

基于不同格林函数的噪声源定位方法研究

姬庆,程锦房,肖大为

(海军工程大学 兵器工程系,湖北 武汉 430033)

摘要:格林函数作为近场声全息算法的传递函数,其傅里叶(Fourier)谱的准确获取是声场高精度重建的前提。该文详细介绍了近场声全息的基本原理,推导了两种格林函数傅里叶谱的获取方法,并通过仿真对水下多声源进行逆向重构定位。仿真结果表明,声源较少时,两种方法的定位误差均不超过5 cm,且声源声压幅值对应成比例;当声源数较多时,基于K-空间抽样格林函数具有抑制多声源相干产生的虚拟声源的鲁棒性,更适于多噪声源的定位。

关键词:近场声全息;格林函数;多声源;逆向定位;抽样

中图分类号:TN911 **文献标识码:**A

Research on Method of the Noise Source Localization Based on Different Green Function

Ji Qing, CHENG Jinfang, XIAO Dawei

(Dept. of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: As the transfer function of the near field acoustic holography (NAH) algorithm, the accurate acquisition of Green Function Fourier spectrum is the prerequisite for the high precision reconstruction of the sound field. In this paper, the basic principle of NAH is presented and two kinds of the acquisition methods of the Green Function's Fourier spectrum are introduced in detail. Then through the simulation of underwater sound source for the reverse reconstruction so as to complete the sound source localization. The results show that when the sound source is less, the positioning error of the two methods were less than 5 cm, and the acoustic pressure amplitude of the source is proportional; while when the sound source number is larger, the sound field reconstruction based on the K-space sampling Green function has the robustness to suppress virtual sound sources generated by the multiple sound sources, which is more suitable for the location of multiple noise sources.

Key words: near-field acoustic holography; Green function; multi sound source; reverse localization; sample

0 引言

20世纪80年代,E G Williams提出的近场声全息技术(NAH)对于噪声源的检测与定位研究有着重要意义。其基本原理是:首先对声源附近的一个平面进行声压的采集,然后依据重构算法实现对声源的整个辐射声场进行重构。可见,由于近场声全息采用近场测量,因此,近场声全息对噪声源的定位、声场可视化、声源特性研究等都有其独特优势。随着全息理论的日趋成熟,近场声全息技术也从单纯的理论研究成功转向工程应用,在汽车、机械等领

域得到了广泛应用^[1-2]。

利用近场声全息技术完成声场逆向重构时,根据全息面声压分布找出声源中心分布位置,可以完成对振动体噪声源进行定位。完成声场重建的最重要的环节是声场传递函数,即格林函数的傅里叶(Fourier)谱的获取。目前,格林函数谱的获取主要有实空间抽样格林函数和K-空间抽样格林函数两种方法^[3]。本文重点对在逆向重构时,格林函数傅里叶谱(也称角谱)的两种获取方法进行分析研究,对比重构效果,比较两种格林函数相应的适用范围,为声源定位提供理论依据。

收稿日期:2016-07-25

基金项目:“十二五”国防预研基金资助项目(4010603020301)

作者简介:姬庆(1991-),男,安徽淮北市人,博士生,主要从事目标特性及信息感知技术的研究。通信作者:程锦房(1964-),男,湖北嘉鱼人,教授,博士生导师,主要从事目标特性及信号处理技术的研究。

1 近场声全息声源定位原理

在狄里克利(Dirichlet)边界条件下,对于在 $z > 0$ 的空间自由声场,已知声源($z = z_s$)附近的某一平面上声压分布($z = z_H$,称为全息面),声压面位置如图1所示。

