

基于声场预报的共形体积阵散射特性分析

戴言, 孙超

(西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要:针对刚性障板引起的声散射现象导致的共形体积阵阵列流形偏离理想值这一问题,以一类特殊形状的共形体积阵——半圆柱体积阵为模型,运用声场预报方法,分析了刚性障板引起的散射现象对阵列接收响应的影响。通过声场建模仿真,计算了不同角度下共形体积阵的声场分布;利用该分布构建了考虑刚性障板影响的基阵阵列流形,分析了其在散射声场影响下的变化规律,该变化规律采用文中定义的2个物理量描述:幅度相位构成的一阶响应和互相关构成的二阶响应。仿真结果表明,相较于理想条件下的透声模型,体积阵阵列接收到的由障板等刚性物体产生的散射声信号随方位、信噪比的不同而变化,进一步导致各个阵元的接收响应出现随方位变化而变化的偏差。通过对实验数据的分析,验证了仿真结果与实际情况基本吻合;在实际中设计这类基阵时,应该考虑散射现象对其阵处理性能的影响。

关键词:共形体积阵;声场预报;散射特性

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2022)03-0568-08

共形体积阵(下文简称“共形阵”)是在标准形状的体积阵(例如球形阵列和柱面阵列)基础上,为了适应搭载平台的外形与运动特性而发展出来的一类具有特定形状的体积阵。这类基阵在实际使用中,当声波辐射到基阵表面时,航行器自身的结构,例如用于安装基阵的障板或航行器外壳,会在水听器接收外界信号时反射入射的声波,这些声信号会和声源发出的信号混在一起被基阵所接收,从而对阵列信号的接收产生较大影响,尤其是导致阵列流形这一物理量偏离理想值,造成后续信号处理方法性能严重下降。

在自由空间中,共形阵阵列仅由离散的点阵元组成,基阵的阵列流形可以通过解析表达式计算^[1]。然而基阵的水听器在实际中会安装在刚性障板上,障板对入射声产生的非均匀散射会对基阵接收产生重要影响。Queen^[2]分别推导了离散与连续的柱面阵指向性的表达式,Bertilone等^[3]分析了柱面障板对体积阵阵增益的影响。一方面,这些方法的研究对象是规则几何体甚至是理想化的无限长

柱体,另一方面这类方法在实际情况中计算量较大,往往得不到积分方程的闭式解。杨益新和唐建生等^[4-5]针对实际阵列模型与理想阵列模型失配的问题,提出通过水下实验测量的方法修正这类误差。该方法不用考虑具体阵型结构,不仅可以消除阵列流形的失配,还可以改善后续波束形成方法的性能。但是实验所用的共形阵制作成本高昂,同时该方法十分费时费力,且需要保证测量精度。

近年来出现了利用声场建模进行声场预报的方法。何正耀等^[6]用边界元方法给出了发射换能器各阵元的指向性及基阵的波束指向性。蒋伟等^[7]计算任意散射体表面声场分布,求出基阵阵元位置处声场响应,进而得到基阵阵列流形。杨博等^[8]对安装在半球形障板上的14元圆弧共形阵进行了仿真计算,并进行了实验验证。然而,以上的研究和方法旨在获取符合实际情况的阵列流形,只是简单地将散射声信号作为实际阵列响应的“误差”,并没有分析散射声场的变化规律。基阵接收到的散射声信号在数学上也可以表示成类似方向向量(stearing

收稿日期:2021-09-03

作者简介:戴言(1992—),西北工业大学博士研究生,主要从事水声阵列信号处理研究。

通信作者:孙超(1965—),女,西北工业大学教授,主要从事水声工程研究。e-mail:csun@nwpu.edu.cn

vector,SV)形式,与入射信号的方向向量线性组合,共同组成实际基阵在任意方向的方向向量。因此,研究散射特性对基阵阵列接收响应的具有重要意义。

针对已有研究的不足,以一安装在半圆柱形状的40元共形阵为研究对象,通过声场仿真软件,建立了基阵的离散化模型。通过声场计算得到了包含散射声在内的共形阵阵列接收响应,分别定义了散射信号的“一阶响应”与“二阶响应”,分析了二者随方位、信噪比的变化规律,最后,利用水池实验数据,与仿真计算得到的结果进行了对比。

1 任意基阵阵列流形的获取方法

1.1 理想模型的阵列流形

现考虑由 M 个各向同性阵元组成的任意结构三维基阵,接收位于远场的信号源辐射的平面声波,如图1所示。

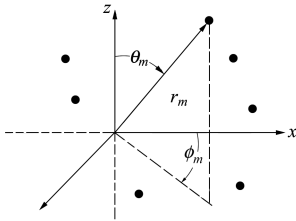


图1 任意阵列的坐标示意图

假定阵元 $m(m = 1, 2, \dots, M)$ 的位置坐标可表示为

$$\mathbf{P}_m = (P_x, P_y, P_z)^T = (r_m \sin\theta_m \cos\phi_m, r_m \sin\theta_m \sin\phi_m, r_m \cos\theta_m)^T \quad (1)$$

