

# 圆阵低频超增益波束形成用于水下目标探测研究

陈韶华, 姚海涛

(中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

**摘要** 针对小尺度基阵难以取得低频空间增益的问题, 研究了圆阵超增益波束形成技术检测低频目标的方法。利用小尺度基阵低频噪声的空间相关性, 求出基阵的相关系数矩阵, 该矩阵对常规波束形成的权系数进行加权, 产生超增益波束形成器的最优加权向量。计算机仿真与实测数据表明: 超增益波束形成技术能够在较低的工作频率上形成波束, 获得更好的探测定位性能, 有良好的应用前景。

**关键词** 水下目标探测; 超增益波束形成; 常规波束形成; 圆阵

**中图分类号** TN911.7; TB566      **文献标识码** A

## Low Frequency Super Gain Beamforming in Circular Array for Underwater Target Detection Research

CHEN Shaohua, YAO Haitao

(No. 710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

**Abstract** Aiming at the problem of obtaining spatial gain at low frequency in a small array, this paper studies the method of detecting low frequency targets by super gain beamforming technology in a circular array. This paper resolves the correlation coefficient matrix of the circular array by exploiting the spatial correlation of the low frequency noise in the small array, and creates the optimal weighting vector of the super gain beamformer by weighting the weights of the conventional beamformer with the above mentioned matrix. Computer simulations and measured data show that the super gain beamforming method produces beams at low frequency, gets better detection and localization performance, and has good application prospect.

**Key words** underwater target detection; super gain beamforming; conventional beamforming; circular array

## 0 引言

由于目标隐身技术的发展, 水中目标物理场特别是声场严重减弱。潜艇目标声特性的下降尤其严重, 其辐射声噪声场较解密文献报道的数据下降了50~60 dB<sup>[1]</sup>, 现代安静型潜艇噪声中只有螺旋桨推进器引起的次声频及低声频线谱成分无法消除。考虑到隐身设计的现代水面舰艇的声场也在下降, 必须面对低信噪比下低频信号的检测与目标定位问题。

为了实现对低频目标的检测和定向定位, 传感器阵列的尺度一般大于波长的若干倍。对于数百赫兹的低频段, 在小尺度平台上难以布设这样尺度的阵列。因此, 在小尺度平台上对低频声源的检测与定向必须寻找新的途径, 超增益波束形成技术将是一个可能的方向。

超增益处理的概念, 早在1983年文献[2]中就有记载。但由于当时的数字信号处理技术与电子技术发展还不成熟, 该方法未受到重视。近几年来, 随着数字信号处理技术与超大规模集成电路技术

的发展, 超增益波束形成的工程实现成为了可能, 又重新引起了人们的关注<sup>[3-6]</sup>, 但主要是理论与仿真研究。本文结合海上试验数据处理, 深入研究了圆阵超增益波束形成技术, 探索了应用于水下小平台声探测的可能性。

## 1 超增益波束形成原理

超增益波束形成包括对各路噪声进行空间预白和对信号进行延时匹配两部分。预白处理是对各路噪声进行最佳线性估计与噪声抵消, 从而消除或削弱各路噪声相关部分的功率, 提高信噪比。相关噪声越强, 信噪比的改善就越大。

对于小尺度阵, 阵元间距远小于半波长, 噪声强烈相关。因而通过超增益处理, 可获得可观的空间增益, 且波束 3 dB 宽度显著减小, 这对于改进低频检测与定位性能将起到重要作用。

根据阵列信号处理理论<sup>[3,7]</sup>, 基阵接收单源信号的空间增益表达式为

$$G = \mathbf{w}^H \mathbf{a} \mathbf{a}^H \mathbf{w} / \mathbf{w}^H \mathbf{Q} \mathbf{w} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{w}$  为形成波束时指向声源入射方向的加权向量;  $\mathbf{a}$  为阵列的方向矢量;  $\mathbf{Q}$  为噪声的空间相关系数矩阵。

对于各项同性噪声,  $\mathbf{Q}$  矩阵的第  $i$  行第  $j$  列元素为

$$Q_{ij} = \sin(kr_{ij}) / kr_{ij} \quad (2)$$

式中:  $k=2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为信号波长;  $r_{ij}$  为第  $i$  个阵元到第  $j$  个阵元的距离。

考虑常规波束形成的情况, 阵元间距为半波长时, 各阵元接收噪声的相关性接近于 0,  $\mathbf{Q}$  的对角线元素为 0, 简化为单位矩阵  $\mathbf{I}_M$ 。