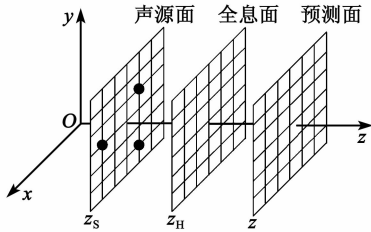


图1 声场中声压面位置示意图

根据全息理论^[4-5],正向重构($z > z_H$)时,空间某一平面声压分布可通过利用全息面声压与格林函数作卷积获得:

$$p(x, y, z) = \iint_S \{ p(x_H, y_H, z_H) \times g_D(x - x_H, y - y_H, z - z_H) \} dx_H dy_H \quad (1)$$

式中 S 为积分平面,即全息面。实际上,为提高计算效率,常转换到波数域中计算:

$$P(k_x, k_y, z) = P(k_x, k_y, z_H) G_D(k_x, k_y, z - z_H) \quad (2)$$

式中: $P(k_x, k_y, z)$, $P(k_x, k_y, z_H)$ 分别为声压 $p(x, y, z)$ 和全息面声压 $p(x_H, y_H, z_H)$ 的二维连续傅里叶变换; $G_D(k_x, k_y, z - z_H)$ 为格林函数 $g_D(x - x_H, y - y_H, z - z_H)$ 的二维空间的连续傅里叶变换。

对式(2)两边同时做二维傅里叶逆变换,可将波数域中的声压转换到空域中,声场声压分布为

$$p(x, y, z) = F_x^{-1} F_y^{-1} [P(k_x, k_y, z)] = F_x^{-1} F_y^{-1} [P(k_x, k_y, z_H) G_D(k_x, k_y, z - z_H)] \quad (3)$$

当重建面的位置为 $z_s \leq z < z_H$ 时,即进行声场逆向重构(当 $z = z_s$ 时成为声源面的重构)。此时,定义逆向传递因子:

$$g_D(x - x_H, y - y_H, z - z_H) = F_x^{-1} F_y^{-1} [G_D^{-1}(k_x, k_y, z_H - z)] \quad (4)$$

则有逆向传递因子

$$G_D(k_x, k_y, z - z_H) = G_D^{-1}(k_x, k_y, z_H - z) \quad (5)$$

为正向格林函数的逆。

式(2)的重建公式变形为

$$P(k_x, k_y, z) = P(k_x, k_y, z_H) G_D^{-1}(k_x, k_y, z_H - z) \quad (6)$$

由式(6)可见,通过逆向重构可求得声源面的声压分布,从而判断声场中声源中心的位置,完成对主要噪声源的定位。从全息算法中也可看出格林函数作为声场的传递函数,是声场重构的枢纽。分析格林函数的傅里叶谱获取方法对提高重构精度有着重要意义。本文研究的是声源定位,所以,文中无特殊说明,都是指逆向重构问题。

2 近场声全息中格林函数谱的获取方法

2.1 实空间抽样格林函数

在 Dirichlet 边界条件下,格林函数连续的理论表达式为

$$g_D(x, y, z) = \frac{d_z (1 - jkR) e^{jkR}}{2\pi R^3} \quad (7)$$

式中: $d_z = |z - z_H|$ 为重建面与全息面的距离,逆向重构时, $d_z = z_H - z$; $R = [(x - x_H)^2 + (y - y_H)^2 + (z - z_H)^2]^{\frac{1}{2}}$ 为空间重建点到全息面上点的距离。

实空间抽样格林函数是指在实空间中,以等间隔 $\Delta x, \Delta y$ 对空间上进行离散取值,并认为每个积分子块上格林函数采样值为常数。用子块的中心坐标处的格林函数值 $g_D(x_{m_0}, y_{n_0}, d_z)$ 作为平均值来近似计算 $g_D(m, n, d_z)$,令实空间抽样格林函数记为 $g_s(m, n, d_z)$,可表示为

$$g_s(m, n, d_z) = \iint_{\Delta S} g_D(x - x_H, y - y_H, d_z) dx_H dy_H = \iint_{\Delta S} g_D(x_{m_0}, y_{n_0}, d_z) dx_H dy_H = \Delta x \Delta y d_z \cdot \frac{(1 - jkR_0) e^{jkR_0}}{2\pi R_0^3} \quad (8)$$