式中: θ_m 为阵元位置处的俯仰角; ϕ_m 为方位角; r_m 为阵元 m 到坐标原点的距离。

由此可得任意阵列的关于某一方向的理想方向向量为

$$\mathbf{a}(\mathbf{k}, \theta, \phi) = \begin{bmatrix} e^{-j\omega\tau_0} \\ e^{-j\omega\tau_1} \\ \vdots \\ e^{-j\omega\tau_{M-1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-jk^T \mathbf{P}_0} \\ e^{-jk^T \mathbf{P}_1} \\ \vdots \\ e^{-jk^T \mathbf{P}_{M-1}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{k} = \frac{\omega}{c} \mathbf{u} = [\sin\theta \cos\phi, \sin\theta \sin\phi, \cos\theta]^T$ 为平面波的波数向量。显然,方向向量满足 $\|\mathbf{a}\|_2^2 = M$ 。计算基阵各阵元对不同方向入射平面波信号的方向向量,由这些方向向量组成的矩阵称为基阵的阵列

流形矩阵。

在以上阵列流形计算中,对基阵接收信号模型的讨论都基于理想阵列模型的假设,即:基阵所有阵元各向同性,对来自不同方向的信号响应相同;基阵架、障板等构成阵列的结构也不会对各阵元的接收信号产生影响;各阵元通道对信号的幅度增益相同,且不考虑各通道的相位误差。下一小节本文将介绍一种利用有限元方法,通过仿真计算共形阵表面声场进而得到阵列流形的方法。

1.2 获取共形阵阵列流形的数值方法

由基阵架、障板等刚性体和水听器组成的基阵所接收到的声波不仅包括远场声源直接入射的声波,还包括基阵障板散射、绕射产生的声波,水听器的幅相响应并不与理想的透声模型的响应保持一致,需要进行具体计算。安装在任意形状障板上的基阵阵列示意图如图2所示。

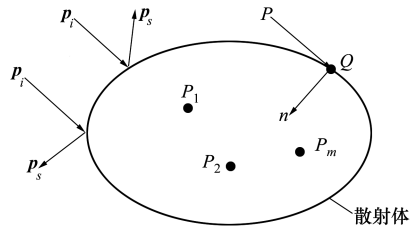


图2 任意形状障板上的基阵示意图

当基阵阵元即水听器安装在基阵架或障板上且阵元大小相对于基阵本身很小,并且安装在基阵壳体表面时,可将阵元(即水听器)与基阵架或障板视为一个散射体。其中, $\mathbf{P}_m(m = 1, 2, \dots, M)$ 为水听器基阵中 M 个阵元的位置, P 为空间中任意一点, Q 为散射体表面上的任意一点, r 为 P, Q 两点之间的距离。 \mathbf{p}_i 和 \mathbf{p}_s 分别表示入射声波和散射声波。当基阵接收到来自远场某方向的入射平面波时,散射体表面任意一处的声场 \mathbf{p} 可表示为入射声场和散射声场的叠加,即

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_i + \mathbf{p}_s \quad (3)$$

叠加后的声场满足均匀理想媒介中的标准线性波动方程,即

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (4)$$

当接收阵位于自由场中且密度为常数时,假设散射体是刚性的,则受绝对硬边界条件约束

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

结合公式(3)~(5),可以得到散射体表面的声场分布的解析解。然而针对以上问题,目前能较好解决的仅限形状规则的散射体,例如圆球圆柱等,具体算法可参考文献[9]。对于一般形状的散射体,处理声波的散射在数学上是非常困难的。所以需要借助有限元计算软件对散射体进行建模,然后求解离散化的模型,获得基阵的声场分布数值解,进而得到基

阵的方向向量。

1.3 声场仿真建模流程

为进一步说明数值计算过程,图 3 展示了本文所研究的共形阵的结构示意图。该共形阵为一半圆柱形的体积阵,图 3a)中黑色实心点标注了安装在共形阵上的水听器位置,图 3b)~3c)标注了阵列的几何尺寸。

