的斜率并得到干涉条纹轨迹方程, 据此进行声纳信号处理, 提取目标运动参数或环境信息 [9—11].

更一般地说, 可用时变滤波器或时变、空变滤波器更全面地描述声场的干涉结构. 因此, 本文除关注相干函数的特性外, 还研究了基于功率响应函数、双频函数、扩展分布函数等时空滤波器的干

涉结构. 四个系统函数中仅有一个是独立的, 每个系统函数均能描述声场干涉结构的特性, 但各个系统函数均能特别突出干涉结构的某方面的特征, 各有特色.

2 波导不变量

根据简正波理论, 信号的声强可以表示为

$$I(r, z, z_s, \omega) = P(\omega) \cdot \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} A_m^2 + 2 \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n \neq m}^{N-1} \times A_m A_n e^{j(\xi_m - \xi_n)r} \right\}, \quad (1)$$

其中, $P(\omega)$ 为声源的功率谱, 被认为在处理频段内是连续和平坦的; $A_m = \sqrt{2\pi/(\xi_m r)} \varphi_m(z_s) \varphi_m(z)$, 表示第 m 阶简正波声压的幅度值; ξ_m 为第 m 阶模态的本征值, 也即模态的水平波数, $\varphi_m(z)$ 为第 m 阶模态的本征函数. 从 (1) 式可以看出, 声强由两部分组成, 第一项可以看作声强的直流分量, 是距离 r 和频率 ω 的缓变函数; 第二项为声强的振荡分量, 体现了不同阶简正波间的相互干涉, 是形成距离 -

* 水声技术国防科技重点实验室基金 (批准号: 9140C200201090C2004, 9140C2002100802)、声纳技术国家级重点实验室开放基金 (批准号: kf201001) 和国家自然科学基金 (批准号: 51009041) 资助的课题.

† E-mail: yuyuntc@163.com

频率平面上明暗相间干涉条纹的原因. 为简便, 后面均只考虑第二项, 记为

$$I = \sum_{m,n} A_{mn} \exp(j\Delta\xi_{mn}r). \quad (2)$$

在 r - f 平面上, 若 $\Delta r \ll r_0$, $\Delta\omega \ll \omega_0$, r_0 和 ω_0 为中心距离和中心频率, 则可以认为干涉亮条纹上的声强不变 (即 $I(\omega, r, z)$ 的局部极值), 则其全微分为 0, 可以表示为

$$dI = \frac{\partial I}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial I}{\partial r} dr = 0. \quad (3)$$

由 (2) 式可以得到:

$$\frac{\partial I}{\partial r} \approx \sum_{m,n} A_{mn} \exp(j\Delta\xi_{mn}r) j\Delta\xi_{mn}, \quad (4a)$$

$$\frac{\partial I}{\partial \omega} \approx \sum_{m,n} A_{mn} \exp(j\Delta\xi_{mn}r) jr \frac{\partial \Delta\xi_{mn}}{\partial \omega}. \quad (4b)$$

将上面两式代入 (3) 式, 可得波导不变量的定义式 [4-8]:

$$\beta = \frac{d\omega}{dr} \frac{r}{\omega} = -\frac{\Delta S_{p_{mn}}}{\Delta S_{g_{mn}}}, \quad (5)$$

其中, $\Delta S_{p_{mn}}$ 为第 m 阶与第 n 阶简正波相慢度 (phase slowness, 相速度的倒数) 的差分, $\Delta S_{g_{mn}}$ 为第 m 阶与第 n 阶简正波群慢度 (group slowness, 群速度的倒数) 的差分. 从 (5) 式可以获得两种估计波导不变量 β 的方法, 上式的第一个等号表明通过对 r - f 平面进行图像处理提取干涉条纹的斜率可以在线估计 β 值, 而第二个等号表明也可以根据海洋环境先验知识通过建模获得简正波的群速度和相速度, 从而对 β 值进行理论预报.