其中,

$$R_0 = \sqrt{(m\Delta x)^2 + (n\Delta y)^2 + (z - z_H)^2} \quad (9)$$

式中: m, n 为在 x, y 方向上各离散点的序列号; ΔS 为在第 m, n 积分子块上的积分面积。式(8)是实空间抽样格林函数的离散表达式,是实空间中最简单的一种格林函数获取方式。将实空间离散序列值进行二维傅里叶变换后即得到格林函数傅里叶谱。

2.2 K-空间抽样格林函数

K-空间抽样格林函数是指在波数域中,对格林函数 $G_k^{-1}(k_m, k_n, z_H - z)$ 直接进行有限、离散处理得到二维的离散格林函数序列。在 Dirichlet 边界条件下,逆向重建时波数域格林函数为实空间格林函

数的二维傅里叶变换,即

$$G_k^{-1}(k_m, k_n, z_H - z) = e^{-jk_z(z_H - z)} \quad (10)$$

根据 Nyquist 采样定理,全息面上在 x, y 方向上空间采样间隔为 $\Delta x, \Delta y$, 此时,在波数域中不发生混叠的最高波数分别为

$$k_{x\max} = \pi/\Delta x \quad (11)$$

$$k_{y\max} = \pi/\Delta y \quad (12)$$

波数域中 k_x, k_y 方向的采样间隔分别为

$$\Delta k_x = 2\pi/2L_x \quad (13)$$

$$\Delta k_y = 2\pi/2L_y \quad (14)$$

处理后波数域中的离散序列为

$$\begin{cases} k_x = k_m \Delta k_x = k_m \cdot 2\pi/2L_x \\ k_y = k_n \Delta k_y = k_n \cdot 2\pi/2L_y \end{cases} \quad (15)$$

令 $G_k^{-1}(k_m, k_n, z_H - z)$ 表示 K-空间逆向重构时的抽样格林函数,将式(15)代入式(10),处理后波数域中的离散序列为

$$G_k^{-1}(k_x, k_y, z_H - z) = \begin{cases} e^{-jd_z \sqrt{k^2 - (k_m \Delta k_x)^2 - (k_n \Delta k_y)^2}} & (k_m \Delta k_x)^2 + (k_n \Delta k_y)^2 \leq k^2 \\ e^{d_z \sqrt{(k_m \Delta k_x)^2 + (k_n \Delta k_y)^2 - k^2}} & (k_m \Delta k_x)^2 + (k_n \Delta k_y)^2 > k^2 \end{cases} \quad (16)$$

式中 k_m, k_n 为离散序列号,均为整数。式(16)是在波数域中对格林函数进行离散抽样,直接得到格林函数的傅里叶谱。

3 多声源定位仿真结果及分析

3.1 双声源重构仿真定位

现设在水下空间中,有两个点声源 Q_1, Q_2 , 声源坐标分别为 $(1, 0, 0), (-1, 0, 0)$, 其中 Q_1 的声源源强度是 Q_2 的两倍,声源空间分布图如图 2 所示。全息测量平面大小为 $L_x = L_y = 4$ m, 声源频率 $f = 750$ Hz, 水中声速 $c = 1\,500$ m/s^[6-7]。首先采用实空间抽样获取格林函数的傅里叶谱。利用逆向全息重构式(6),重构声源面 $z_s = 0.2$ m 的声压分布,理论声压值分布如图 3 所示。

