

# 基于宽带分裂阵列的水下远程 被动多目标检测与定向\*

游 鸿<sup>1,2</sup> 黄建国<sup>1</sup> 史文涛<sup>1</sup>

(1 西北工业大学航海学院 西安 710072)

(2 第二炮兵工程学院 西安 710025)

2008 年 11 月 5 日收到

2009 年 4 月 8 日定稿

**摘要** 为获取更高的水下远程多目标检测和定向性能,基于工程中广泛应用的最小方差无畸变响应(MVDR)波束形成算法,设计了大间隔分裂线列阵,通过扩大阵列有效孔径改善了空间谱峰锐度。同时提出非相干宽带预处理方法,利用 MVDR 在多频子带下波束宽度和间隔的非一致性来抵消由于稀布阵元造成的栅瓣效应。最终实现大间隔分裂阵和宽带非相干波束形成的互补。仿真和湖上试验结果表明,与采用宽带 MVDR 的均匀线列阵和采用互相关法的大间隔分裂阵相比较,所提方法能显著提高对水下远程目标的检测和分辨性能。

PACS 数: 43.40, 43.60

## Long-distance underwater passive multi-target detection and direction finding based on the wideband split array

YOU Hong<sup>1,2</sup> HUANG Jianguo<sup>1</sup> SHI Wentao<sup>1</sup>

(1 College of Marine, Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072)

(2 The Second Artillery Engineering Institute Xi'an 710025)

Received Nov. 5, 2008

Revised Apr. 8, 2009

**Abstract** In order to obtain better performances of detection and direction finding of long distance multiple targets, the split linear array with large interval between the sub-arrays is designed based on the MVDR beam forming which is widely used in engineering. The application of extended array aperture improves the acutance of spatial spectrum peaks. On the other hand, the incorrelate signal method (ISM) wideband MVDR pre-processing algorithm has been presented. Because widths and intervals of grating lobes introduced by divided sub-arrays vary with sub-band, the corresponding ambiguous peaks are counteracted while incorrelate sub-band MVDR spectrums overlapped. Finally the processing results of sparse array and wideband ISM beam forming compensate each other. Computer simulation and the lake authentication show the scheme put forward can improve the detection and resolution performance to underwater targets compared with uniform linear array (ULA) applied wideband MVDR and split linear array applied cross-correlation.

## 引言

为了远距离发现和识别水下目标,要求新一代

的水下被动声自导系统具有微弱信号检测、目标参数精确估计、目标跟踪和识别的能力。在阵列信号处理中,通常采用波束形成的方法获得观测场的空间信息,并用能量检测的方法检测目标信号。最小方

\* 国家自然科学基金(60572098)和西北工业大学基础研究基金(NPU-FFR-W018102)资助项目。

差无畸变响应 MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) 是 Capon 提出的一种自适应波束形成算法, 它能根据阵列接收数据自适应优化阵元权值, 其输出能线性反映空间功率分布。与基于特征子空间的目标源数估计算法, 利用阵列信号的 MVDR 波束能量检测目标具有更好的稳健性和空间非白噪声适应性。但 MVDR 是基于整个观测数据空间的参数估计方法, 与 MUSIC 等基于噪声子空间的方法相比, 多目标高分辨能力不足<sup>[1]</sup>。

由于宽带信号能够比窄带信号提供更多的目标信息, 有利于目标检测、参量估计和特征提取, 因此宽带信号处理技术已经成为阵列信号处理的一个重要研究方向。目前对宽带信号处理算法的研究主要集中在两种类型。一类算法称为基于非相干信号的宽带处理方法 ISM<sup>[2-3]</sup>, 其计算量大但思路简单, 性能稳定; 第二类算法称为基于相干信号的处理方法 CSM<sup>[4]</sup>, 也叫聚焦类算法, 其计算量相对较小, 性能较好但易受目标方向预估的影响, 目前主要处于理论研究阶段。另外还有大量研究集中于宽带波束优化和恒束宽设计方面, 其主要目的在于实现适于不同目的的最优空域滤波<sup>[5-7]</sup>。