对于通常的海洋波导, 波导不变量实际上是弱变化的, 干涉条纹的斜率与模态阶数、声波频率、声源和接收器深度、方位角等有弱联系. 大多数情况下, $-3 \leq \beta \leq 1$ 有一分布 [12]. 而对于某些特殊情况 (比如: 等声速剖面、折射率平方线性变化声速剖面), 干涉条纹的斜率与上述因素无关, 是不变的. 根据波导不变量理论框架, 可以将海洋波导大致分为两类: 深海与北冰洋属于一类, 在其中传播的声波的低阶模态最后到达, 即低阶模态的群速度最低, $\beta \approx -3$; 而浅海属于另一类, 其低阶模态最先到达, $\beta \approx 1$.

对于 r - ω 平面上的干涉结构, 若固定频率 ω_0 , 则声强的振荡周期取决于模态相慢度的差分, 即相邻两干涉亮条纹的距离 Δr (水平相干距离) 可表示

为 [13]

$$\begin{aligned} \Delta r &= \frac{2\pi}{k_m - k_n} = 2\pi \left[\omega_0 \left(\frac{1}{v_m} - \frac{1}{v_n} \right) \right]^{-1} \\ &= 2\pi [\omega_0 S_{p_{mn}}]^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

上式也可以由两模态相长干涉的条件推得, 即:

$$k_m r = k_n r + l2\pi \quad l = 1, 2, \dots \quad (7)$$

同样, 若固定距离 r_0 , 干涉最大值出现在两模态同相叠加时, 如 (8) 式所示:

$$T_m \omega = T_n \omega + l2\pi \quad l = 1, 2, \dots \quad (8)$$

此时, 相邻亮条纹间的频率差 $\Delta\omega$ 取决于模态群慢度的差分:

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= \frac{2\pi}{T_m - T_n} \\ &= 2\pi \left[r_0 \left(\frac{1}{u_m} - \frac{1}{u_n} \right) \right]^{-1} \\ &= 2\pi [r_0 S_{g_{mn}}]^{-1}. \end{aligned} \quad (9)$$

(9) 式与 (6) 式的比能直接得到 (5) 式, 这两式直观地表明连续谱干涉结构的获得是模态波数差分的直接测量, 能为海底的地声反演和海洋声层析提供有用的信息.

3 时空滤波器

海洋信道可以看作一时变、空变滤波器 [14]. 相干声场的干涉结构可以用空变滤波器来描述, 即干涉结构 $P(r, f)$ 可以看作一空变滤波器的系统函数 (P 表示功率或能量). 被动声纳实际获得的一般为运动声源的干涉结构 $P(t, f)$ (亦即 LOFAR 图), 它可看作时空滤波器的系统函数.

3.1 时空滤波器的系统函数

首先讨论时空滤波器的概念.

若声场是相干的, 点目标源做匀速直线运动, 则必定可考察确定性的时空滤波器, 它的系统函数有四个, 示于图 1.

图 1 中 $h(\tau, t)$ 为信道的冲激响应函数, t 为时间, τ 为时延; $H(f, t)$ 为信道的频率响应函数, f 为观察频率; $B(f, \varphi)$ 为信道的双频函数, φ 称为频率扩展; $S(\tau, \varphi)$ 为信道的扩展函数, 描述在时延 τ 和频率扩展 φ 域上的联合扩展.

所有四个系统函数互为 Fourier 变换. 任何一

个就可以完全确定系统的性能, 它们分别在某个方面能更直观地描述信道.

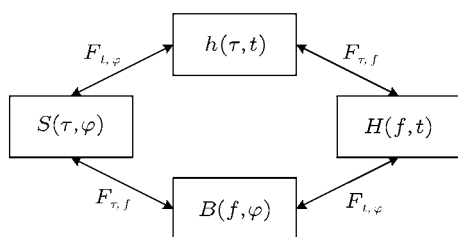


图1 时变信道的系统函数

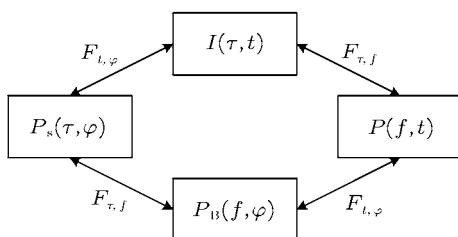


图2 带限白噪声的时空滤波系统函数

舰船辐射源信号在 150 Hz—1 kHz 内常是连续谱随机噪声, 经预白化后可得到带限白色噪声. 所以, 假定源信号为 $\sigma_z z(t)$, σ_z 为源强度, $z(t)$ 为归一化的带限白噪声, 即 $\overline{z^2(t)} = 1$.