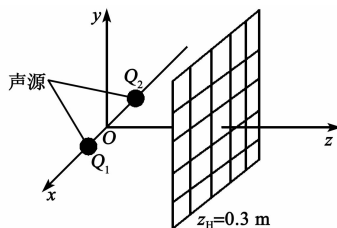


图 2 双声源空间位置分布图

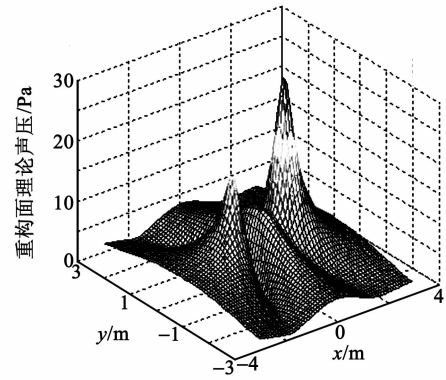
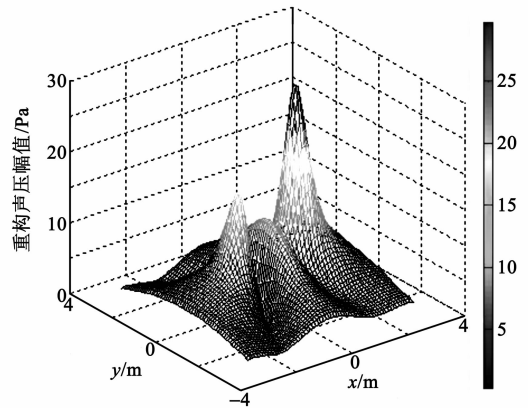
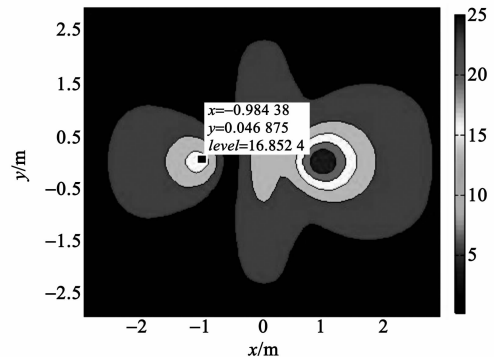


图 3 理论声压分布

首先通过利用实空间抽样格林函数获得格林函数的傅里叶谱,完成声场的逆向重构,重构声压的三维分布及声源声压云图如图 4 所示。



(a) 声压的三维分布

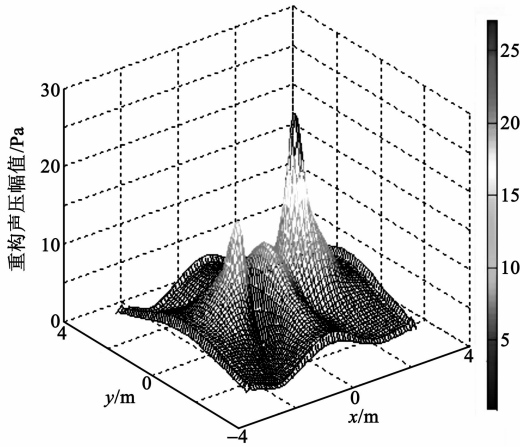


(b) 声压的分布云图

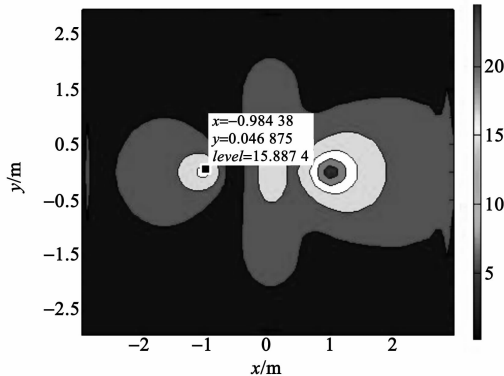
图 4 采用实空间抽样格林双声源逆向重构

采用 K-空间抽样格林函数,进行逆向重构对双声源的定位进行研究,声源面重建结果如图 5 所示。通过比较双声源的理论声压和重建声压幅值可以看出,不论是基于实空间抽样格林函数,还是 K-空间抽样格林函数都能对双声源进行准重构,完成高精度定位。由图 4、5 可知,两点声源的主峰位置误差不超过 5 cm,说明声源定位精度高;且经过全息重

