【引用格式】张一弛，毋绍群，宋卓然，等. 基于 V 型嵌套阵的恒束宽波束形成方法[J]. 数字海洋与水下攻防，2025，8（5）：587-593.

# 基于 V 型嵌套阵的恒束宽波束形成方法

张一弛[1, 3]，毋绍群[1, 4]，宋卓然[1, 4]，桂晨阳[1, 2, 3, *]

（1. 哈尔滨工程大学 水声技术全国重点实验室，哈尔滨 150001；
2. 海洋信息获取与安全工信部重点实验室（哈尔滨工程大学），工业和信息化部，哈尔滨 150001；
3. 哈尔滨工程大学 水声工程学院，哈尔滨 150001；
4. 哈尔滨工程大学 智慧海洋未来技术学院，哈尔滨 150001）

**摘　要**　舰船及水下航行器隐蔽性作为其一个重要的评价指标，需要通过声呐设备准确地测量其航行状态下的辐射噪声级。作为一个体积源，其辐射噪声频谱特点通常表现为宽带连续谱+线谱形式，因此，为达到测量要求势必需要辐射噪声测量声呐阵满足一定带宽内恒定束宽波束才可保证全频带测量的准确性。提出了一种基于 V 型嵌套阵的恒束宽波束形成方法，利用线阵“左右舷模糊”的特点，构成 V 字型阵列，结合嵌套线阵的特点且可通过调整夹角控制波束宽度，实现更高测量增益的恒定束宽波束形成方法。最后，通过仿真实验验证了该方法的正确性，与传统嵌套线阵相比，解决了线阵“左右舷模糊”的缺陷同时，获得可变增益的阵列空间增益，为水下航行器辐射噪声测量提供了更好的测量手段。

**关键词**　恒定束宽；V 形阵列；波束形成；嵌套线阵

**中图分类号**　U666.7；TN911.72　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　2096-5753(2025)05-0587-07

**DOI**　10.19838/j.issn.2096-5753.2025.05.008

## Constant Beamwidth Formation of Conical Array

ZHANG Yichi[1, 3]，WU Shaoqun[1, 4]，SONG Zhuoran[1, 4]，GUI Chenyang[1, 2, 3, *]

（1. National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology，Harbin Engineering University，Harbin 150001，China；2. Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security（Harbin Engineering University），Ministry of Industry and Information Technology，Harbin 150001，China；3. College of Underwater Acoustic Engineering，Harbin Engineering University，Harbin 150001，China；4. College of Future Technology for Intelligent Ocean，Harbin Engineering University，Harbin 150001，China）

**Abstract**　Ship stealthiness，as a crucial evaluation metric，requires accurate measurement of the radiated noise level during ship navigation by sonar equipment. Since the vessel acts as a volumetric source，its radiated noise spectrum typically exhibits a broadband continuous spectrum plus line spectra. Consequently，meeting measurement requirements necessitates that the sonar array for radiated noise measurement must achieve constant beamwidth across the required bandwidth to guarantee accuracy in full-bandwidth measurements. A constant-beamwidth beamforming method based on a V-shaped nested array is proposed in this paper. This method ingeniously utilizes the inherent “port-starboard ambiguity” characteristic of linear arrays to form a V-shaped configuration. A

收稿日期：2025-07-19

作者简介：张一弛（2003-），男，本科生，主要从事水下阵列信号处理及辐射噪声测量研究。

*通信作者：桂晨阳（1990-），男，博士，副教授，主要从事水下阵列信号处理及辐射噪声测量研究。

基金项目：国家自然科学基金“扩展声场信息多级矢量联合的声矢量圆阵弱目标被动探测技术研究”（62401173）。

constant-beamwidth beamforming method with higher measurement gain is achieved that utilizes the characteristics of nested linear arrays and controls the beam width by adjusting the included angle. Finally，computer simulation experiments verify the correctness of the proposed method. Compared with the traditional nested linear arrays，it resolves the “port-starboard ambiguity” limitation of linear arrays while achieving higher spatial array gain，providing an improved measurement technique for underwater vehicle radiated noise measurement.