当波束对准目标方向, 即  $\mathbf{w}=\mathbf{a}$  时,  $\mathbf{w}^H \mathbf{a} = M$ , 上式有最大输出信噪比, 即

$$G = M^2 / M = M \quad (3)$$

这个结果是阵列信号处理中所熟知的, 其条件是阵元间距等于半波长。

当阵元间距远小于半波长时,  $\mathbf{Q}$  的对角线元素不为 0。此时如果仍采用常规波束形成的加权, 即  $\mathbf{w}=\mathbf{a}$ , 处理增益将小于  $M$ , 且噪声相关性越大,

处理增益越小。

为了得到超增益加权, 把正定矩阵  $\mathbf{Q}$  分解为<sup>[3,8]</sup>

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^{1/2} \mathbf{Q}^{1/2} \quad (4)$$

定义一个新的矢量  $\mathbf{p} = \mathbf{Q}^{1/2} \mathbf{w}$ , 并注意到  $\mathbf{Q}$  的共轭对称性, 式 (1) 可写为

$$G = \mathbf{p}^H \mathbf{Q}^{-1/2} \mathbf{a} \mathbf{a}^H \mathbf{Q}^{-1/2} \mathbf{p} / \mathbf{p}^H \mathbf{p} \quad (5)$$

对矢量  $\mathbf{p}$  归一化得,  $\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{p} / |\mathbf{p}|$ , 于是由式 (5) 得

$$G = \tilde{\mathbf{p}}^H \mathbf{Q}^{-1/2} \mathbf{a} \mathbf{a}^H \mathbf{Q}^{-1/2} \tilde{\mathbf{p}} = \left| \tilde{\mathbf{p}}^H \mathbf{Q}^{-1/2} \mathbf{a} \right|^2 \leq |\tilde{\mathbf{p}}|^2 \cdot \left| \mathbf{Q}^{-1/2} \mathbf{a} \right|^2 \quad (6)$$

其中, 最后一个式子是根据 Cauchy-Schwarz 不等式得到的, 当且仅当  $\tilde{\mathbf{p}} = c \mathbf{Q}^{-1/2} \mathbf{a}$  时等式成立, 其中  $c$  是任意非零常数, 故可取  $\mathbf{p} = \mathbf{Q}^{-1/2} \mathbf{a}$ 。于是得到最优加权矢量

$$\mathbf{w} = \mathbf{Q}^{-1/2} \tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{a} \quad (7)$$

使阵列空间增益最大, 最大增益为

$$G_{\max} = \mathbf{a}^H \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{a} \quad (8)$$

当阵元间距为半波长, 各阵元噪声相关系数为 0 时,  $\mathbf{Q} = \mathbf{I}_M$  为单位矩阵, 最优加权退化为常规加权, 最大空间增益也退化为常规波束形成的增益。

超增益波束形成的本质是在波束形成之前对各路噪声进行空间预白处理。预白处理充分利用了各路噪声的空间相关性来抵消噪声, 各阵元接收噪声的相关性愈强, 最优处理相对于常规处理的性能改善就愈大。相反, 各阵元接收噪声中不相关成分 (如水听器自噪声) 所占比重愈大, 则改善的潜力就愈小。当各个阵元噪声完全不相关时, 任一阵元的噪声不能用其余阵元的噪声构成它的合理估计, 噪声抵消技术不起作用, 这时最优处理就退化为常规处理。

图 1 给出了超增益波束形成示意图, 其中  $\theta$  是引导角。  $\theta$  在  $360^\circ$  全平面上按一定步长取值, 可预形成多波束, 输出功率出现峰值的那个波束所在方向即可能是目标方向。噪声相关系数矩阵  $\mathbf{Q}$  对于各向同性噪声, 阵形确定后, 它也就确定了, 可以存储起来以查表的方式调用。如果噪声背景偏

离各向同性，只要在处理的时间内保持稳定，仍可以根据实测噪声的相关系数矩阵来获得波束形成的加权矢量。

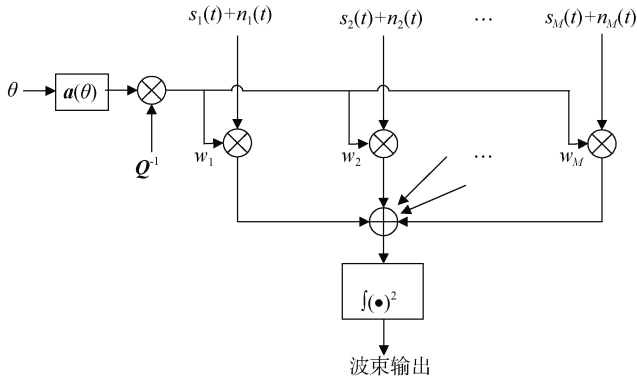


图 1 超增益波束形成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of super gain beamforming