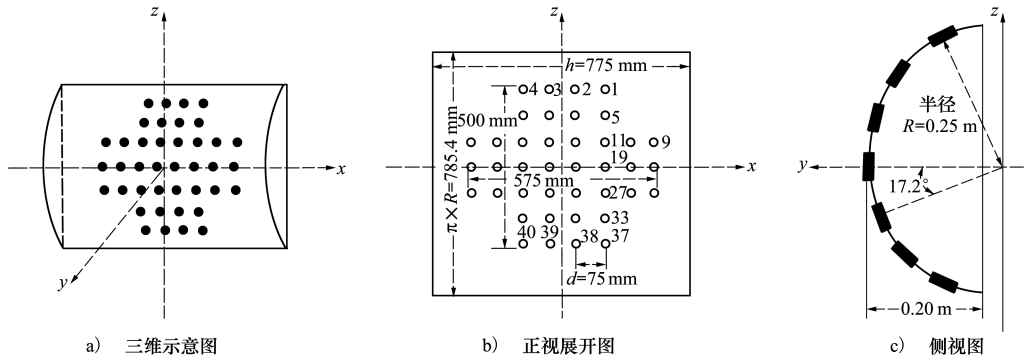


图 3 半圆柱共形阵模型示意图

根据图 3 所示的几何模型,本文利用 COMSOL Multiphysics(以下简称 COMSOL)软件对该共形阵进行建模。下面简要介绍建模的步骤:

第一步,根据图 3 的共形阵物理模型在 COMSOL 中构建几何模型。由于 COMSOL 是基于有限元的仿真软件,所以模型必须为封闭空间,需要在几何模型外侧定义完美匹配层。该层的作用是使入射波无反射地穿过分界面而进入该层,而外层边界设置声学量为零,将辐射边界的声能量完全吸收。此时的声场模型如图 4 所示。

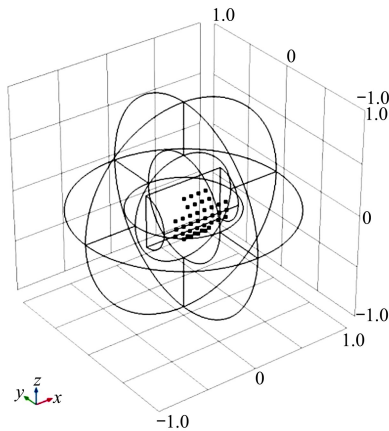


图 4 COMSOL 共形阵几何模型示意图 (外层球状层为完美匹配层)

第三步,将该网格模型置于 COMSOL 中的压力声学的频域模块中,设置硬边界条件、定义环境参数以及平面波的入射方位与声强。

第四步,在几何模型的基础上构建网格模型,网格最大单元尺寸不应超过入射波波长的 1/6,其结果如图 5 所示。从图中可以看到,真实的共形阵模型已经被离散化为网格模型,简化了求解的难度,方便进行声场的分析,以上过程的流程图如图 6 所示。

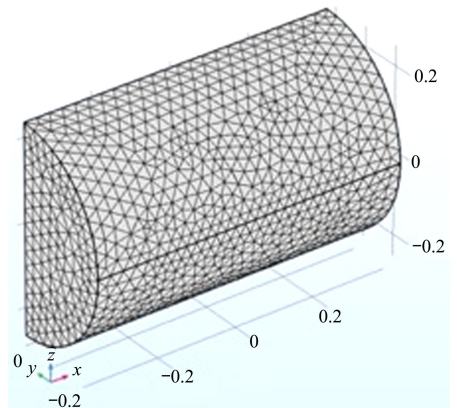


图 5 共形阵网格模型示意图

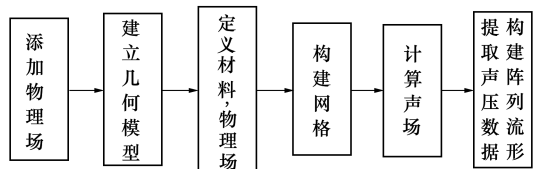


图 6 COMSOL 流程图

第二步,定义共形阵及其周围介质的材料属性。

2 散射声特性仿真分析

2.1 散射声场特性分析

根据上一节有限元模型,利用 COMSOL 软件进行声场计算。图 7a)~7c) 给出频率为 9 000 Hz 的平面波沿基阵水平面正横方向入射共形阵时,共形阵表面的背景压力场、散射压力场、总声压场的

分布。

由图 7a)可知,当自由空间中仅存在入射波时,共形阵表面的入射方向上的声场形成等间距的周期性条纹。等间距表明入射声波的幅值变化均匀,即相位也经历同样的变化,入射声波服从平面波变化规律。周期性指明了入射声波的频率。图 7b)则反映了共形阵表面散射声压的分布。