构后,声源 Q_1 的主峰声压值较 Q_2 的也是成比例对称。因此,基于实空间抽样格林函数和 K-空间抽样格林函数对水下双声源定位与预设的参数相比,重建精度较高,能满足定位要求。



(a) 声压的三维分布



(b) 声压的分布云图

图 5 采用 K-空间抽样格林双声源逆向重构

3.2 多声源重构仿真定位

在对实际设备或机械装置进行主要的噪声源定位时,其声源个数往往是多个,构成体声源。仅对双声源进行声源定位无法满足实际需要。如何从多个声源中成功分辨声源位置也是现实中必须解决的实际问题。

现假设水下自由空间有 9 个点声源,两两声源间隔 2 m,均匀分布在空间中, $L_x=L_y=8$ m,声源位置空间分布图如图 6 所示。其中,除 Q_1, Q_2 外,其余所有的声源强度均相等,且 Q_1 和 Q_2 声源强度分别是其他声源强度的 2 倍和 3 倍,其他参数与上述双声源一致。现分别采用实空间抽样格林函数和 K-空间抽样格林函数的方法获取格林函数的傅里叶谱,继而完成对多声源的声场进行声源逆向重构。

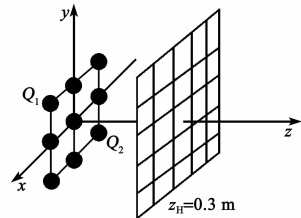


图 6 多声源空间位置分布图

对 $z_s=0.2$ m 声源面重建,其理论声压幅值分布如图 7 所示。采用实空间抽样格林函数进行非等幅多声源的仿真定位研究,重建获取声压幅值的三维分布如图 8 所示。

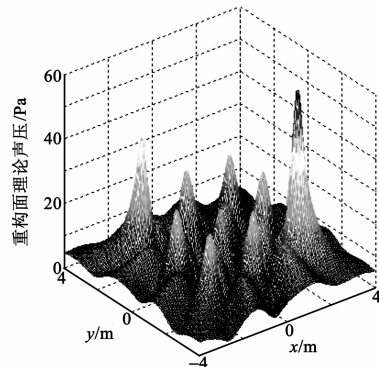
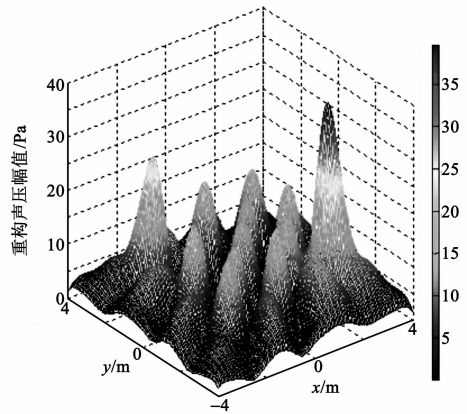
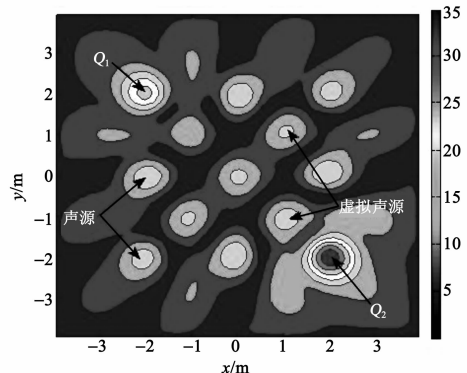