已有研究在水下目标检测中结合使用 MVDR 方法和非相干宽带处理<sup>[8-9]</sup>。由于这些方法都是基于均匀线列阵的, 因此其存在两个固有的问题: (1) MVDR 分辨能力不足, 难以应用于需要进行多目标分辨的场合; (2) 当目标方位间距较小时, 非相干宽带处理在多频子带上形成的波束具有不一致性, 不利于信号的积累。为了提高系统的性能, 我们设计了一种大间隔分裂线性阵列, 其物理孔径的扩大能极大提高目标的分辨性能; 另一方面, 采用非相干宽带处理算法合成宽带空间谱, 利用多频子带的不一致性有效抑制角度模糊。仿真实验和湖上试验表明可以显著提高水下被动声自导系统对远程目标的检测和分辨性能, 具有良好的实用性。

## 1 窄带与宽带阵列信号处理模型

设有  $D$  个窄带点目标信号源入射到阵元间距不定、阵元数为  $M$  的线列阵, 远场中的目标信号波前到达阵列时可以假设为平面波。假设接收到的加性噪声为平稳、零均值的高斯空间白噪声, 方差为  $\sigma_n^2$ 。阵列在  $t$  时刻接收的  $M$  维观测数据向量可表示为多个入射信号的一个线性组合与一个加性噪声之和:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) = \sum_{i=1}^D \mathbf{a}(\theta_i)\mathbf{s}_i(t) + \mathbf{N}(t), \quad (1)$$

其中  $\mathbf{S}(t) \in \mathbf{C}^{D \times 1}$  和  $\mathbf{N}(t) \in \mathbf{C}^{M \times 1}$  分别表示目标信号复振幅向量和加性噪声复向量,

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1) \ \mathbf{a}(\theta_2) \ \cdots \ \mathbf{a}(\theta_D)], \quad (2)$$

表示为空间阵列的  $M \times D$  维阵列流型矩阵, 其中方向向量具有如下结构:

$$\mathbf{a}(\theta_i) = [e^{-j2\pi f d_1 \sin \theta_i / C}, e^{-j2\pi f d_2 \sin \theta_i / C}, \dots, e^{-j2\pi f d_M \sin \theta_i / C}]^T \quad (i = 1, 2, \dots, D) \quad (3)$$

$f$  为阵列的工作频率,  $\theta_i$  是第  $i$  个目标信号源方位,  $d_m$  是第  $m$  个阵元相对参考阵元的距离 ( $m = 1, 2, \dots, M$ ),  $C$  为介质中的声速,  $\mathbf{T}$  表示转置。

阵列输出的协方差矩阵  $\mathbf{R}$  可以表示为:

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)] = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{R}_{SS}\mathbf{A}^H(\theta) + \mathbf{R}_{NN}, \quad (4)$$

其中  $\mathbf{R}_{SS} = E[\mathbf{S}(t)\mathbf{S}^H(t)]$  为信号协方差矩阵,  $\mathbf{R}_{NN} = E[\mathbf{N}(t)\mathbf{N}^H(t)]$  为噪声协方差矩阵。

当接收阵的工作频带为宽带时, 阵列数据应按每段  $L$  点进行  $K$  段采样, 采样总点数为  $L * K$ 。对每段采样数据作 FFT, 根据实际有效工作频段确定相应的  $J$  个线谱。假设在工作带宽内各子带信号具有相同的信噪比, 则对每个有效子带频率  $f_j$  ( $1 \leq j \leq J$ ), 都可以得到  $K$  个频域采样数据, 相应的阵列频域输出为:

$$\mathbf{X}(f_j, k) = \mathbf{A}(f_j, \theta)\mathbf{S}(f_j, k) + \mathbf{N}(f_j, k), \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (5)$$

式中:

$$\mathbf{A}(f_j, \theta) = [\mathbf{a}(f_j, \theta_1), \mathbf{a}(f_j, \theta_2), \dots, \mathbf{a}(f_j, \theta_D)], \quad (6)$$