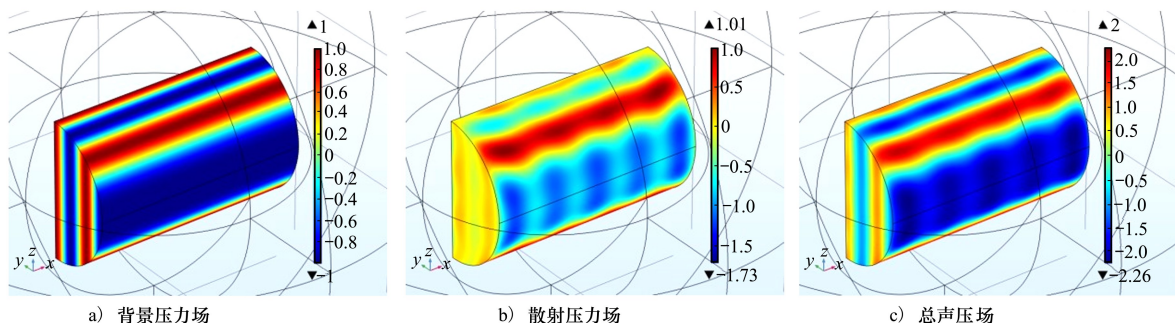


图 7 共形阵声压场

2.2 散射声一阶响应特性

组成阵列流形的各个方向的方向向量在数学上由两部分组成:方向向量的幅度响应与相位响应。图 8 给出了不同方向的平面波沿水平面(xoy 平面)入射到共形阵时,各个阵元接收的散射声压与入射声压的幅度响应。图 9 给出了不同方向的平面波沿水平面(yoZ 平面)入射到共形阵时,各个阵元接收的入射声压与散射声压的相位响应。图 8b)反映了理论上各水听器的幅度响应保持一致(为“1”),而图 8a)则反映了针对同一个阵元,其散射声压幅值出现起伏;不仅如此,在某一方面上,不同阵元的幅值响应也并不保持一致。总的来说,散射声的幅度

响应在水平方向上会随角度的变化出现亮色条纹,并且在靠近共形阵两端端射方向的一小片区域,散射声压的幅度响应很低,导致散射声与入射声叠加后,端射方向附近的幅度响应较整体偏低,实际中可能会存在信号接收的“盲区”,非“盲区”的范围大致为 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 。

通过图 9 可以看出,共形阵水听器接收到的叠加了散射声信号的声压相位响应,与仅存在入射平面波时的理想情况下的声压相位响应几乎没有区别,接收到的散射声压对原入射平面波声场的声压相位响应几乎没有影响。

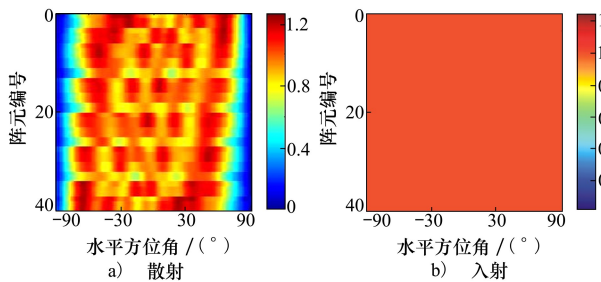


图 8 散射声压幅度响应和入射声压幅度响应

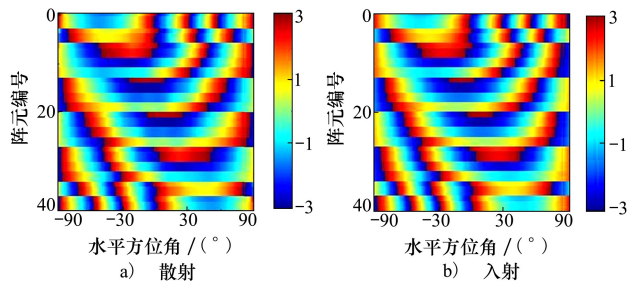


图 9 散射声压相位响应和入射声压相位响应

2.3 散射声二阶响应特性

散射声的互相关特性对接收信号协方差的结果

具有重要影响,在分析二阶响应特性之前,首先给出对本文中归一化互相关矩阵的定义。

现对基阵接收到的水平面上的数据做如下处理:取阵列流形的每一列(即不同角度的阵列流形),可以得到如下表达式

$$\hat{\mathbf{R}}_i = \hat{\mathbf{a}}_i \hat{\mathbf{a}}_i^H \quad i = 1, 2, \dots, 181 \quad (6)$$

式中: i 为各个方向上阵列流形的编号; $\hat{\mathbf{a}}_i$ 为仿真计算得到的阵列流形,其中包含了入射信号与散射信号两部分。对该矩阵的每个元素进行归一化,对这些矩阵取模值,使其分布在 $[0, 1]$ 之间,定义阵列流形的归一化互相关矩阵,其中的元素表示为

$$r_{mn}^i = \frac{\hat{r}_{mn}^i - \min(\hat{r}_{mn}^i)}{\max(\hat{r}_{mn}^i) - \min(\hat{r}_{mn}^i)} \quad i = 1, 2, \dots, 181, m, n = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