图 7 非等幅多声源理论声压分布



(a) 声压的三维分布



(b) 声压的分布云图

图 8 采用实空间抽样格林函数的逆向定位

现在对上述声源模型,采用 K-空间抽样格林函数对非等幅多声源进行定位研究,其声源面的逆向重构结果如图 9 所示。

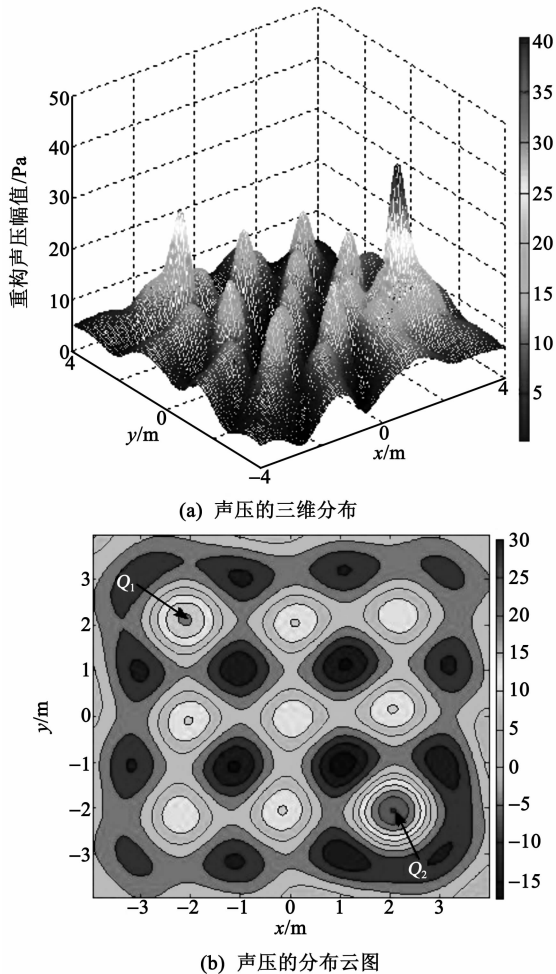


图 9 K-空间抽样格林函数非等幅多声源的逆向重建

由图 8、9 基本可看出声源主峰位置,且与预设的声源强度一致。但对比图 8、9 的声压云图可见,基于实空间抽样获取格林函数傅里叶谱进行逆向重构定位时,虽能勉强分辨出声源的位置,但因多个声源间的相干产生的虚拟声源已严重影响了声源的定位。而采用 K-空间抽样格林函数时进行逆向重构时,声源的中心位置依然清晰可辨,准确度较高。

这说明基于 K-空间抽样格林函数对于声源逆向定位有较强的鲁棒性,不受虚拟声源的影响,相较于实空间抽样格林函数,其更适用于多声源的定位研究。

4 结束语

格林函数作为近场声全息技术重构算法的枢纽,准确获取其傅里叶谱极其重要。本文针对现有的格林函数傅里叶谱的获取方法进行了详细推导说明,说明其角谱获取方法的不同。以水下多声源的逆向定位为研究背景展开研究,通过仿真对双生源和非等幅多声源通过逆向重构对声源中心位置进行定位。由此可以发现,基于 K-空间抽样格林函数较实空间抽样格林函数在进行逆向定位时更有效,对多声源之间相干产生的虚拟声源具有明显的抗干扰能力,可为噪声源定位、减振降噪、故障诊断等应用提供理论支撑和技术保证。

参考文献:

- [1] 蒋伟康,万泉. 近场声全息理论与应用的研究现状与展望[J]. 机械强度,2005,27:288-295.
- [2] 陈心昭,毕传兴. 近场声全息技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社,2013.
- [3] WILLIAMS E G, MAYNARD J D, SKUDRZYK E. Sound source reconstructions using a microphone[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68 (1): 340-344.
- [4] WILLIAMS E G, MAYNARD J D. Numerical evaluation of rayleigh integral for planar radiators using the FFT[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1983, 72(6): 2020-2030.
- [5] 马佳楠. 格林函数在平面近场声全息技术中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [6] 唐波. 基于平面近场声全息的声对接关键技术研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2011.
- [7] 陈晓东. 近场平面声全息的测量和重构误差研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004: 39-49.