## 2 性能分析

考虑一个 10 元圆阵，根据圆阵波束形成理论，要避免出现栅瓣，其工作频率应低于 1 200 Hz。现设圆阵工作在 600 Hz 的较低频率上，其波束图如图 2 中虚线 (CBF) 所示，-3 dB 束宽大约 79°，而超增益波束形成 (SBF) 的束宽为 32°，具有更高的低频空间分辨率。

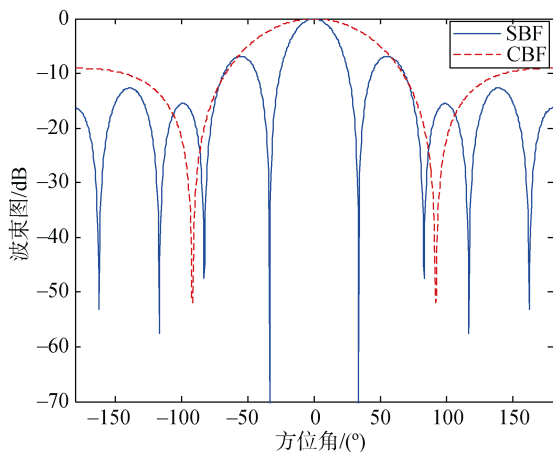


图 2 常规波束形成与超增益波束形成的波束图

Fig. 2 Beam diagram of conventional beamforming and super gain beamforming

图 3 是 10 元圆阵常规波束形成与超增益波束形成的空间增益计算结果。可见，在理想各项同性噪声条件下，工作频率越低，噪声相关性越强，采

用超增益波束处理抵消的噪声越多，空间增益越大。而常规波束形成的工作频率越低，等效基阵孔径越小，空间增益越低，这是理想条件下的结果。声探测系统实际工作条件下的噪声背景很难满足各向同性条件，因此超增益波束形成的性能会有所下降。

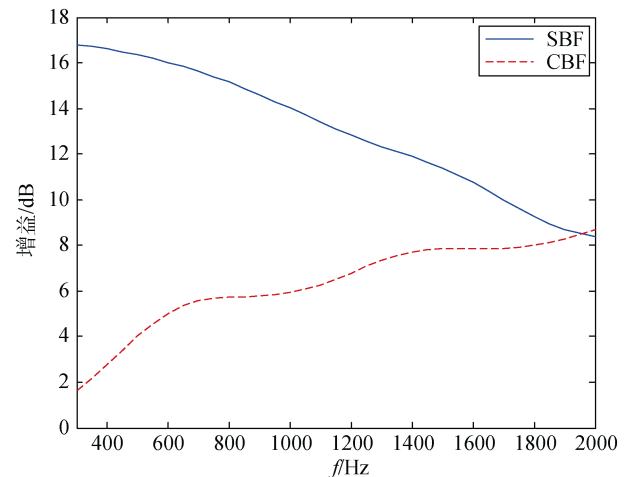


图 3 常规波束形成与超增益波束形成的增益随频率变化关系

Fig. 3 Gain versus frequency of conventional beamforming and super gain beamforming

## 3 试验数据处理

利用海上试验中 10 元圆阵记录的低噪声目标进行超增益波束形成与常规波束形成处理。由于近海环境噪声偏离各项同性，因此不能通过理论  $Q$  矩阵产生超增益波束形成的加权向量。我们采用目标到来之前的海洋环境噪声实时计算噪声的空间相关系数矩阵  $Q$ ，用它对常规波束形成的权向量进行加权处理，得到超增益波束形成的加权向量。图 4 为常规波束形成得到的方位角时间历程图，中心频率为 600 Hz，可见 2 个目标轨迹只能模糊的分辨。图 5 是利用理论  $Q$  矩阵进行超增益波束形成处理的方位时间历程图，完全不能看出目标轨迹。图 6 是根据海洋环境噪声实时计算的  $Q$  矩阵进行超增益波束形成处理的方位时间历程图，能比较清晰地看出 2 个目标轨迹，表明超增益波束形成比常规波束形成有更好的探测定位性能。