式中, \hat{r}_{mn}^i 表示从 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 之间每隔 1° 按顺序排列的第 i 个方向向量根据公式(6) 计算得到的矩阵中的任意元素, $\max(\hat{r}_{mn}^i)$ 和 $\min(\hat{r}_{mn}^i)$ 分别表示该矩阵所有元素中的最大值与最小值。

接下来给出部分角度上的互相关结果,如图 10 所示。从图 10 中可以看出,实际共形阵接收的声信号包含直达和散射两部分,两部分声信号相互作用,导致各个阵元在不同角度接收的信号响应发生变化,产生了图 10 所示的结果。从图中可以观察到,当存在散射声信号时,不同阵元之间的相关系数出现了“条纹状”的差异分布,这种差异同时随入射角的变化而变化,出现了有的阵元之间相关系数大,有的阵元之间相关系数小的现象。同时,这种“条纹状”图形沿矩阵的主对角线对称,并且由于使用的共形阵阵元排布沿共形阵正横方向对称,所以相对于基阵的对称角度,会出现形状相似,但分布差异的对称“条纹”图案。

考虑在实际使用时,基阵不可避免地会接收到来自环境的噪声,若某一方向存在一入射信号,此时基阵接收的信号的协方差矩阵可以表示为

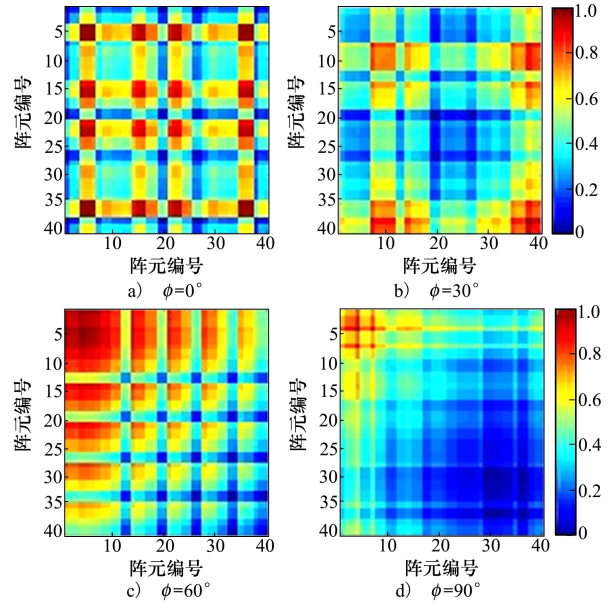


图 10 不同角度上二阶互相关特性的分布

$$\hat{\mathbf{R}} = \hat{\mathbf{R}}_i + \hat{\mathbf{R}}_n = \sigma_s^2 \hat{\mathbf{a}}(\theta, \phi_i) \hat{\mathbf{a}}^H(\theta, \phi_i) + \sigma_n^2 \mathbf{nn}^H \quad (8)$$

式中: σ_s^2 代表信号的功率; $\hat{\mathbf{a}}(\theta, \phi_i)$ 代表入射信号的方向向量,此时规定俯仰角 $\theta = 90^\circ$; \mathbf{n} 表示阵列接收到的噪声向量。当背景噪声为高斯白噪声时, $\hat{\mathbf{R}}_n = \sigma_n^2 \mathbf{I}$ 。设置不同的信噪比,并对接收信号协方差矩阵做公式(7) 相同的处理,结果如图 11 所示。从图 11 可以看出,在信噪比较低时,噪声功率较强,由于各个阵元上的噪声信号互不相关,所以协方差矩阵非对角线上的元素很小,对角线上的自相关系数较大,真实地反映了低信噪比下噪声与信号的能量关系。随着信噪比的增大,“条纹”现象逐渐明显,虽然此时对角线的元素值依旧较大。当信噪比增加到 20 dB 时,图 11c) 的结果已经和图 10a) 的结果十分接近了。综合图 10~11,实际共形阵散射声信号的存在改变了理想声透明共形阵接收信号协方差矩

