

利用 LOFAR 谱图的二维傅里叶变换脊计算波导不变量

安良^① 王志强^{①②} 陆佺人^①

^①(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

^②(河海大学电气工程学院 南京 210098)

摘要: 该文提出了利用被动声纳信号 LOFAR 谱图的二维傅里叶变换脊计算波导不变量的方法。在用简正波方法分析了两种典型波导的波导不变量分布情况的基础上, 推导了利用 LOFAR 谱图二维傅里叶变换脊计算波导不变量的公式。运用该公式仿真计算了 Pekeris 波导和具有负跃层的浅海波导声场中声源深度从 10m 变化到 90m 时的波导不变量值, 经过与南海试验数据的计算对比, 两者计算结果相符。与简正波方法相比, 该方法不需要精确了解海洋环境参数, 同时避免了复杂的微分方程求解运算, 更适合于信号的实时处理。

关键词: LOFAR 谱图; 波导不变量; 二维傅里叶变换; 脊

中图分类号: U666.7; TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)12-2930-04

Calculating the Waveguide Invariant by the 2-D Fourier Transform Ridges of Lofargram Image

An Liang^① Wang Zhi-qiang^{①②} Lu Ji-ren^①

^①(Information Science and Engineering College, Southeast University, Nanjing 210096, China)

^②(Electric Engineering College, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A new method is presented in this paper for the calculation of waveguide invariant (β) with passive sonar lofargram image. The distributions of β in two waveguides are studied with normal mode model. Concise formula for calculating β is then derived by finding the 2-D Fourier transforms ridges of the lofargrams. The algorithm is exercised for a Pekeris waveguide and a simulated shallow water waveguide containing thermoclines with source depth varying from 10m to 90m. It then is applied to a lofargram collected during an experiment at the South China Sea. The result of experimental data is well matched to the simulations. The approach differs from normal mode algorithm by virtue of its avoidance of potentially prohibitive computation and accurate estimation of environmental parameters and is more suitable for real-time signal processing.

Key words: Lofargram; Waveguide invariant; 2-D Fourier Transform; Ridges

1 引言

在被动声纳处理中, 目标辐射噪声的 LOFAR 谱分析是一种识别目标类别的重要手段^[1]。由于浅海信道的多路径效应, 在 LOFAR 谱图上会形成强弱分明的干涉条纹。在目标靠近接收器时, 干涉条纹呈现出如图 1 所示的抛物线形状图样, 这种现象称为洛埃镜效应^[2]; 在目标远离接收器时, 条纹表现出如图 2 所示的带状分布的斜直条纹, 这是不同的简正波模式叠加的结果, 条纹的斜率可以用波导不变量描述。干涉条纹虽然给目标特征线谱的提取造成了困难, 但是由于其形成与信道结构和目标位置有着密切的关系, 因此干涉条纹中蕴含了信道和目标位置的信息。

波导不变量的概念最早由前苏联的学者提出^[3], 用来刻画海洋波导的色散结构与空间干涉的周期性, 可以通过求解简正波模式群速度和相速度的方法来计算得到。近年来, 众

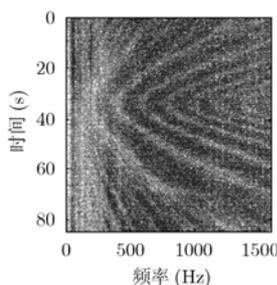


图1 某近程目标的 LOFAR 谱图

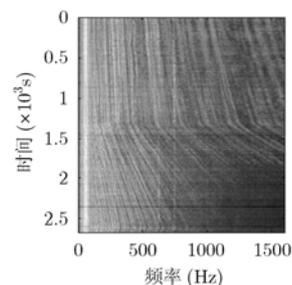


图2 某远程目标的 LOFAR 谱图

多学者对波导不变量进行了广泛而深入的研究。Rouseff 等把波导不变量建模为一种分布^[4], Baggeroer 讨论了使用地震拖缆进行干涉不变量分布估计的问题^[5], Thode 等把波导不变量应用于匹配场定位中^[6]。