为阵列流型矩阵。

对第  $i$  个目标信号:

$$\mathbf{a}(f_j, \theta_i) = [e^{-j2\pi f_j d_1 \sin \theta_i / C}, e^{-j2\pi f_j d_2 \sin \theta_i / C}, \dots, e^{-j2\pi f_j d_M \sin \theta_i / C}]^T, \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (7)$$

为子带频率  $f_j$  处的方向向量。与窄带模型类似,  $\mathbf{S}(f_j, k)$  和  $\mathbf{N}(f_j, k)$  分别为对应频率的  $D \times 1$  维目标信号向量和为  $M \times 1$  维加性噪声向量。

实际工程中, 对一定的子带频率  $f_j$ , 将

$$\widehat{\mathbf{R}}(f_j) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbf{X}(f_j, k_i) \mathbf{X}^H(f_j, k_i) \quad (8)$$

作为由  $K$  个频域采样得到的阵列接收数据频域自相关矩阵估计值, 在此基础上进行宽带处理。

## 2 应用宽带 MVDR 的大间隔分裂阵

### 2.1 非相干宽带 MVDR 方法

对宽带阵列信号, 一般可以采用相干信号子空间法 CSM 或非相干信号子空间处理法 ISM 进行处理。文献 4 中探讨了采用聚焦矩阵对阵列输出进行变换再估计信号源数的方法, 它有解相干能力, 但是为构造合适的聚焦矩阵进行角度预估将引起聚焦误差。非相干处理采用带通滤波器组将宽带分解为多个窄带, 对各窄带数据进行分别处理并进行综合。该方法原理简单, 易于实现。

MVDR 方法是一个约束最优化问题<sup>[10]</sup>, 通过约束形成期望方向上的波束单位幅度, 使基阵的均方输出能量最小化。解决这一问题只需要使基阵各阵元的权系数满足:

$$\mathbf{w}_{\text{MVDR}} = \frac{\mathbf{R}^{-1}\mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^{\text{H}}(\theta)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{a}(\theta)}. \quad (9)$$

可得输出功率:

$$P_{\text{MVDR}}(\theta) = \mathbf{w}_{\text{MVDR}}^{\text{H}}\mathbf{R}\mathbf{w}_{\text{MVDR}} = \frac{1}{\mathbf{a}^{\text{H}}(\theta)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{a}(\theta)}, \quad (10)$$

此时式中  $\theta$  表示空间扫描角。

若采用非相干宽带处理方法对 MVDR 进行扩展, 只需要将子带频率  $f_j$  处得到的式 (7) 和式 (8) 代入式 (10), 所得即为此子带频率处的 MVDR 波束输出:

$$P_{\text{MVDR}}(f_j, \theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^{\text{H}}(f_j, \theta)\widehat{\mathbf{R}}(f_j)^{-1}\mathbf{a}(f_j, \theta)}. \quad (11)$$

在计算各子带 MVDR 波束输出的基础上, 为便于确定检测门限, 应采用算术平均综合所有子带处理的结果, 即可得宽带 MVDR 输出的空间谱:

$$P = \sum_{j=1}^N \frac{1}{\mathbf{a}^{\text{H}}(f_j, \theta)\widehat{\mathbf{R}}(f_j)^{-1}\mathbf{a}(f_j, \theta)}. \quad (12)$$

采用非相干宽带 MVDR 波束形成方法进行水下远程目标检测, 其主要优点在于:

(1) 相比于常规波束形成方法, MVDR 能获得最优空间增益并且具有更好的指向性, 有一定的高分辨能力;

(2) 与 MUSIC 等基于子空间的高分辨方位估计方法相比, MVDR 有较好的稳健性, 受工程实践中非平稳非白噪声的影响较小; 同时其谱曲线幅值表示的是空间功率分布, 谱峰高度与目标强度成线性