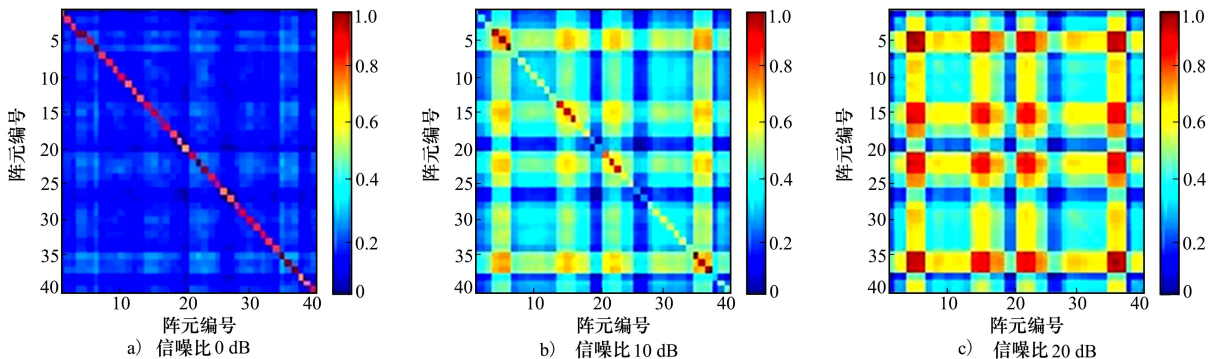


图 11 不同信噪比下的接收信号协方差矩阵的模值分布

阵的结构,在实际使用时需要适当地考虑这种特殊的性质。

3 利用水池实验数据验证数值分析结果

利用水池实验数据验证在真实情况下的共形阵的散射特性。实验发射声源与接收水听器基阵在同一平面上,距水面 2 m,声源与基阵相距 11.1 m。在实际测量过程中,声源发射频率为 9 kHz 的单频信号,采样频率为 48 kHz。采用 3° 步进,基阵采集到某方向入射的一组信号后,改变信号源入射信号的方向,实际操作通过转台转动基阵以改变信号源信号入射的相对角度。

取其中对应 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 的 61 个角度与仿真结果进行对比。图 12 分别给出了声场仿真与实验获取的任意 2 个阵元(21 号与 37 号)的一阶接收特性的幅度响应与相位响应,阵元的位置编号如图 3b) 所示。

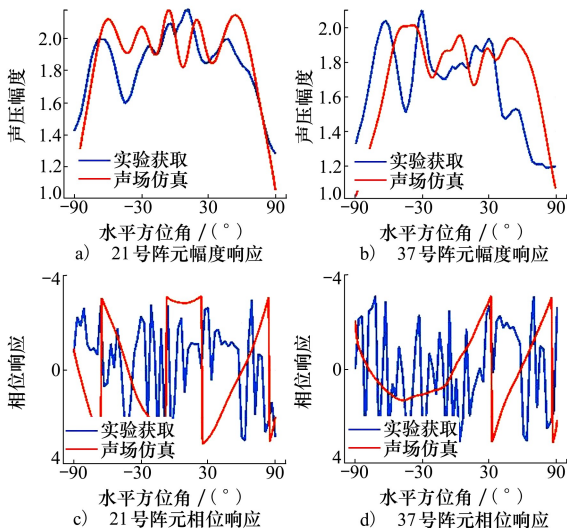


图 12 不用阵元间声场仿真与实验测量的结果对比

从图 12a) ~ 12b) 可以看到,2 种条件下,21 号阵元在不同方位上的声压幅度响应变化趋势整体上保持一致。21 号阵元位于几何体中心位置附近,靠近正横方向的方位声压幅度较大,但局部存在波动;而在端射方向附近声压幅值急剧下降,此时障板的遮挡作用明显。37 号阵元位于阵列的边缘部位,可以看到 2 种条件下,声压的幅度响应虽然整体趋势与 21 号阵元相差不大,但实验获取方法与声场仿真

方法的结果在局部的某些方位出现了明显的偏差。造成二者数值出现差异主要是因为实验测量误差造成的,这种差异是可以被允许的。这种误差在相位响应的结果上体现的十分明显。在图 12c) ~ 12d) 中,实验方法获取的阵列相位响应在 2 个阵元上均出现剧烈的波动,造成这种现象的原因是在实验中水听器会接收来自外界的噪声,虽然信噪比很高,不会对幅度响应产生较大影响,但噪声产生的随机相位会导致相位响应与仿真结果不符,而仿真中模型空间内除发射信号外不存在任何其他信号。综上所述,阵元上的一阶幅度响应的实验结果与仿真结果基本吻合,而相位响应则误差较大。