本文提出一种通过提取 LOFAR 谱图的二维傅里叶变换

脊的方法来计算波导不变量,从而获取 LOFAR 谱图中信道结构和目标位置的信息。第 2 节介绍浅海波导中的干涉现象以及波导不变量的概念。第 3 节通过使用 Kraken 模型求解简正波群速度和相速度的方法计算了 β 的分布情况。第 4 节引入 LOFAR 谱图的二维傅里叶变换,介绍了“脊”的概念,推导了应用脊的斜率计算波导不变量的脊公式,而后运用脊公式仿真了 Pekeris 波导和浅海波导中波导不变量。第 5 节给出一个运用脊公式进行实测舰船辐射噪声数据计算的例子,计算结果与仿真结果相符,证明了脊公式计算波导不变量方法的正确性。

2 浅海波导中的干涉现象和波导不变量的概念

2.1 干涉现象产生的机理

考虑比较简单情况,设海深为 H ,声速恒定为 c ,声源位于水面上,接收器位于距声源 D 处的 z_r 深度上,如图 3 所示。在声源和接收器距离比较近时,只考虑两条声传播路径,波导的频率响应可以写为

$$|H(\omega)|^2 = 1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos \omega \tau \quad (1)$$

式中 α 为衰减系数, τ 为直达路径和反射路径之间的时延。经推导可得 ω 是时间 t 的二次函数^[7],所以在 LOFAR 谱图上会形成如图 1 所示的干涉图样。

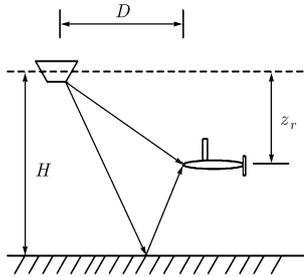


图 3 多路径传播示意图

当声源和接收器距离比较远时,特别是在声速分布不均匀的情况下,声线发生弯曲,波导的频率响应将不能够按照虚源法^[2]来确定。在这种情况下,点声源的接收声压场可以表示成有限简正模式的累加形式。若声源的频率为 ω ,声源深度为 z_s ,则与声源距离为 r 深度为 z_r 的接收点处声压和声强可以分别表示为^[3]

$$p(r, \omega) = \sum_{m=1}^N \sqrt{\frac{2\pi}{k_m r}} \Psi_m(z_r) \Psi_m(z_s) e^{-ik_m r} = \sum_{m=1}^N B_m e^{-ik_m r} \quad (2)$$

$$\bar{I}(\omega, r) = |p|^2 = pp^* = \sum_m |B_m|^2 + \sum_{m \neq n} B_m B_n^* \exp[i(k_n - k_m)r] \quad (3)$$

其中 k_m 为 m 号简正波的水平波数, Ψ_m 为相应的模式特征函数, $B_m = (2\pi k_m^{-1} r^{-1})^{1/2} \Psi_m(z_r) \Psi_m(z_s)$ 。式(3)中第 1 项是距离 r

和频率 ω 的缓变函数^[8],第 2 项由于各简正波模式之间发生干涉而产生波动,在距离-频率平面上表现出明暗相间的干涉条纹。

2.2 波导不变量

在声强的距离-频率分布平面上,干涉条纹最亮处对应于声强在该处取得极大值,因此有 $d\bar{I} = 0$,将 $d\bar{I}$ 表示为距离 r 和频率 ω 的全微分,则有

$$\frac{d\omega}{dr} = -\frac{\partial \bar{I} / \partial r}{\partial \bar{I} / \partial \omega} \quad (4)$$

根据式(3),并考虑 m 号简正波的水平相速度 $v_m = \omega / k_m$,水平群速度 $u_m = d\omega / dk_m$,可得

$$\frac{\partial \bar{I}}{\partial r} = i \sum_{m,n} B_m B_n^* (k_n - k_m) \exp[i(k_n - k_m)r] = i\omega \sum_{m,n} B_m B_n^* (1/v_n - 1/v_m) \exp[i(k_n - k_m)r] \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{I}}{\partial \omega} = ir \sum_{m,n} B_m B_n^* (dk_n / d\omega - dk_m / d\omega) \exp[i(k_n - k_m)r] = ir \sum_{m,n} B_m B_n^* (1/u_n - 1/u_m) \exp[i(k_n - k_m)r] \quad (6)$$