关系, 有利于通过与噪声门限的比较进而判决目标有无。

### 2.2 采用宽带 MVDR 的大间隔分裂阵列

采用非相干宽带处理方法对 MVDR 方法进行宽带扩展, 虽然简单, 但由于各子带频率处所形成的 MVDR 波束宽度不一致, 这会影响到空间谱的合成。当多目标方位间隔较小时, 对一定的 SNR, 频率高的子带处, MVDR 能分辨多目标, 但频率较低子带处, MVDR 就无法分辨。如果采用非相干宽带处理方法对各频率子带的 MVDR 空间谱进行简单的累加, 并不能在每个目标处都起到能量累加的效果, 低频带的空间谱实质上影响了最后综合空间谱的分辨性能, 这是非相干宽带处理的固有缺陷。

由于水下环境复杂, 当需要分辨多目标时, 非相干宽带 MVDR 的应用受到一定限制。我们知道, 扩大阵列孔径可以提高目标的分辨能力, 因此可以考虑在阵列结构上进行变化以适应非相干宽带 MVDR 处理。我们设计了大间隔的分裂线阵结构: 两个子阵是按照工作频带中心频率半波长布置阵元的标准线阵, 子阵间距按远大于阵元间隔 (大于 100 倍) 设置。

对一定频率的信号, 线阵阵相邻阵元之间因为信号来向  $\theta_i$  产生的相位差是:

$$\varphi = 2\pi \frac{df_j \sin \theta_i}{C} = 2\pi \frac{d \sin \theta_i}{\lambda}, \quad (13)$$

其中  $d$  为阵元间距,  $C$  为水下声速,  $\lambda$  为信号波长。通过对阵列输出信号的处理提取阵元间信号相位差  $\varphi$  即可确定目标方向  $\theta_i$ , 这就是阵列目标定向的基本原理:

$$\theta_i = \arcsin((\varphi/2\pi + n) \cdot \lambda/d). \quad (14)$$

$n$  的值可以选取为满足  $-\pi/2 < \theta_i < \pi/2$  的任何整数。如果  $d > \lambda/2$ , 则会使得相同的  $\varphi$  对应多个  $\theta_i$ , 这就产生了多值效应, 也即阵列信号处理中通常所说的稀疏阵栅瓣效应, 此时无法通过阵列自身确定哪个  $\theta_i$  是真实的目标方位。因此通常进行基阵设计时都要尽量避免出现栅瓣, 要求阵元间距不大于工作频率的半波长。采用前面提出的分裂线阵结构, 此时阵列孔径变得很大, 线阵已经是稀疏阵, 多值效应非常严重。

这种情况下, 原本对各频带信号积累不利的非相干宽带处理方法却能起到消减栅瓣的作用。非相干宽带 MVDR 方法和大间隔分裂阵列设计在单独使用时, 都不利于水下目标检测, 但若结合在一起使用, 则可以互为补充, 变不利因素为有利因素。稀疏线阵引起的空间谱中会出现大量模糊谱峰, 但在采

用非相干宽带处理时,对不同的子带频率,由于波束宽度不一致,模糊谱峰的方位也不一致。不同子带频率的宽带 MVDR 空间谱进行叠加,正好可以削弱模糊谱峰强度,频带越宽,划分的子带越多,模糊谱峰的削弱效果越好。反过来,大间隔分裂子阵的设计大大扩展了阵列孔径,提高了 MVDR 空间谱峰的锐度。即使对方位间距很近的多目标,也能保证所有子带频率处的目标方位都能形成谱峰,当叠加到一起时,目标的真实谱峰就能得到加强,从而避免在标准线阵上采用非相干宽带 MVDR 方法时出现的能量积累不一致的情况。

图 1 清楚的表明了均匀线阵和大间隔分裂阵上采用宽带非相干处理之后的 MVDR 空间谱的对比情况,两等强目标位于  $0^\circ$  和  $3^\circ$ ,信噪比为 10 dB,均匀线阵由 20 阵元组成,阵元间距 0.15 m,分裂阵由两个 10 阵元的子阵组成,子阵间隔 25 m。阵列工作带宽  $1 \sim 10$  kHz,被划分为 180 个子带进行非相干 MVDR 空间谱合成,宽带信号采样数为 10000 点。