**Key words** constant beamwidth，conical array；beamforming；linear nested array

## 0 引言

舰船辐射噪声的隐蔽与控制已成为现代海权竞争的核心领域，其技术发展深刻影响着水下攻防体系的战略平衡。随着舰船动力系统不断升级，航行噪声强度显著增强，而先进降噪技术的应用又使部分舰艇噪声逼近海洋环境背景水平，因此需要精确测量舰船噪声，从而评估隐蔽性能[1-7]。国内聚焦低频军事目标探测与特征识别，传感器以传统压电为主，国军标体系尚在完善；国际则强调整体建模与多源数据融合，传感器技术多维领先。当前共同挑战为复杂信道传播损失建模与小型平台载荷限制，未来趋势指向多源数据融合、仿生隐蔽测量与声学超材料应用。

辐射噪声测量可以提高舰船的隐蔽性，使作战能力进一步加强，从而在水下作战中取得优势。不仅如此，辐射噪声测量在民用领域也有广泛应用[8-10]。

舰船辐射噪声测量探测目标方位需要满足以下需求：具有明显的空间指向性，并且要使各频段内波束呈现出相同束宽特征，以实现准确测量。通过阵元排列可以使波束呈现出空间指向性，直线阵就是典型代表。但同时，单一直线阵也存在线阵左右舷模糊、不同频段波束宽度不同的问题。尽管后面发展了圆柱阵、双锥阵等体积阵测量手段，但该种方法需要较大规模的阵元数，且其波束宽度一定，不可适应性调整[11-18]。

本论文研究的主要内容围绕着线阵在使用过程中的缺陷展开。线阵作为经典阵列，在实际应用中有着易于控制、相对稳定和成本低等优势。

本文将设计一个 V 型阵列并实现带宽内的恒定束宽波束形成，克服线阵的各种缺点，提高测量精度和稳定性，且可通过 V 型阵列夹角变化，调整测量阵列的主瓣宽度。

## 1 嵌套线阵实现恒定束宽波束形成

在复杂水声探测与宽带声学信号处理领域，恒定束宽波束形成技术因其在宽频带范围内保持空间分辨率一致性的能力，已成为提升声呐系统性能的关键手段。近年来，研究者从阵列几何设计（如非均匀同心环阵、嵌套阵、锥形阵）与算法创新（如频域不变响应优化、自适应波束空间变换）推进该技术的发展[8-11]。面对复杂场景，如何在维持恒定束宽的同时兼顾旁瓣抑制、计算效率及稳健性，仍是当前研究的核心挑战。

### 1.1 嵌套线阵

本文中实现恒定束宽的方法为嵌套线阵。嵌套阵的概念在 2010 年被首次提出，2012 年又有人提出了二维嵌套阵的概念。本文中提到的嵌套阵均为一维嵌套阵。采用多个阵列嵌套的方法可以实现倍频程上的恒定束宽波束形成[3-5]。

嵌套线阵通过层级化的阵列结构设计，在宽频带范围内实现波束宽度的稳定性。其核心原理是将多个具有不同空间分辨能力的子阵列进行物理或信号层面的嵌套组合，高频段由密集排布的子阵列主导，利用其精细的空间采样能力形成窄波束；低频段则依赖稀疏分布的大子阵列，通过扩展孔径提升低频方向性。各子阵的波束响应在频域上互补叠加，通过自适应加权机制，使合成后的主瓣宽度在预设频带内保持近似恒定。这种结构突破了传统均匀阵列的频带限制，在声呐探测等宽频应用中，既能避免高频段波束过窄导致的扫描效率低下，又可解决低频段波束过宽带来的空间分辨率不足问题，最终形成覆盖宽频域且空间特性稳定的探测波束。

图 1 为嵌套线阵的示意图。

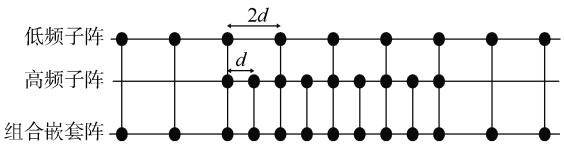



**图 1　嵌套线阵示意图**

Fig. 1　Schematic diagram of nested linear array

其中间距为 $d$ 的子阵是高频子阵，对应的频率为 $f_H$，间距为 $2d$ 的子阵为低频子阵，对应的频率为 $f_L$。单个子阵的阵元数为 $N$，显然在实际阵元排列的过程中会出现阵元复用的情况，所以实际情况下 2 层嵌套阵的阵元数应小于 $2N$。

### 1.2　嵌套线阵原理推导

当信号从声轴方向 $\theta_0$=0° 和 $\theta_{-3dB}$ 处也就是 –3 dB 点（半功率点）处，线性组合得到的指向性指数分别为 1 和 $1/\sqrt{2}$，可列出

$$\left|R_1(f)D_L(f,\theta_0)+R_2(f)D_H(f,\theta_0)\right|=1 \qquad (1)$$

$$\left|R_1(f)D_L(f,\theta_{-3dB})+R_2(f)D_H(f,\theta_{-3dB})\right|=\frac{1}{\sqrt{2}} \qquad (2)$$