经过近似^[3]可得式(7),其中 u, v 为模式相速度和群速度的均值

$$\frac{rd\omega}{\omega dr} = -\frac{d(1/v)}{d(1/u)} \quad (7)$$

式(7)为波导不变量 β 的定义式^[3],同时也给出了 β 的一种计算方法,即可以用相缓(相速度的倒数)对群缓(群速度的倒数)的导数计算波导不变量。

3 简正波方法计算波导不变量

采用 Kraken 模型来计算群速度与相速度,然后对群速度 u 进行三次样条插值,将其表示成为相速度 v 的函数,进行微分运算,代入式(7),求出 β 。

(1) Pekeris 波导 Pekeris 波导的结构如图 4 所示,它由一个等速的海水层和一个等速的海底半空间组成。根据式(7)计算不同频率和相速度下的 β 分布,如图 5 所示。可以看出 Pekeris 波导中 β 的值在 0.85-1 之间,接近于理论计算值 1^[3]。

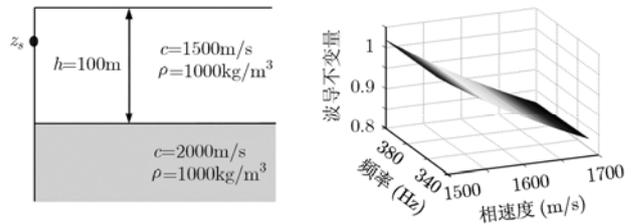


图 4 Pekeris 波导结构示意图 图 5 Pekeris 波导中的 β 分布

(2) 存在负跃层的浅海波导 浅海声速剖面的特点是存在负跃层,这里采用南中国海三月份典型的浅海声速剖面^[9]:深度 0-40m 的水层声速从 1532.2m/s 下降为 1531.5m/s;深

度 40–80m 是一个声速从 1531.5m/s 线性缩小至 1529.1m/s 的负跃层；深度 80–100m 是一个声速从 1529.1m/s 线性缩小至 1526.8m/s 的负跃层；海底声速为 1690m/s，密度为 1890kg/m³，衰减为 2dB/λ，β 的分布如图 6 所示。

4 利用二维傅里叶变换计算波导不变量

4.1 二维傅里叶变换的脊

LOFAR 谱图一般是由辐射噪声的功率谱构成的，声信号的功率和声强存在着正比对应关系，所以下面的分析都以声强为目标函数。

当在声强的距离-频率平面上出现如图 7 所示的干涉条纹时(实线代表亮条纹，虚线代表暗条纹)，假设各亮条纹上的声强相等。设 $\bar{I}_0(r)$ 为声强沿距离轴分布的函数，与频率无关。设 $\bar{I}(r, \omega)$ 为平面中的任意一点，由于这时声强随距离和频率呈带状分布，则根据几何关系，有

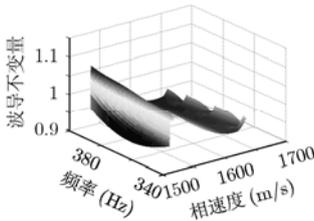


图 6 存在负跃层的浅海波导中的 β 分布

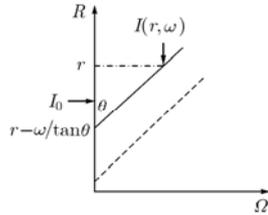


图 7 声强干涉条纹示意图

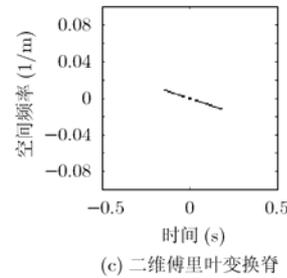
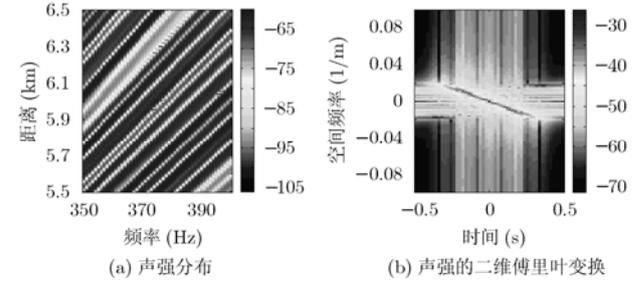