从图 1 可以看出,由于目标角度差过小,在低频、中频和高频带均匀线阵的 MVDR 谱中都没有出现对应的双峰,进行宽带综合后也无法分辨两个目

标;而对各频带处分裂阵的 MVDR 空间谱则由于子阵间的大间隔造成了数目不等的栅瓣,但由于频率的不同栅瓣的位置也不同,进行宽带综合后除了真实目标方位对应的谱峰得到加强凸显出来以外,栅瓣均被抵消了。

### 3 仿真实验结果及分析

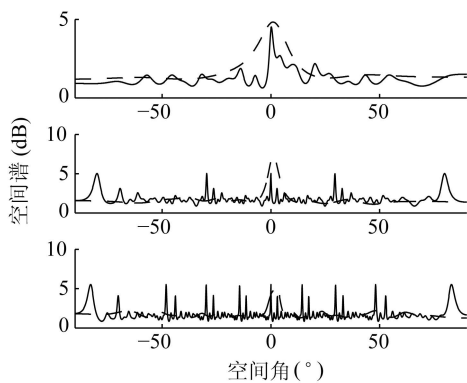
通过计算机仿真实验对所设想的系统进行验证。每个子阵由 12 个接收单元组成,阵元间距为 12 cm,子阵间隔 25 米组成基阵。工作频段  $1 \sim 4.5$  kHz,采样数为  $50 \times 1024$  点。分别进行了非相干宽带 MVDR(用  $P_{mvdr1}$  表示)的单目标检测和双目标分辨仿真实验。由于在大间隔分裂阵上采用分裂波束互相关法(用  $P_{cbout}$  表示)是简单有效的定向方法,因此将它作为比较方法之一;另外还采用 24 元的标准线阵(取消了子阵之间的大间隔)宽带 MVDR 方法(用  $P_{mvdr2}$  表示)进行比较。进行双目标分辨时,由于目标方位间距较小,已超过了后者的分辨极限,所以只进行了  $P_{mvdr1}$  和  $P_{cbout}$  的比较。

以基阵法线方向为基准,单目标空间方位为  $1^\circ$ 。实验以 3 dB 为步长,每一信噪比下进行 100 次独立实验,  $P_{cbout}$ ,  $P_{mvdr1}$  和  $P_{mvdr2}$  三种方法对单目标的检测概率统计结果如图 2。

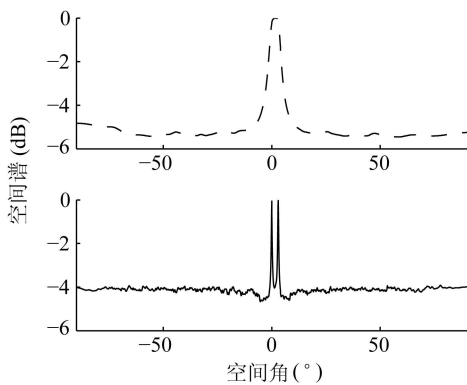
从统计结果来看,相比互相关法和采用标准阵的宽带 MVDR,采用分裂阵的宽带 MVDR 对单目标检测能力上有较大提升。

以基阵法线方向为基准,等强双目标空间方位为  $1^\circ$  和  $3^\circ$ 。实验以 1 dB 为步长,每一信噪比下进行 100 次独立实验,  $P_{cbout}$  和  $P_{mvdr1}$  两种方法对等强双目标的检测概率统计结果如图 3。

从统计结果来看,采用大间隔分裂阵列可以在  $-21$  dB 信噪比条件下对方位间距为  $2^\circ$  的等强双目标进行有效分辨。



(a) 低频、中频和高频处的 MVDR 空间谱



(b) 子带综合之后的合成 MVDR 空间谱

图 1 均匀线阵和分裂阵上采用宽带非相干处理的结果对比 (虚线表示均匀线阵的空间谱,实线表示分裂阵的空间谱.)

