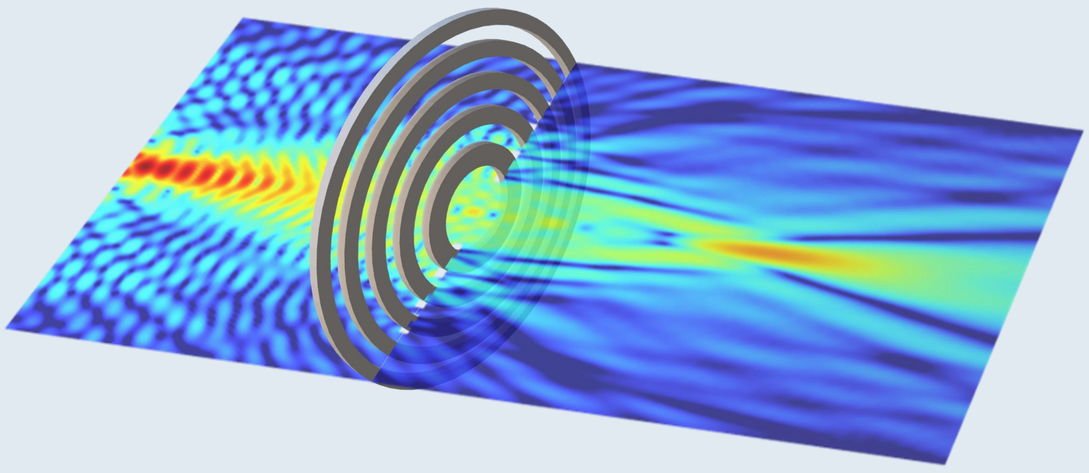


基于菲涅耳波带片聚焦特性的声源定位研究

仿真研究了菲涅耳波带片在声源离轴工况下的焦区声场分布规律，揭示了结构设计参数与入射角度对焦点偏移特性的影响机制，为其在工业巡检场景中被动式超声波源定位提供理论依据。

赵改清[1]，邹可涵[1]

[1]深圳大学物理与光电工程学院

摘要

菲涅耳波带片在声学领域作为一种超声器件，优秀的声聚焦性能使其在水下超声成像以及HIFU医学微创技术中得到广泛应用。但是目前针对菲涅耳波带片在空气中的聚焦特性以及应用研究仍然较少，本文基于COMSOL Multiphysics的压力声学模块，围绕菲涅耳波带片的聚焦性能，系统仿真分析了结构设计参数与声源偏轴工况对其焦区声场分布的影响。

在应用层面，将菲涅耳波带片转换为一种无需外部供能与算法重构的声学方位传感器，从而验证其在工业巡检场景中判断异常声源位置的可行性。仿真结果显示，当声源偏离波带片设计轴向时，在小角度斜入射工况下，焦斑在焦平面内径向偏移；在斜入射角度小于25度时，入射角正切值与焦点径向偏移量存在强线性相关。

在40kHz工作频率下，入射角分辨能力约为±20°，焦斑尺寸接近衍射极限。仿真结果证明了菲涅耳波带片可作为一类无需电源、无需算法训练的被动式声源定向器件，在窄带、稳态声源定位场景中具有应用潜力。

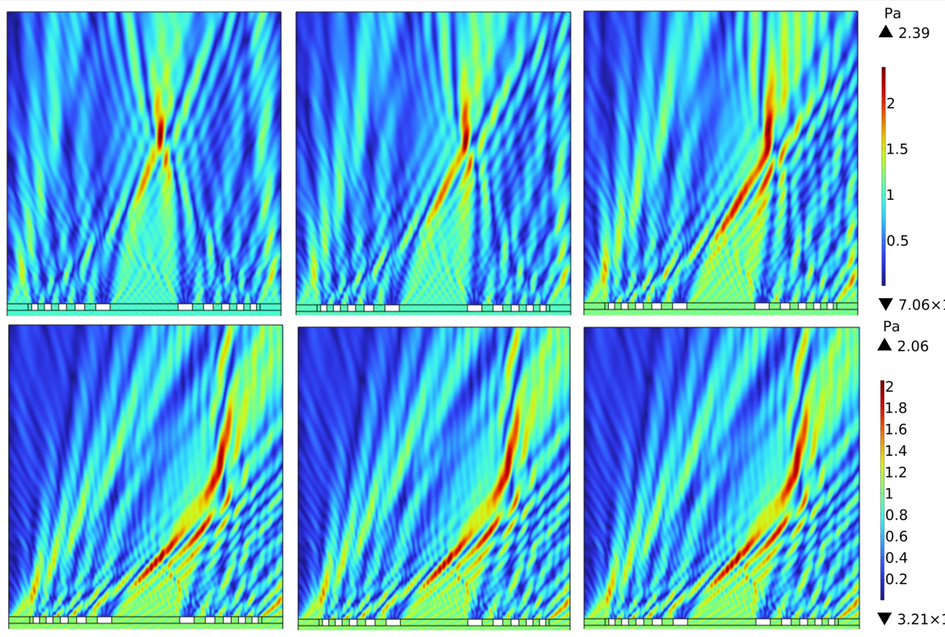


图1. 5°-30°斜入射工况下波带片离轴聚焦的仿真结果

方法

为探究超声波斜入射菲涅尔波带片时焦点的偏移情况，本研究使用了COMSOL“声学模块”中的“压力声学，频域”物理场接口。基于菲涅尔衍射原理，以及Calvo等人[1]的波带片环半径公式，在物理场中构建了菲尼尔波带片的二维仿真模型，通过求解亥姆霍兹方程得到计算域的声场分布。环半径计算公式如下：