由于源信号是随机的, 时空滤波器的输出 $P(f, t)$ 为

$$P(f, t) = \sigma_z^2 H(f, t) H^*(f, t) = \sigma_z^2 |H(f, t)|^2, \quad (10)$$

其中, σ_z^2 为一常数, $P(f, t)$ 称之为相干函数.

所以, 随机白噪声通过时空滤波器, 也可用四个系统函数表示, 如图 2 所示. 其中, $P(f, t)$ 为 LOFAR 图, 也称为相干函数或接收信号功率谱时频分布函数, 若略去常系数, $P(f, t) = |H(f, t)|^2$; $I(\tau, t)$ 称为“功率响应函数”, 是接收信号归一化相关函数的瀑布图, 即归一化自相关函数的时间历程图; $P_B(f, \varphi)$ 称为“双频函数”, 为干涉结构的频率及频率扩展的联合分布函数; $P_s(\tau, \varphi)$ 为信道的扩展分布函数, 是关于时延 τ 和频率扩展 φ 的联合分布函数.

四个系统函数互为 Fourier 变换. 例如:

$$I(\tau, t) = \int P(f, t) e^{j2\pi f\tau} df, \quad (11)$$

$$P_B(f, \varphi) = \int P(f, t) e^{-j2\pi\varphi t} dt, \quad (12)$$

$$P_s(\tau, \varphi) = \int I(\tau, t) e^{-j2\pi\varphi t} dt. \quad (13)$$

3.2 LOFAR 图的干涉条纹方程

若目标做匀速直线运动, 辐射宽带连续谱信号, 其线速度为 v , 最近通过距离为 r_0 , 相应的通过时刻为 t_0 , 其航迹几何关系示于图 3.

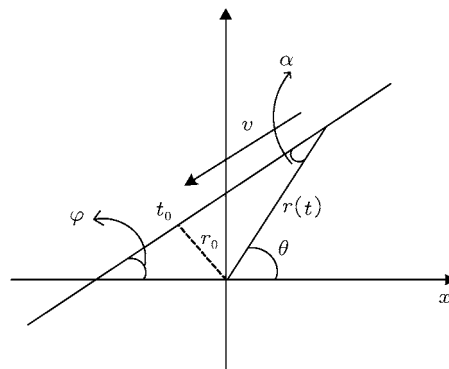


图3 目标运动几何关系图

传感器或阵的声学中心位于坐标原点, 则目标运动轨迹方程为

$$r(t) = \sqrt{v^2\tau^2 + r_0^2}, \quad \tau = t - t_0. \quad (14)$$

对单传感器或水平阵跟踪波束输出做 LOFAR 分析, 得到 $P(t, f)$ 图, 图中有明显的干涉条纹. 其干涉条纹的斜率 $df/d\tau$ 为

$$\frac{df}{d\tau} = \frac{df}{dr} \cdot \frac{dr}{d\tau}. \quad (15)$$

由 (5) 式可知:

$$\frac{df}{dr} = \frac{f}{r}\beta, \quad (16)$$

其中, f 为频率, r 为距离, β 为波导不变量, 理想波导中其值为 1.

由 (14) 式可知:

$$\frac{dr}{d\tau} = \frac{v^2\tau}{\sqrt{v^2\tau^2 + r_0^2}}. \quad (17)$$

将 (16), (17) 式代入 (15) 式, 可得:

$$\frac{df}{f} = \frac{\beta v^2\tau}{v^2\tau^2 + r_0^2} d\tau, \quad (18)$$

两边积分, 并整理得:

$$f = f_0 \left[1 + \left(\frac{v}{r_0} \right)^2 \tau^2 \right]^{\beta/2}, \quad (19)$$

其中, f_0 为干涉条纹在最近通过时刻 t_0 的频率, 称为参考频率. (20) 式即为 LOFAR 图上干涉条纹的轨迹方程, 若通过时频分析获得了 LOFAR 图, 则可通过图像处理手段估计 $v/r_0, \beta$ 等参数.