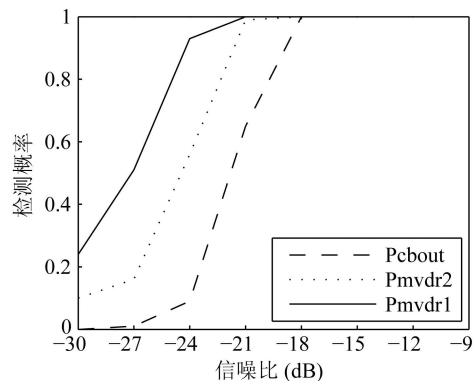


图 2 三种方法对单目标 ( $1^\circ$ ) 检测概率

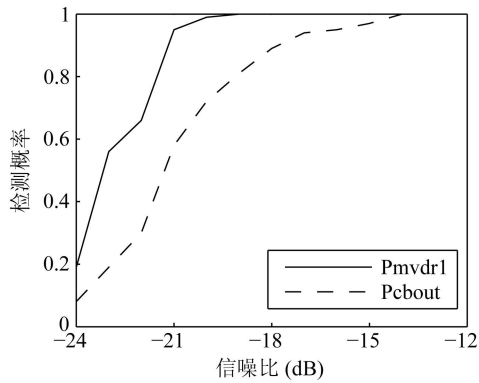


图 3 两种方法对等强双目标 (1° 和 3°) 分辨概率

### 4 湖试试验结果

根据仿真实验的统计结果, 我们进行了湖上试验, 湖体水域条件良好, 试验取得了大间隔分裂阵对 3~8 km 不同距离处单目标和等强双目标数据, 考虑到系统在实际运用中会大量遇到的非等强多目标情况, 还进行了非等强双目标检测的试验。其中, 阵列按仿真条件设计和布放, 等强双目标的噪声谱级均为 105 dB, 非等强双目标试验中弱目标, 噪声谱级降

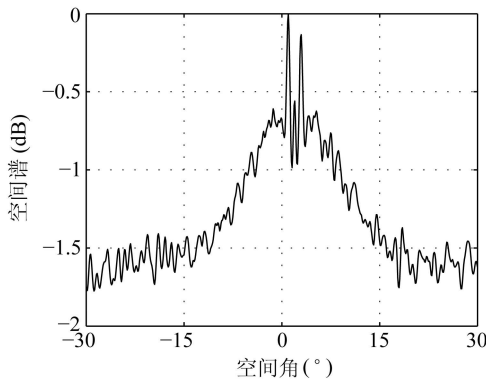
为 95 dB, 为保证试验结果的有效性, 试验前各设备均进行了标定。

等强双目标布置于 7 km 处, 方位分别为 1° 和 3°, 处理结果如图 4。将强弱双目标布置于 6 km 处, 方位分别为 0° 和 3°, 处理结果入图 5。

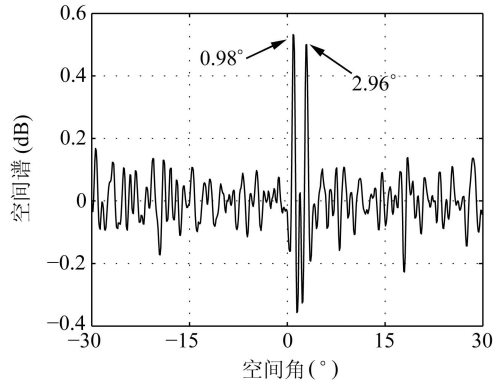
当目标距离较远并且方位间距较近时, 直接采用宽带 MVDR 处理所获取的原始空间谱进行目标检测容易产生误判 (特别是非等强双目标)。经处理后提取原始空间谱线的高频分量则可以判断出目标方位处对应的谱峰, 如图 4(b) 和图 5(b) 所示。大量实验结果表明, 根据背景噪声预设门限, 通过程序判决即可稳定地检出目标。单目标检测实验性能更为优越, 即使对 8 km 处的弱目标也有稳定的检测效果, 空间谱图与双目标类似, 不再详细列出。