式中：$R_1(f)$ 和 $R_2(f)$ 均为频率相关系数；$D_H(f,\theta)$ 为高频子阵的指向性图；$D_L(f,\theta)$ 为低频子阵的指向性图；$\theta$ 为入射角度；$f$ 为信号频率。

想要实现倍频程上的恒定束宽，就需要对 2 个子阵的波束响应进行系数求解并加权求和。

解方程可得

$$\begin{cases} R_1(f)=\dfrac{D_H(f,\theta_{-3dB})-\dfrac{1}{\sqrt{2}}}{D_H(f,\theta_{-3dB})-D_L(f,\theta_{-3dB})} \\ R_2(f)=\dfrac{\dfrac{1}{\sqrt{2}}-D_L(f,\theta_{-3dB})}{D_H(f,\theta_{-3dB})-D_L(f,\theta_{-3dB})} \end{cases} \qquad (3)$$

通过以上公式可以随时计算出各个频率下高频子阵和低频子阵的加权系数，再进行加权组合就能得到恒定束宽的波束。

$$B(f,\theta)=R_1(f)D_L(f,\theta)+R_2(f)D_H(f,\theta) \qquad (4)$$

同理，要实现多倍频程恒定束宽波束形成，可以将频率范围分成几个倍频段。再通过设计不同频段内的高频、低频子阵，计算各个频段中各个子阵的加权系数，再将子阵进行线性组合，就能够实现多倍频程上的恒定束宽波束形成。

### 1.3　仿真求解

本节通过使用嵌套线阵实现倍频程的恒定束宽进行计算机仿真，通过观察仿真结果说明嵌套线阵的恒定束宽性能。

仿真实验选取各子阵阵元数为 9 的嵌套线阵，频率范围为 1 kHz~2 kHz，每 100 Hz 计算一次，得到的仿真结果如图 2 所示。

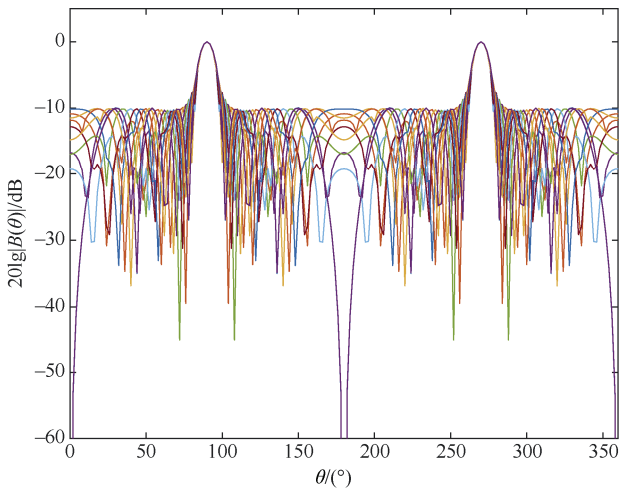



**图 2　倍频程嵌套线阵波束图**

Fig. 2　Beam pattern of octave-band nested linear array

由图 3 可以观察出高频子阵和低频子阵的加权系数之间的关系，在低频情况下，低频子阵的加权系数较大，起主要作用，高频阵加权系数较小。随着频率的增大，低频阵的加权系数逐渐减小，随之高频阵的加权系数逐渐增大。在高频情况下，高频子阵的加权系数较大，起主要作用，而低频阵加权系数变小。由上图能够更直观地看出，在各个频率下是通过调整个子阵的加权系数来实现恒定束宽波束形成。