$$r_n = \sqrt{n\lambda F + \left(\frac{n\lambda}{2}\right)^2} \quad (1)$$

其中，r_n为第n级环半径，λ为超声波长，F为设计焦距。仿真采用稳态求解器，参数化扫描波带片厚度以及环数；如图1，考虑到实际声源到波带片距离满足远场条件，因此通过平面声波斜入射进行模拟。

结果

经过参数化扫描，选定环数5，焦距0.21m，厚度2mm的菲涅尔波带片用于斜入射仿真探究焦点偏移量。利用COMSOL对偏移量Δx与入射角正切值$\tan(\theta)$的关系曲线进行绘制(如图2)。选取0° -25°斜入射下的焦点偏移量数据进行线性拟合得到公式如下：

$$\Delta x = 0.199\tan(\theta) + 0.003 \quad (2)$$

决定系数R^2为0.996，说明焦点偏移量与入射角正切值之间存在强线性相关性，且斜率值与设计焦距(f=0.21m)相近。结果表明，通过在焦平面测量焦点偏移量，可以结合公式(2)推算声波入射方向，入射角分辨能力约为±20°；拥有两个及以上波带片，或用一个波带片在不同位置进行测量时，计算菲涅尔波带片中心在不同测点的相对位置以及入射角，可通过几何关系推算声源的具体位置。

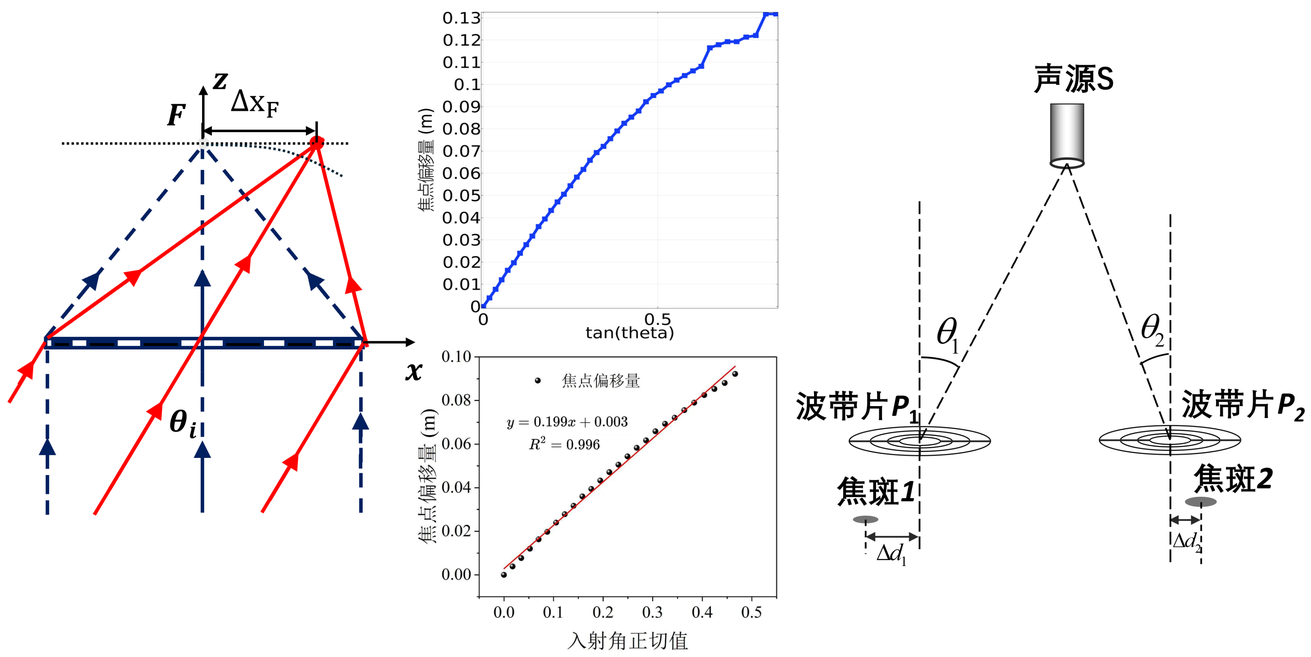


图2.不同入射角度下焦点偏移量的仿真计算结果展示以及声源定位原理图

参考文献

1. CalvoC D ,et al.Thin Fresnel zone plate lenses for focusing underwater sound[J].Applied Physics Letters,2015,107(1):014103.

2. Tiete J, et al. SoundCompass: A Distributed MEMS Microphone Array-Based Sensor for Sound Source Localization[J/OL] 2014, 14(2):1918-1949

深圳大学 SHENZHEN UNIVERSITY