4 仿真研究

以下将通过仿真给出相干函数等四个系统函数的直观图像, 分析其特征.

仿真条件: 采用 Pekeris 模型, 海深 $H = 55 \text{ m}$, 声速 $c_1 = 1500 \text{ m/s}$, 密度 $\rho_1 = 1000 \text{ kg/m}^3$, 海底介质声速 $c_2 = 1610 \text{ m/s}$, 其密度 $\rho_2 = 1900 \text{ kg/m}^3$, 海底无吸收. 接收传感器深度: $z_r = 30 \text{ m}$, 为矢量传感器. 目标等深航行, 吃水深度 $z_s = 4 \text{ m}$, 航行速度 $v = 10 \text{ m/s}$, 最近通过距离 $r_0 = 1100 \text{ m}$, 最近通过时刻为 0 时刻, 记为 t_0 , 定义接近传感器时间为负, 反之为正. 处理频段: 300—1000 Hz. 采用 KRAKENC 软件对声场建模.

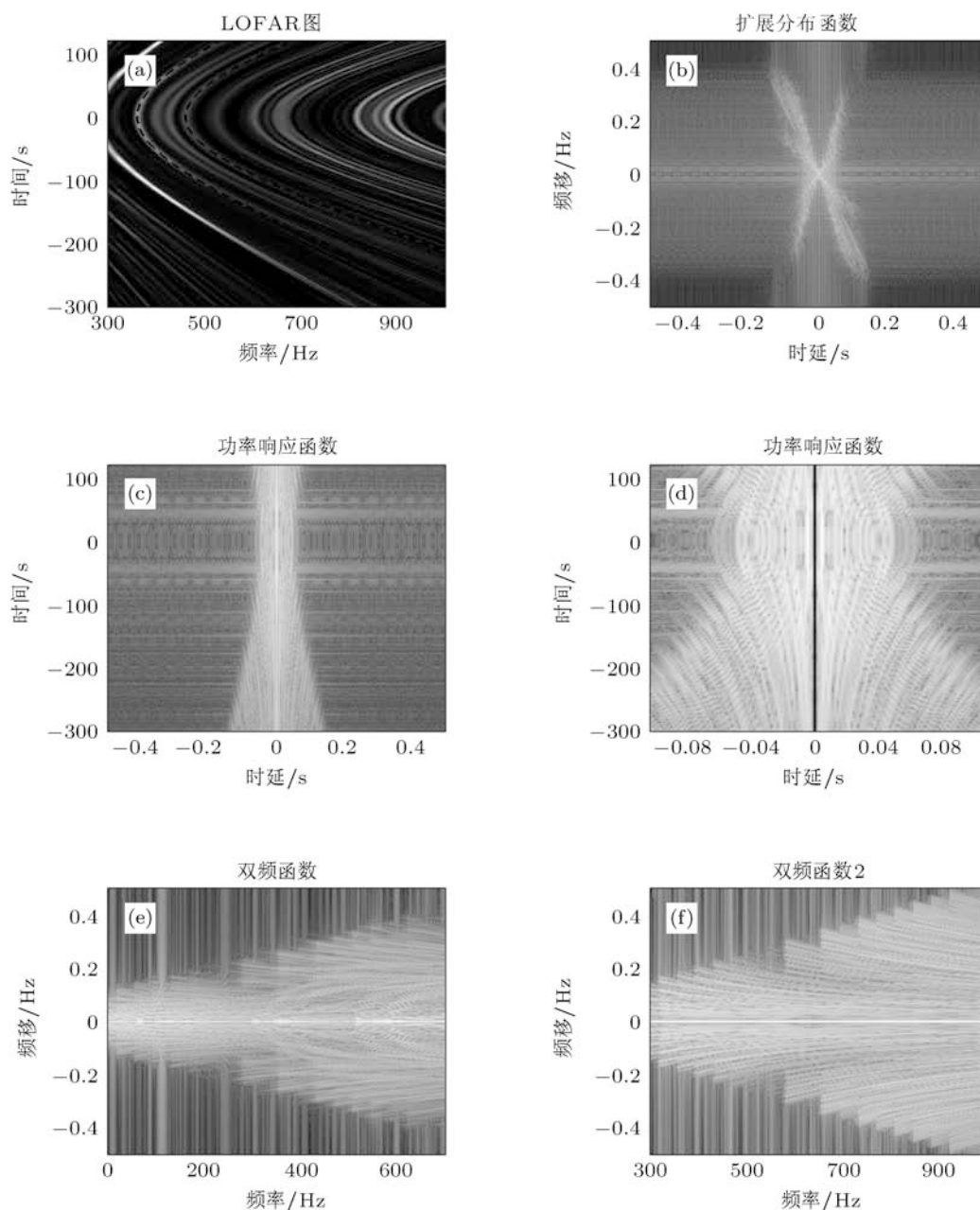


图 4 仿真得到的四个系统函数 (a) 相干函数; (b) 扩展分布函数; (c) 功率响应函数; (d) 为 (c) 图的放大; (e) 双频函数; (f) 双频函数 2

目标由远及近, 继而又由近及远航行, 仿真得到的四个系统函数如图 4 所示. 其中, 图 4(a) 为相干函数 (即 LOFAR 图), 图 4(b) 为扩展分布函数, 图 4(c) 为功率响应函数, 图 4(d) 为功率响应函数图在 0 时延处置零后的局部放大, 图 4(e) 为双频函数, 图 4(f) 为目标在较远距离处航行 (没有最近通过距离) 时的双频函数.