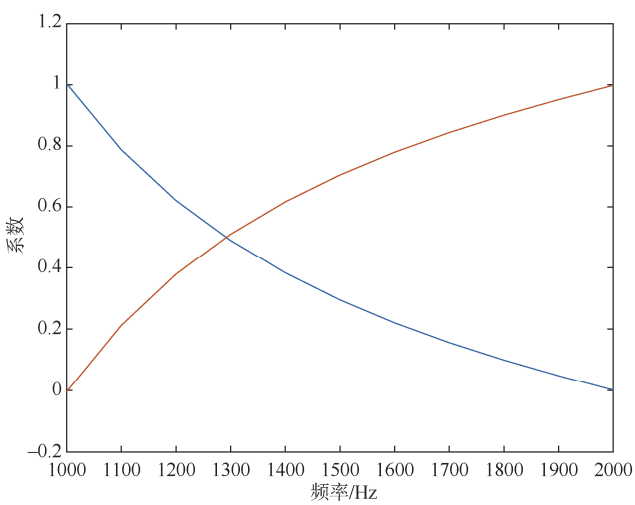



**图 3　子阵系数**

Fig. 3　Sub-array coefficients

## 2 V 型阵列恒定束宽波束形成

### 2.1 V 型阵列介绍

线列阵在实际应用中仍存在若干固有缺陷。从结构特性分析，其物理孔径的有限性导致增益提升受限，直接影响目标方向信号接收强度。在方位估计方面，该阵列存在主瓣模糊现象，这会显著影响方位角分辨率精度。值得关注的是，当通过增加阵元数量试图改善增益时，非期望方向的主瓣幅度会呈现同比例增强趋势。此外，阵列的波束指向特性对工作频率变化具有敏感性，不同频段下的辐射模式会产生非一致性变化。上述技术瓶颈共同制约了线列阵在工程实践中的实际应用价值。

本文提出一种阵列，将 2 个线阵组合成 V 型阵列[12]，通过调整夹角使 2 个线阵的内侧主瓣重合，在阵列角平分线处形成一个更大的主瓣，提高目标分辨的可靠性。

V 型阵列的示意图如图 4 所示，其中 V 阵列的 2 支分别为完全相同的直线阵，2 直线阵根部相连，与水平方向的夹角分别为 $\alpha$ 和 $-\alpha$。在根部的阵元存在阵元复用现象。

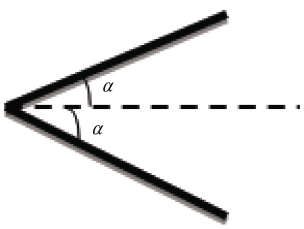



**图 4 V 型阵列示意图**
Fig. 4 V-shaped array

首先对单支线阵进行波束形成，要求主瓣角度为 $\theta$，此时在 $-\theta$ 处也会存在主瓣，造成左右舷模糊现象，如图 5 所示。

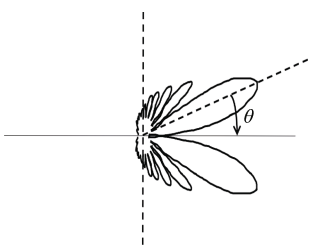
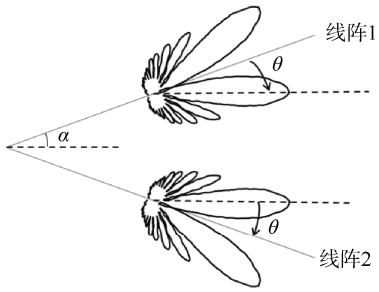
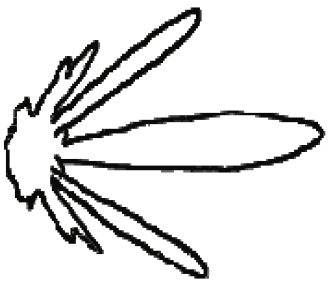



**图 5 线阵的左右舷模糊**
Fig. 5 Port-starboard ambiguity of line array

此时将 2 支线阵朝相反方向旋转 $\alpha$，显然当 $\alpha \approx \theta$，V 型阵列 2 支的波束最大值重合，都在水平方向上，如图 6 所示。




(a) 子阵转置



(b) 子阵合成

**图 6 波束重合示意图**
Fig. 6 Schematic diagram of beam overlap

我们可以利用 2 个线阵的波束最大值在水平方向上重合的特点，通过分步处理与信号合成的方法实现 V 型阵列的波束优化。具体实施时，首先由线阵 1 和线阵 2 分别对输入信号执行波束成形操作，随后将 2 个子阵列的输出响应进行线性组合叠加。这种处理策略能够有效增强期望方向的信号能量，同时在空间谱域形成更显著的旁瓣抑制效果，从而提升阵列系统对非目标方位干扰信号的抑制能力。

在 $\alpha \approx \theta$ 这一关系下，参考示意图，可知 V 型阵列具有良好的指向性。由此结构的参考示意图所示，较大的旁瓣来自于每一支线阵中没有沿水平方向对准的部分。