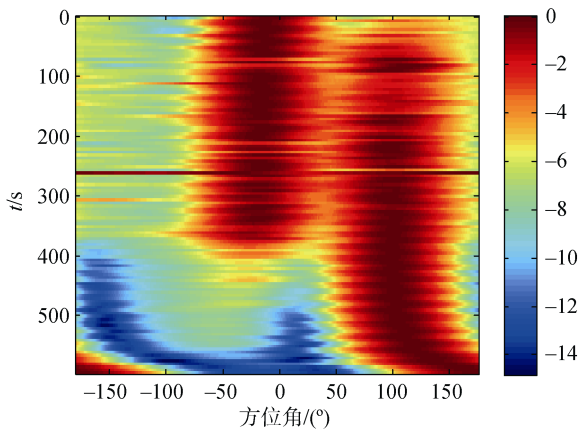
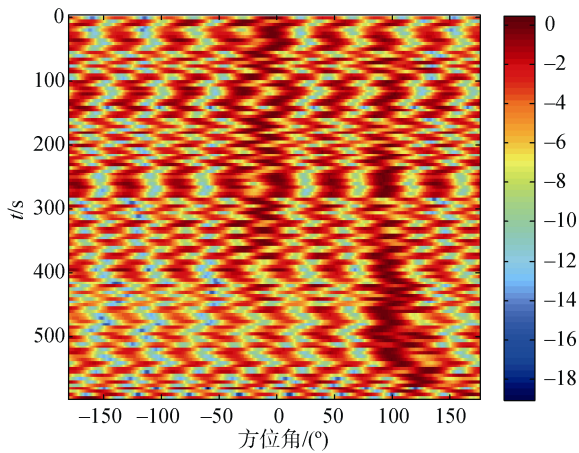


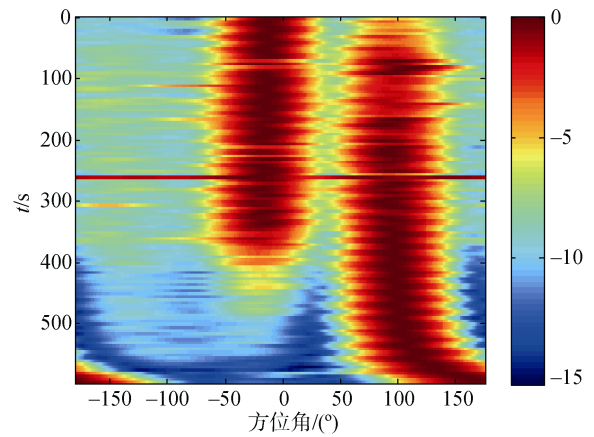
图4 常规波束形成

Fig. 4 Conventional beamforming

图5 理论  $Q$  矩阵加权的超增益波束形成Fig. 5  $Q$ -Matrix weighed supergain beamforming in theory

#### 4 结束语

本文研究了小尺度圆阵超增益波束形成方法的波束形成性能, 介绍了超增益波束形成的原理。通过数值计算获得了超增益波束形成与常规波束形成的波束图与空间增益, 利用海上试验数据验证了圆阵超增益波束形成的性能。理论分析、数值计算与试验数据处理表明: 超增益波束形成与常规波束形成相比, 能工作于较低频率上, 取得比常规波

图6 实测  $Q$  矩阵加权的超增益波束形成Fig. 6  $Q$ -Matrix weighed supergain beamforming in actual measurement

束形成更好的性能。超增益波束形成技术符合水下声探测向低频发展的趋势, 具有较好的应用前景, 值得进一步深入研究。

#### 参考文献

- [1] 马远良. 水声信号处理面临的挑战与发展潜力[C]//中国声学学会. 中国声学学会全国学术会议报告. 桂林: 中国声学学会, 2002.
- [2] 郑兆宁, 向大威. 水声信号被动检测与参数估计理论[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [3] 杨益新. 声呐波束形成与波束域高分辨方位估计技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.
- [4] 王辉辉, 张群飞. 光纤水听器阵列超增益波束形成研究[J]. 声学技术, 2011, 30(4): 47-50.
- [5] 陈韶华, 相敬林. 声强向量阵的波束形成与检测原理研究[J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(2): 301-305.
- [6] 汪勇, 杨益新. 带障板圆环阵模态分解超增益波束形成及其实验研究[J]. 声学技术, 2011, 30(3): 137-139.
- [7] TREES H L. Optimum Array Processing[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002.
- [8] MANOLAKIS D G, INGLE V K. 统计与自适应信号处理[M]. 周正, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003.

(责任编辑: 肖楚楚)