### 5 结论

由于 MVDR 具有较好的稳健性, 受复杂背景的影响较小, 因此正逐渐被应用于水下目标检测。文章设计了大间隔分裂阵形, 同时采用非相干信号子空间处理方法对 MVDR 进行了宽带扩展, 为了提高目标

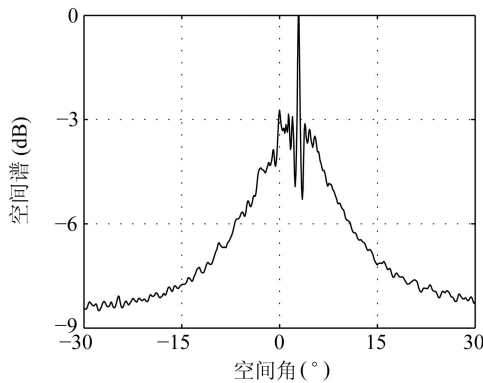


(a) 原始空间谱

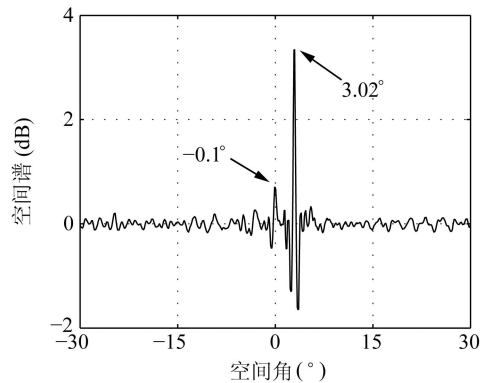


(b) 处理后的空间谱

图 4 7 km 处等强双目标的宽带 MVDR 空间谱



(a) 原始空间谱



(b) 处理后的空间谱

图 5 6 km 处强弱目标的宽带 MVDR 空间谱

检测系统的高分辨能力, 通过两者互补作用, 有效解决 MVDR 空间分辨能力不高和分裂阵列存在的多值性问题, 提高了对小方位间距远程多目标的弱信号检测能力, 有望在水下小孔径基阵组网和多航行器联合目标控制等方面得到应用。

### 参 考 文 献

- 1 YOU Hong, HUANG Jianguo, CHEN Jianfeng. Synthetic spatial spectrum DOA estimator for two closely spaced emitters. 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapore, 2008: 2449—2451
- 2 Mati. Wax, Tie-Jun. Shan, Thomas. Kailath. Spatio-temporal spectral analysis by eigenstructure methods. *IEEE Trans. On ASSP(S0096-3518)*, 1984; **32**(4): 817—827
- 3 SU Guaning, Martin Morf. The signal subspace approach for multiple wide-band emitter location. *IEEE Trans. On ASSP(S0096-3518)*, 1983; **31**(6): 1502—1522
- 4 Wang H, Kaveh M. Coherent signal-subspace processing for the detection and estimation of angles of arrival of multiple wide-band sources. *IEEE Trans. On ASSP(S0096-3518)*, 1985; **33**(4): 823—831
- 5 鄢社锋, 马晓川. 宽带波束形成器的设计与实现. 声学学报, 2008; **33**(4): 316—325
- 6 鄢社锋, 侯朝焕, 马晓川, 马远良. 基于凸优化的时域宽带旁瓣控制自适应波束形成. 声学学报, 2007; **32**(1): 5—9
- 7 杨益新, 孙 超. 任意结构阵列宽带恒定束宽波束形成新方法. 声学学报, 2001; **26**(1): 55—58
- 8 何心怡, 蒋兴舟, 李启虎. 基于子带分解的宽带波束域最小方差无畸变响应高分辨方位估计方法研究. 声学学报, 2004; **29**(6): 533—538
- 9 蒋 飏, 朱 驥, 孙长瑜. 一种宽带高分辨 MVDR 有效算法研究. 系统工程与电子技术, 2005; **27**(7): 1186—1188
- 10 张贤达. 现代信号处理 (第二版). 北京: 清华大学出版社, 2002: 129—130