图 13 给出了在 0° 方向上共形阵阵列的 40 个阵元的一阶接收幅度与相位响应,阵元位置编号仍由图 3b) 给出。

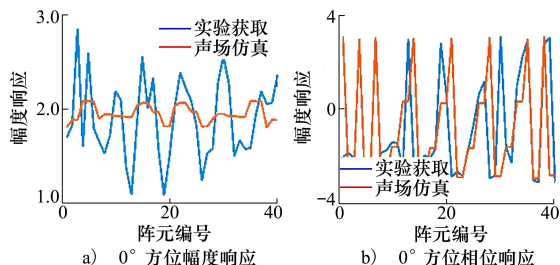


图 13 不同方位上声场仿真与实验测量的结果对比

从图 13a) 中可以发现,实验获得与声场仿真的结果在不同阵元上的起伏变化趋势是保持一致的。二者的区别是实验获取的结果数值上起伏很大,说明实验获取的幅度响应结果受实验条件因素影响较大,导致方差较大,相比声场仿真结果误差更大。相比较幅度响应,阵元的相位响应如图 13b) 所示。可以发现,除了前 10 个阵元以外,剩下的阵元在该角度的相位响应在 2 种条件下的变化趋势基本保持一致,但整体较声场仿真结果出现了偏移。这说明除了噪声因素外,基阵各个阵元通道的幅度或相位响应均出现了差异(如前 10 个水听器)也是造成实验与仿真结果不一致的原因之一,这种误差在实际中也是需要考虑的一个因素。

接下来对比共形阵二阶接收特性响应,图 14 给出了实验获取的共形阵二阶接收特性随方位的变化图。对比图 10~11 与图 14,可以发现,总体来看,接收特性的二阶响应在不同方位的变化规律在实验与仿真条件下是吻合的,实验中阵列的接收响应会受到散射声波的影响,接收到的信号的二阶互相关矩

阵仍会有“条纹”状的分布,但不论是数量上还是具体的数值大小上,实验获取的互相关“条纹”分布更稀,能量更低,就图 14 而言,图 14b) ~ 14d) 中均有一“十字暗带”,与周围的互相关响应形成对比,说明这里的互相关响应很低。而在具体对应的角度上可以观察到,某些角度例如 60°,较仿真的结果它们的变化起伏更低,条纹更浅。结合之前的分析,可能

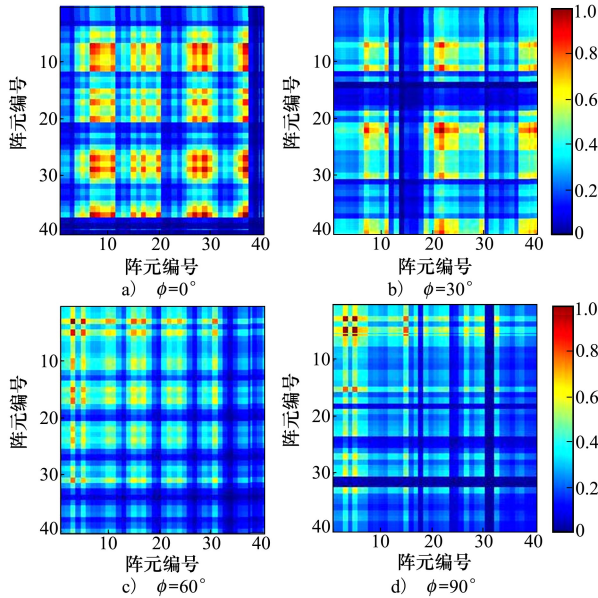


图 14 不同角度的实测数据二阶互相关响应特性

是由于以下因素导致的:①受噪声影响接收信号信噪比较低,引起了互相关特性整体较声场仿真的结果变化起伏更小,出现类似图 11 的结果;②由图 12 ~ 13 观察可知,通过实验测量得到的一阶幅度与相位响应,在不同程度上均出现了测量结果方差过大,数据起伏明显的情况。根据上文互相关的计算公式,幅度和相位响应起伏过大,会导致在计算互相关时,原本互相关强的地方愈强,而弱的地方则愈弱,便出现图 14 中互相关特性强弱变化不均匀的情况。

综合以上实验结果,通过实验获取的阵列接收

响应特性与通过声场仿真获取的阵列接收特性在总体上具有相同的变化趋势。散射声信号会导致阵列的幅度与相位响应随发射信号的空间位置与接收阵元的空间位置的变化而变化,同样地,二阶接收响应特性因散射信号分布点变化而在互相关矩阵中产生了深浅相间的“条纹”分布。然而也能明显地观察到,在某些阵元或者方位上,实验结果与仿真结果差异较大,具体的原因可以归纳为:共形阵的水听器通道误差,仿真建模理想化了接收环境,而实际中存在实验测量误差,以及噪声不可避免地影响了散射信号的接收。

4 结 论

本文以一 40 元共形阵为研究对象,运用声场预报方法,利用有限元软件 COMSOL 对该半圆柱阵进行物理建模,模拟实际接收环境,分析了考虑障板影响的基阵的各个方位的接收响应,即本文所定义的一阶特性响应和二阶特性响应。仿真结果表明,受障板影响后,一阶特性幅度和相位响应在不同方位均有变化,尤其在接近端射方向的方位附近,由于障板遮挡,导致该区域散射信号急剧减弱,幅值明显降低。进一步研究了阵列的二阶接收响应特性(互相关特性),实际中接收信号协方差矩阵出现了强弱相间的“条纹”,“条纹”的变化受方位、信噪比等因素的影响。最后利用水池实验数据,与仿真结果进行了对比。虽然实测数据与仿真数据存在一定误差,但总体来说由实测数据得到的阵列的一阶响应特性和二阶响应特性与仿真结果较为接近,具有相同的变化趋势。在实际使用这类基阵的过程中,应当考虑这类散射现象对信号接收声场的影响。在未来的工作中,将针对利用共形阵散射特性提高波束形成阵处理性能的问题,展开进一步的研究。