### 2.2 实验仿真

1）仿真分析 1。

设置 V 型阵列，其中 V 型阵列的单边是由一个嵌套线阵组成，每个子阵包含 9 个无指向性阵元组成的等间隔直线阵，各阵元灵敏度相同，每支线

阵与水平方向夹角均为 $\alpha$=30°，平面波以与水平方向夹角 $\theta$ 方向入射，如图 7–8 所示

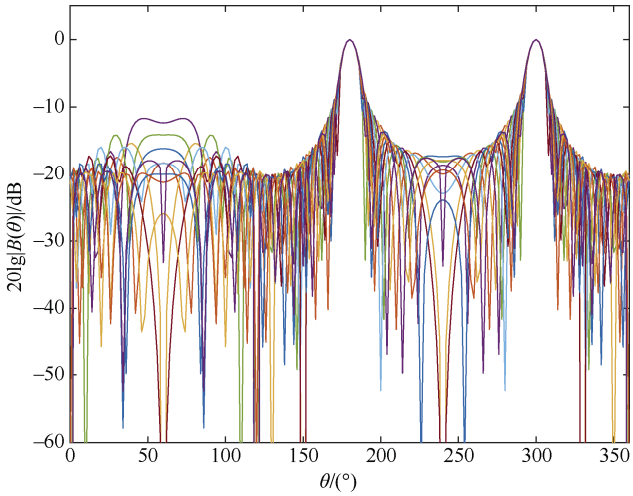
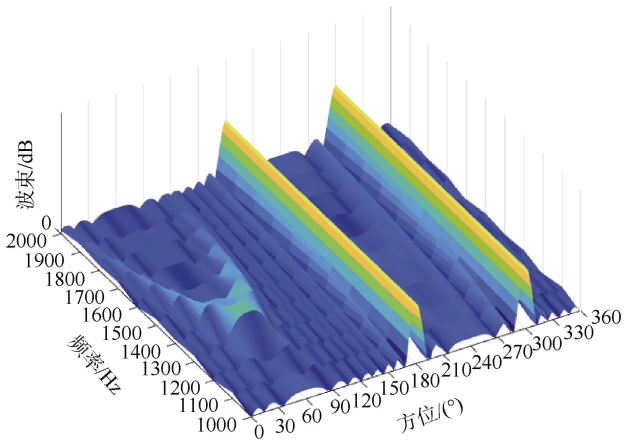
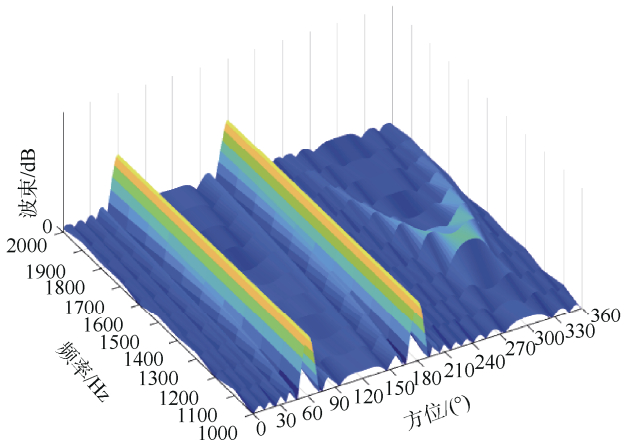



**图 7　转置单个线阵**

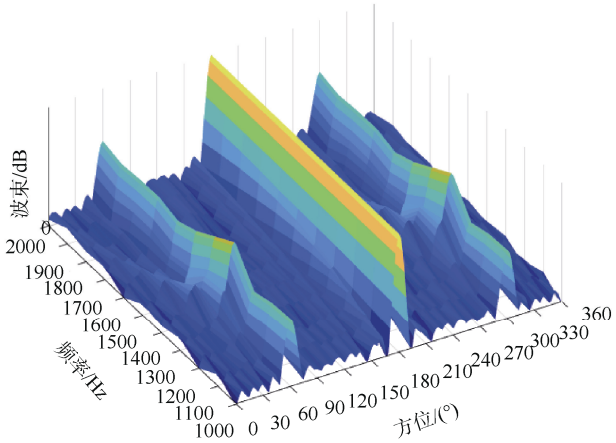
Fig. 7　Transposition of single linear array




(a) 子阵1波束




(b) 子阵2波束




(c) 合成后的波束

**图 8　V 型线阵恒定束宽波束**

Fig. 8　Constant beamwidth beam of V-shaped array

由仿真结果可以看到，子阵 1 和子阵 2 分别为均匀线阵，其不可避免的出现了“左右舷模糊”现象，及在其镜像存在一个和主瓣完全相同的波束。而 V 型阵列的波束图由一个主瓣和 2 个旁瓣组成，解决了“左右舷模糊”问题。