图 4(a) 上的虚线为取 $f_0 = 303 \text{ Hz}$, 396 Hz , $\beta = 1$ 时用 (20) 式预报的两条干涉条纹, 可以看出理论预报和仿真的干涉条纹重合得较好, 验证了干涉条纹确实是由 (20) 式确定的. 因此, 若获得了 LOFAR 图, 可以通过图像处理手段估计目标运动参数及波导不变量.

扩展分布函数反映了干涉条纹的斜率, 由图 4(b) 可知, 若双曲线一支在负时间轴的斜率为负, 相应扩展分布函数图上的条纹分布在二、四象限, 则另一侧的斜率一定为正, 相应扩展分布函数图上的条纹分布在一、三象限. 目标在近距离处时产生的干涉条纹的斜率大, 在扩展分布函数图上的条纹靠近频移轴, 而在远距离时干涉条纹的斜率小, 在扩展分布函数图上的条纹靠近时延轴. 从图上也可以看出, 扩展分布函数图上的条纹不仅仅为一条直线, 而是在某角度范围内成一片, 这更直观地说明了波导不变量不是某固定值, 而是有一定分布.

从图 4(c) 和 (d) 的功率响应函数图可以看出, 对于某号干涉条纹, 在 0 时刻的时延最大, 而在两端的时延小, 呈“灯笼”状, 而“灯笼”外围的干涉条纹不完整, 呈一个“x”形的亮区. 分析原因如下: 对于 LOFAR 图上的两条干涉条纹, 越远离 0 时刻, 频率差越大, 如图 5 所示, 即频差 B 越大, 则时延越小, 因此出现了“灯笼状”条纹, 而同时干涉条纹随着远离 0 时刻不断分叉, 变得越来越密集, 这样在功率响应函数图上出现了反方向的条纹, 该条纹表现了干涉条纹的分叉现象. 由 (9) 式可知, 功率响应函数某个平行与时延轴的切面反映在该距离上不同阶简正波间的群时延的差分 (或群慢度的差分), 可以看出距离越远, 各阶简正波到达的越分散, 体现了简正波的频散特性.