参考文献:

[1] 鄢社峰. 优化阵列信号处理(上册): 波束优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2018
YAN Shefeng. Optimal array signal processing: beamforming design theory and methods[M]. Beijing: Science Press, 2018 (in Chinese)

[2] QUEEN C W. The directivity of sonar receiving arrays[J]. The Journal of the Acoustical Society, 1996, 47(3): 711-720

[3] BERTILONE C D, KILLEEN S D, BAO C. Array gain for a cylindrical array with baffle scatter effects[J]. The Journal of the Acoustical Society, 2007, 122(5): 2679-2685

[4] 杨益新, 孙超, 鄢社峰, 等. 圆阵宽带恒定束宽波束形成的实验研究[J]. 声学学报, 2003, 28(6): 505-508
YANG Yixin, SUN Chao, YAN Shefeng, et al. Experimental studies on broadband constant beamwidth beamforming for circular

- arrays[J]. *Acta Acustica*, 2003, 28(6): 505-508 (in Chinese)
- [5] 唐建生, 孙超, 杨益新. 时域宽带恒定束宽波束形成的实验研究[J]. *应用声学*, 2005, 24(4): 233-238
TANG Jiansheng, SUN Chao, YANG Yixin. Experimental study on time domain wideband beamforming with constant beamwidth [J]. *Applied Acoustics*, 2005, 24(4): 233-238 (in Chinese)
- [6] 何正耀, 马远良. 水声共形阵辐射指向性计算方法及其实验验证[J]. *声学学报*, 2007, 32(3): 270-274
HE Zhengyao, MA Yuanliang. Directivity calculation with experimental verification for a conformal array of underwater acoustic transducers[J]. *Acta Acustica*, 2007, 32(3): 270-274 (in Chinese)
- [7] 蒋伟, 杨益新, 马远良. 带障板水听器基阵阵列流形的边界元计算及验证[J]. *声学技术*, 2007, 26(3): 357-361
JIANG Wei, YANG Yixin, MA Yuanliang. Calculation and verification of manifold of baffled hydrophone array based on boundary element method[J]. *Technical Acoustics*, 2007, 26(3): 357-361 (in Chinese)
- [8] 杨博, 孙超. 水听器基阵障板影响和阵列流形的边界元计算及实验验证[J]. *科学通报*, 2009, 54(22): 3441-3448
YANG Bo, SUN Chao. Calculation and verification of baffled hydrophone array manifold based on boundary element method[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(22): 3441-3448 (in Chinese)
- [9] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. *声学基础*[M]. 3版. 南京: 南京大学出版社, 2012
DU Gonghuan, ZHU Zhemin, GONG Xiufen. *Fundamentals of acoustics*[M]. 3rd ed. Nanjing: Nanjing University Press, 2012 (in Chinese)

Scattering characteristics analysis of conformal array based on sound field prediction method

DAI Yan, SUN Chao

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to study the problem that the array manifold of conformal arrays deviates from the ideal value due to the sound scattering caused by the rigid baffles of arrays, in this paper, the influence of the scattering phenomenon caused by the rigid baffle on the receiving response of array is analyzed by using sound field prediction method based on a conformal array-semi-cylindrical volume array. The sound field distribution of conformal array at different angles is calculated by using the sound field modeling and simulation. Based on the above distribution, an actual array manifold is constructed under consideration of rigid barrier, and its variation under the influence of scattered sound is analyzed. The variation is described by two physical quantities defined in this paper: the first-order response composed of amplitude and phase and the second-order response composed of cross-correlation. Simulation shows that compared with the ideal model, the scattered signals generated by rigid baffles on conformal array varies with the azimuth and signal-to-noise ratio(SNR), which further leads to the deviation of each hydrophone of conformal array. The experimental data verifies that the simulation results are basically consistent with the actual situation. The effect of the scattering on the conformal array should be considered when designing and performing in practice.

Keywords: conformal array; sound field prediction method; scattering characteristics

引用格式: 戴言, 孙超. 基于声场预报的共形体积阵散射特性分析[J]. *西北工业大学学报*, 2022, 40(3): 568-575

DAI Yan, SUN Chao. Scattering characteristics analysis of conformal array based on sound field prediction method[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2022, 40(3): 568-575 (in Chinese)