再次设置转置角度 $\alpha$ 为 15°和 45°，得到波束图如 9 和图 10 所示。

2）仿真分析 2。

针对线阵而言，其入射方向随着逐渐偏离法线正衡方向其波束主瓣宽度逐渐变大，最大情况即为端射。如图 11 所示，9 元均匀线阵，随着与线阵水平方向夹角的角度变化，其主瓣宽度端射–正衡–

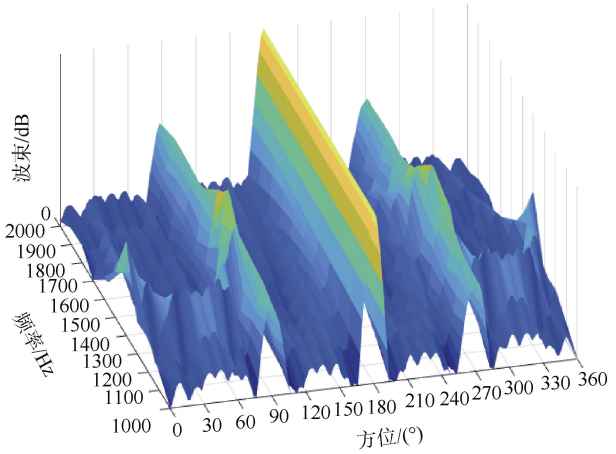



**图 9　$\alpha$ = 15° 时的波束图**

Fig. 9　Beam pattern at $\alpha$ = 45°

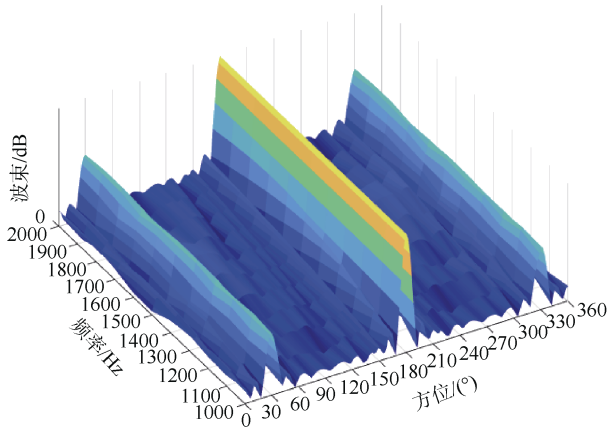



**图 10　$\alpha=15^\circ$ 时的波束图**

Fig. 10　Beam pattern at $\alpha$ = 15°

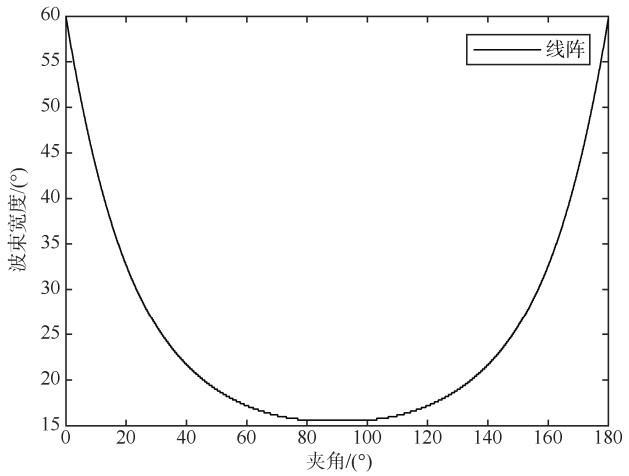



**图 11　均匀线阵不同入射角度主瓣波束宽度**

Fig. 11　Main lobe beam widths of uniform linear array at different incident angles

端射，由图中可以看出其主瓣波束宽度变化为大–小–大，且 90°即正衡方向主瓣最窄。

通过本文方法，V 型阵列其主瓣方向不随 V 型阵中间夹角的变化而改变朝向，如图 12 所示。

如图 13 所示，仿真遍历线阵入射角度和 V 型阵夹角 $\alpha/2$ 变化，从图中可以看出随着角度变化，V 型阵具有更窄的主瓣波束。

如图 14 所示，通过不同入射角度分析 V 型阵列波束增益，分别选取 9、17 元的线阵和 V 型阵（单边）进行仿真，增益计算公式如下：

$$\mathrm{AG}=10\lg\frac{\int_0^{2\pi}\mathrm{d}\theta}{\int_0^{2\pi}B(\theta)\mathrm{d}\theta} \tag{5}$$