从图 4(e) 的双频函数可知, 其干涉条纹更加的复杂, 相比而言, 没有最近通过距离的双频函数 (图 4(f)) 上的干涉条纹要相对简单, 其分布与远距离处的功率响应函数的逆时针旋转 90° 类似, 可以作与功率响应函数相似的分析. 由 (6) 式可知, 双

频函数某个平行与频移轴的切面反映在该频率上不同阶简正波间的波数差分 (或相慢度的差分).

以上即为用四个系统函数描述的干涉结构的特点, 基于时空滤波器的信号处理技术有重要的应用前景. 基于相干函数 $P(f, t)$ 可用于估计波导不变量 β 并用于被动测距^[11,15,16], 由于不变量 β 可在线提取而不必预先得到环境的精细知识, 因而基于此类干涉结构的目标参数估计技术和被动测距技术是稳健的, 受水文条件变化的影响小^[16]. 在扩展函数 $P_s(\tau, \varphi)$ 图上的干涉条纹是直线, 其斜率即反映了 β 值, 所以在该图上用 Hough 变换提取 β 值较为有利^[17]. 功率响应函数 $I(\tau, t)$ 和双频函数 $P_B(f, \varphi)$ 是群时延差分 and 模态波数差分的直接测量, 能为海底的地声反演和海洋声层析提供有用的信息. 因此, 四个系统函数各有特色, 值得做更深入的研究.

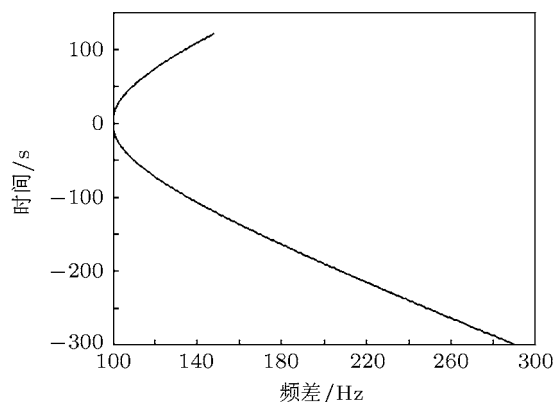


图 5 LOFAR 图上两干涉条纹的频差随时间的变化

5 海试数据分析

为了验证低频声场的相干特性和仿真结果与分析的正确性, 进行了海试数据的分析. 试验海区的海底较平坦, 深度为 50 余米, 声速为 1510 m/s; 采用 48 元的均匀直线阵接收, 布阵深度约 30 m; 目标相对与接收阵由远及近又由近及远的等深航行, 深度约为 4 m.

对跟踪波束输出做短时 Fourier 变换, 得到 LOFAR 图, 即相干函数图如图 6(a) 所示. 从图上可以看到明显的干涉现象, 并且干涉条纹为一簇类双曲线, 与仿真吻合, 但是条纹没有仿真的密集, 可读出最近通过时刻约为 302 s. 图 6 其余子图的含义同图 4, 海试数据处理的结果与仿真的相似. 在图 6(d)

上没有明显“x”形条纹,因为100 s之前的信噪比较低,所以0到100 s的干涉条纹分叉现象不明显,而

仔细观察可以发现,其实在100 s至230 s之间出现与“灯笼”状条纹反方向的条纹,与仿真结果一致.