图 8

考察 Pekeris 波导的情况，波导的参数与图 4 所示的情况相同。频率范围 350~400Hz，分为 50 个频段；距离范围 5.5km~6.5km，分为 200 个区间，声源深度 10m，接收器深度 50m。图 8(a)–图 8(c)分别为声强的分布、对应的二维傅里叶变换和二维傅里叶变换脊，根据脊公式计算得 β=1.016。

4.2 波导不变量随深度的分布

考虑第 3 节中的浅海波导，海深为 100m，取声源深度分别为 10m~90m，接收器深度为 55m，距离为 15.5km~18.3km，分为 200 个区间，频率为 350~400Hz，分为 50 个频段，仿真声强的距离-频率分布，并使用 4.1 节中的方法计算波导不变量，所得结果如图 9 所示。

由计算结果可见，根据脊公式计算所得的波导不变量与由简正波方法计算的结果相符合。之所以在不同的深度，波导不变量的计算结果不同，是因为负跃层的存在使得声源位于不同位置时，接收器所能接收到的简正波模式不同。当声源和接收器处于同一个负跃层中时，波导不变量呈现出比较大的值。

5 实际海试数据分析

图 11(a)是 1999 年 3 月在南海某海域实测的某水面目标辐射噪声 LOFAR 谱图的一部分，频率为 350Hz–400Hz，分为 50 个频段，接收器深度为 53m，声速分布与第 3 节中浅海波导的情况相似。声源和接收器的运动情况如图 10 所示，距离从 13.6km 至 16.4km，分为 200 个区间。对图 11(a)的 LOFAR 谱图进行二维傅里叶变换，如图 11(b)所示，提取二维傅里叶变换的脊，运用脊公式计算可得 β=0.978，表明接收器与声源处于不同的负跃层中，与 4.2 节中的仿真结果相符合。

$$\bar{I}(r, \omega) = \bar{I}_0(r - \omega / \tan \theta) \quad (8)$$
其中 $\tan \theta = d\omega / dr = \omega_{\text{mid}} / r_{\text{mid}}$ ， ω_{mid} 和 r_{mid} 分别是频率和距离的中值^[4]。定义声强 \bar{I} 的二维傅里叶变换：

$$\eta(\xi, \tau) = \iint I(r, \omega) \exp[-i(\xi r + \tau \omega)] dr d\omega \quad (9)$$

把式(8)代入式(9)，则有

$$\eta(\xi, \tau) = \eta_0(\xi) \delta(\tau + \xi / \tan \theta)$$

其中 η_0 为 \bar{I}_0 的傅里叶变换， δ 为 Dirac 函数，即只有当 $\tau = -\xi / \tan \theta$ 时，声强 \bar{I} 的二维傅里叶变换才能取到最大值 $\eta_0(\xi)$ ，因此 $\eta(\xi, \tau)$ 在 $\xi - \tau$ 平面上应该呈现为一条直线，把这条直线称为 $\eta(\xi, \tau)$ 的脊，脊的斜率 $-\tan \theta$ 就反映了波导不变量的值。

对于离散化的 $\bar{I}(r, \omega)$ ，设距离 $r = M\Delta r$ ，频率 $\omega = N\Delta \omega$ ， M 、 N 均为整数。则在 $\eta(\xi, \tau)$ 平面上有^[10]：

$$\beta = -\frac{r_{\text{mid}}}{\omega_{\text{mid}}} K = -\frac{r_{\text{mid}} \Delta \xi}{\omega_{\text{mid}} \Delta \tau} \kappa \quad (10)$$

其中 $\Delta \xi = (M\Delta r)^{-1}$ ， $\Delta \tau = (N\Delta \omega)^{-1}$ ， K 为 $\eta(\xi, \tau)$ 的脊的斜率。 κ 为用 ξ 和 τ 的下标值计算出的直线斜率，称式(10)为波导不变量的脊公式。