式中，$B$ 为波束。

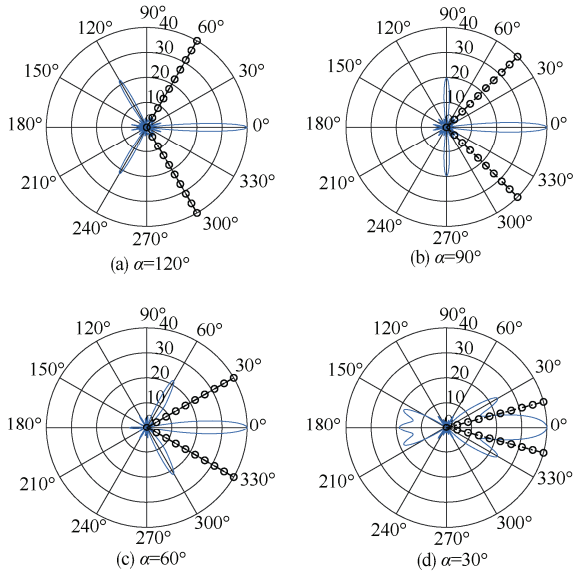



**图 12　不同 V 型阵夹角时的波束图**

Fig. 12　Beam patterns of V-shaped arrays at different included angles

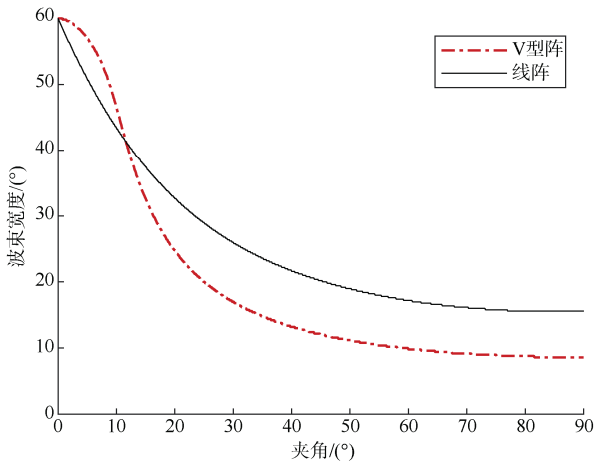
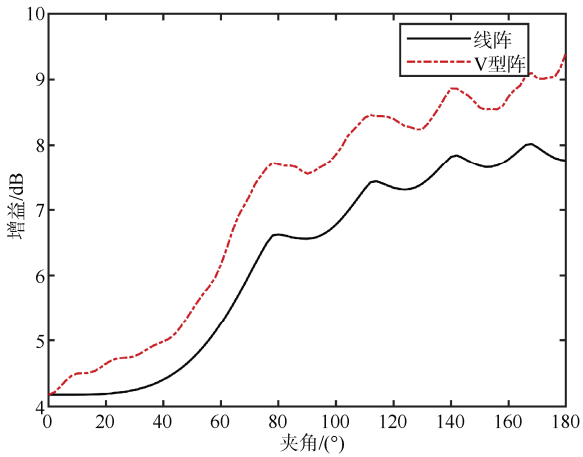
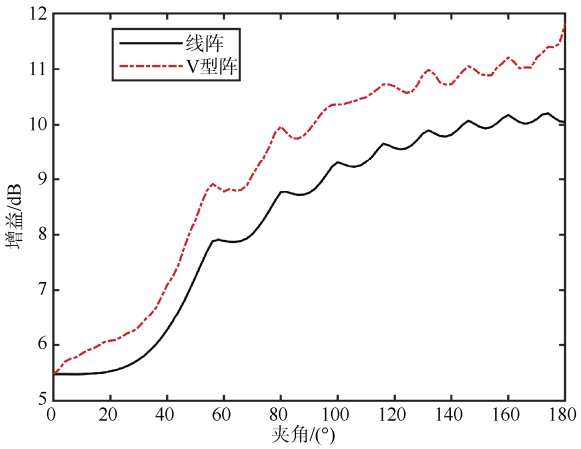



**图 13　不同入射角度下 V 型阵列和线阵主瓣波束宽度**

Fig. 13　Main lobe beam widths of V-shaped arrays versus uniform linear arrays at different incident angles