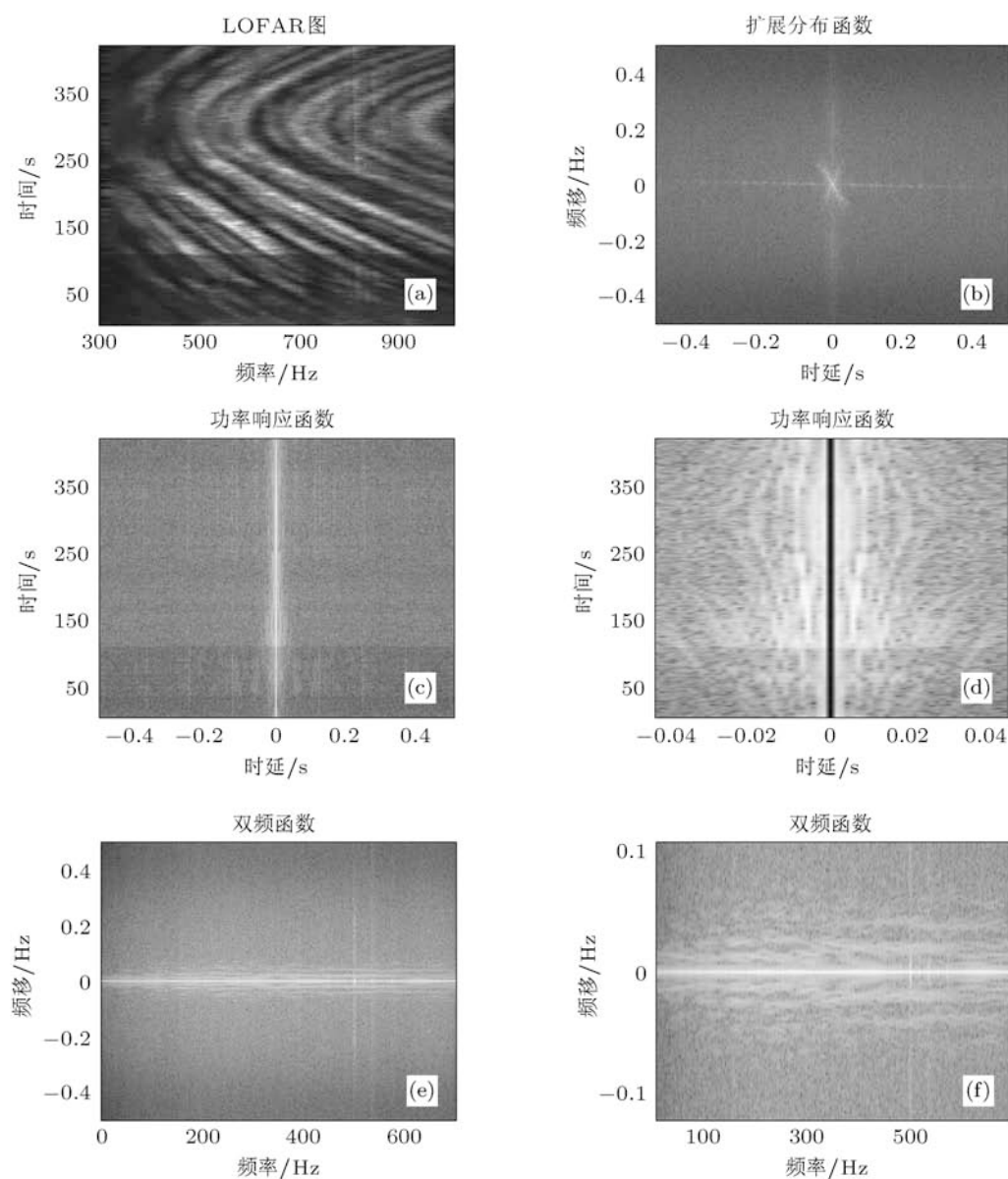


图6 海试得到的四个系统函数 (a) 相干函数; (b) 扩展分布函数; (c) 功率响应函数; (d) 为(c)图的放大; (e) 双频函数; (f) 为(e)图的放大

6 结论

本文从时空滤波理论的视角更系统地描述了声场的相干性. 在理论分析和仿真研究的基础上,进行了海试数据的处理,充分验证了海洋波导中,低频声场确实为缓慢变化的稳定的相干信道. 相干函数、功率响应函数、双频函数、扩展分布函数

等时空滤波器的四个系统函数中仅有一个是独立的,但有各自独特的干涉结构,能特别突出地干涉结构的某方面的特征,各有特色. 通过图像处理手段,利用干涉图能估计目标的运动参数和环境信息;连续谱干涉结构的获得也是相慢度和群慢度的直接测量,能为海底的地声反演和海洋声层析提供有用的信息. 如何挖掘干涉结构的工程应用价值,将是今后工作的重点之一.