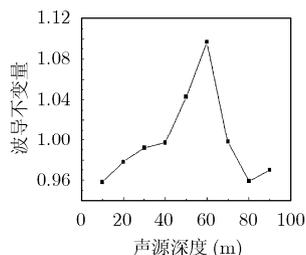


图 9 不同声源深度的 β 计算结果

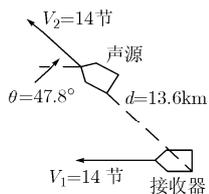
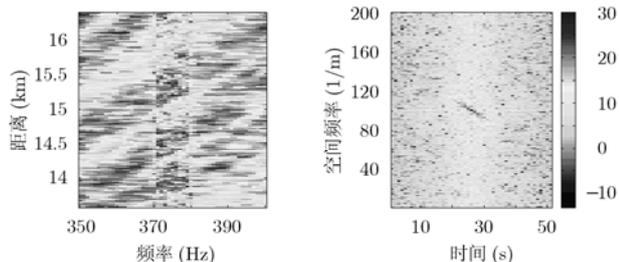


图 10 声源与接收器相对运动情况



(a) 某水面目标的 LOFAR 谱图 (b) LOFAR 谱图的二维傅里叶变换

图 11 海上试验数据结果

6 结束语

波导不变量反映了海洋波导中宽带信号声场的空间频率干涉结构, 其物理意义是声强的距离-平面上, 由某一群模式的简正波干涉条纹的斜率。在实际的浅海波导中, 由于声速分布的不均匀性等原因, 波导不变量并不是某一定值, 它的变化和声速梯度、声源的深度以及接收器的深度都有着密切的关系。

本文从被动声纳目标的 LOFAR 谱图入手, 分析了 LOFAR 谱图中干涉条纹的形成原因, 提出了根据 LOFAR 谱图的二维傅里叶变换计算波导不变量的脊公式。这种方法不要求解简正波方程, 计算量小, 便于实现。计算的结果给出了声源与接收器相对位置的信息, 为声源的分类识别提供了依据, 是一种 LOFAR 谱图信息挖掘的有效手段。

参 考 文 献

[1] 李启虎. 数字式声纳设计原理[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2002: 250-259.
Li Qi-hu. Designing Principles of Digital Sonar[M]. Hefei:

Anhui Education Press, 2002: 250-259.
[2] Unrick R J. Principles of Underwater Sound 3rd ed [M]. New York : McGraw-Hill, 1983: 131-133.
[3] Brekhovskikh L M and Lysanov Y P. Fundamentals of Ocean Acoustics, 3rd ed [M]. New York: Springer-Verlag, 1991: 128-129, 143-148.
[4] Rouseff D and Spindel R C. Modeling the waveguide invariant as a distribution[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2002, 621(1): 137-150.
[5] Baggeroer A B. Estimation of the distribution of the interference invariant with seismic streamers [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2002, 621(1): 151-167.
[6] Thode A M, Kuperman W A, and D'Spain G L, et al. Localization using Bartlett matched-field processor sidelobes[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999, 107(1): 278-286.
[7] Lourens J G. Passive sonar detection of ships with spectrograms [J]. *IEEE 1990 South African Symposium on Communications and Signal Processing*, Johannesburg, 1990: 147-151.
[8] D'Spain G L and Kuperman W A. Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow water environments that vary in range and azimuth[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999, 106(5): 2454-2468.
[9] 王东晓, 杜岩, 施平. 南海上层物理海洋学气候图集[M]. 北京: 气象出版社, 2002, 第 4 章.
Wang Dong-xiao, Du Yan, and Shi Ping. Climatological Atlas of Physical Oceanography in the Upper Layer of the South China Sea[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002, Chapter 4.
[10] Gonzalez R C and Wintz P. Digital Image Processing [M]. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company Advanced Book Program, 1977: 44-45.

安 良: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为水声目标识别。
王志强: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为非线性降噪、混响背景下的微弱信号检测。
陆信人: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为统计信号处理、非线性信号处理、盲信号处理、水下通信信号处理。