(a) 9元阵



(b) 17元阵

**图 14　不同阵元数下 V 型阵列和线阵波束增益**

Fig. 14　Beam gains of V-shaped arrays and uniform linear arrays with different numbers of elements

从图 14 可以看出，V 型具有更高的波束增益，且在不同阵元数是同样具有普适性。

## 3　结束语

本文针对舰船及水下航行器辐射噪声测量中保证全频带准确性的关键需求，提出了一种基于 V 型嵌套阵的恒定束宽波束形成新方法。该方法创新性地利用了传统线阵固有的“左右舷模糊”特性，通过将嵌套结构的子线阵布设成 V 字形结构，实现了更高的测量空间增益与稳定的宽带恒束宽性能。这种结构不仅有效克服了传统嵌套线阵无法分辨目标舷别的缺陷，而且通过灵活调整 V 型夹角可方便地控制所需波束宽度，显著提升了测量的灵活性和准确性。仿真实验结果充分验证了该方法的正确性与有效性。相较于传统嵌套线阵，所提出的 V 型嵌套阵方案在获得恒定指向性束宽的同时，提供了更优的阵列增益，为水下航行器辐射噪声的高精度、宽频带测量提供了一种更具优势的技术手段。该方法的成功应用，对提升隐蔽性评估等关键水声测量任务的性能具有重要的实践价值。

## 参考文献

[1] KLEIMAN A，COHEN I，BERDUGO B. Constant-beamwidth beamforming with nonuniform concentric ring arrays[J]. IEEE/ACM Transactions on Audio，Speech，and Language Processing，2022，30（1）：1952-1962.

[2] KLEIMAN A，COHEN I，BERDUGO B. Constant-beamwidth beamforming with concentric ring arrays[J]. Sensors，2021，21（1）：1-11.

[3] JIN B，JIN Y C，ZHANG Z K，et al. Robust wideband beamspace adaptive beamforming for mainlobe jamming in underwater environment[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering，2025，50（2）：627-636.

[4] HAO X K，WANG Y，ZHANG Y H，et al. An optimization method for frequency-invariant beamforming with arbitrary sensor arrays[J]. Applied Acoustics，2023，207（1）：109328.

[5] SHI Q，WANG J F，YANG F R，et al. A note on the design of frequency-invariant beamforming with uniform concentric circular microphone array[J]. Applied Acoustics，2024，217（1）：109826.

[6] 邱卫海，刘文帅，王秀波. 国外舰船噪声测试技术[J]. 舰船科学技术，2011，33（4）：147-150

[7] 黎雪刚，蒋国庆，孙国，等. 水下低噪声目标辐射噪声垂直嵌套阵测量方法[J]. 声学学报，2023，48（5）：971-974.

[8] 曾迪，张震，王泽海，等. 一种双锥阵稳健水下目标噪声测量方法[J]. 舰船科学技术，2023，45（16）：104-107.

[9] OZANICH E R，GERSTOFT P，WORCESTER P，et al. Eastern Arctic ambient noise on a drifting vertical array[J]. The Journal of the Acoustical Society of America，2017，142（4）：1997-2006.

[10] PERETZ O，COHEN I. Constant elevation-beamwidth beamforming with concentric ring arrays[J]. IEEE/ACM Transactions on Audio，Speech，and Language Processing，2024，32（1）：1662-1672.

[11] ZHANG Y，LIANG J X，JIANG S M，et al. A localization method for underwater wireless sensor networks based on mobility prediction and particle swarm optimization algorithms[J]. Sensors，2016，16（2）：16020212.

[12] 桂晨阳. 噪声测量锥形矢量阵成阵及恒定束宽波束形成[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2023.

[13] 罗建，赵亚磊，黄仁可. 作为体积目标的舰船辐射噪声建模[J]. 数字海洋与水下攻防，2018，1（1）：38-42.

[14] 刘勋，相敬林. 作为体积目标的船舶声辐射纵向分布特征的研究[J]. 西北工业大学学报，2000，18（3）：409-412.

[15] 陈耀明，陶笃纯，杨怡青. 舰船辐射噪声线谱的幅度起伏模型[J]. 声学学报，1996，21（4）：580-586

[16] 向辉平，罗建，傅瑞锦，舰船宽带连续谱噪声的模拟[J]. 声学技术，2005，24（3）：140-143

[17] 孟春霞. 船舶辐射噪声源简化模型[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2009.

[18] 孙丽萍，聂武. 船舶结构振动噪声分析及其进展[J]. 船舶力学，2003，7（1）：116-121.

（责任编辑：曹晓霖）