- [1] Hui J Y, Sun G C, Zhao A B 2008 *Acta Acustica* **33** 300 (in Chinese) [惠俊英, 孙国仓, 赵安邦 2008 声学学报 **33** 300]
- [2] 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]
- [3] 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]
- [4] Chuprov S D 1982 *Interference structure of sound field in the layered ocean*, in Brekhovskikh L M, Andreeva I B (ed) *Ocean Acoustics. Modern State* (Moscow Nauka) pp 71–91
- [5] Brekhovskikh L M, Lysanov Y P 2002 *Fundamentals of Ocean Acoustics* (New York: Springer-Verlag)
- [6] D'Spain G L, Kuperman W A 1999 *J. Acoust. Soc. Am.* **106** 2454
- [7] Wang N, Gao D Z, Wang H Z 2010 *J. Harbin Eng. Univ.* **31** 825 (in Chinese) [王宁, 高大治, 王好忠 2010 哈尔滨工程大学 **31** 825]
- [8] Guo G Q, Yang Y X, Sin C 2011 *Chin. Sci. Bull.* **56** 142
- [9] Turgut A, Orr M, Rouseff D 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **127** 73
- [10] Cockrell K L, Schmidt H 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **127** 2780
- [11] Yu Y, Hui J Y, Yin J W, Hui J, Wang Z J *Acta Acustica* (accepted) (in Chinese)[余赟, 惠俊英, 殷敬伟, 惠娟, 王自娟 声学学报 (待发表)]
- [12] Rouseff D, Spindel R C 2002 *AIP Conference Proceedings* **621** 137
- [13] Yang T C 2003 *J. Acoust. Soc. Am.* **113** 1342
- [14] Hui J Y, Sheng X L 2007 *Underwater Acoustic Channel* (Beijing: National Defense Industry Press) pp77–81 (in Chinese)[惠俊英, 生雪莉 2007 水下声信道 (第二版) (北京: 国防工业出版社) 第 77–81 页]
- [15] Yu Y, Hui J Y, Zhao A B, Lin F 2011 *Acta Armament* **32** 274 (in Chinese) [余赟, 惠俊英, 赵安邦, 林芳 2011 兵工学报 **32** 274]
- [16] Yu Y, Hui J Y 2011 *Acta Acustica* **36** 256 (in Chinese) [余赟, 惠俊英 2011 声学学报 **36** 256]
- [17] An L, Wang Z Q, Lu J R 2008 *J. Electron. Information Technol.* **30** 2930 (in Chinese)[安良, 王志强, 陆信人 2008 电子与信息学报 **30** 2930]

Researches on the interference structure in low-frequency acoustic field based on space-time filter theory*

Yu Yun^{1)2)†} Hui Jun-Ying²⁾ Chen Yang²⁾ Hui Juan²⁾ Yin Jing-Wei²⁾

1) (Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China)

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

(Received 26 October 2010; revised manuscript received 19 May 2011)

Abstract

Compared with the waveguide invariant, the interference structures in low-frequency acoustic field are more comprehensively described by four system functions: coherent function, power response function, spread function and dual-frequency function, from space-time filter theory. A stable interference structure in the low-frequency acoustic field is testified based on theoretical analysis, simulation and sea trial data processing. When the target moves in a uniform rectilinear motion from far to near then from near to far, the interference structure of coherent function (LOFARgram) appears to be a family of quasi hyperbolas; the interference structure obtained by power response function represents the group delay difference and the dispersive characteristic of the normal mode; and the phase slowness difference can be exhibited by dual-frequency function. Each system function owns special characteristics, which can give prominence to certain features of the interference structure.

Keywords: interference structure, space-time filter, waveguide invariant, low-frequency acoustic field

PACS: 43.30.+m

* Project supported by the Science and Technology Foundation of State Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, China (Grant Nos. 9140C200201090C2004, 9140C2002100802), National Key Laboratory of Sonar Fund (Grant No. kf201001) and National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51009041).

† E-mail: yuyuntc@163.com