

一种基于子阵波束域的自适应波束形成算法

金晨凯 马启明

(第七一五研究所, 杭州, 310023)

摘要 对于大孔径拖曳线列阵, 使用子阵阵元域自适应算法处理可以减少信号处理器的维数, 降低算法的复杂度。但当存在阵元位置误差时, 由于阵元的实际幅相响应和理论估计之间的误差, 会导致波束形成性能的下降。为此提出一种基于子阵波束域的自适应波束形成算法, 该算法将子阵的阵元域输出转换为波束输出, 相比于阵元域自适应波束形成方法, 具有计算量小、抗阵元位置误差能力强等优点, 在一定程度上可改善大孔径声呐自适应波束形成性能。理论和仿真的分析验证了该算法的可靠性。

关键词 水声信号处理; 子阵; 自适应; 波束域

在水声信号处理中, 自适应波束形成主要可以分为两类: 在阵元级进行的称为全阵自适应, 在子阵级进行的称为子阵自适应。全阵自适应处理具有良好的空间分辨力, 且对干扰和噪声的抑制性能较好。但是对于大孔径拖曳线列阵, 由于阵元数目较多, 估计协方差矩阵需要有足够多的数据样本, 而对每一阵元都采用全阵自适应处理, 会使得计算的复杂度增加, 收敛速度降低, 难以产生较快的响应。而采用基于子阵的自适应方案可以在一定程度上解决以上问题, 子阵自适应处理减少了信号处理器的维数, 由此降低了算法的复杂度, 并提高了收敛速度。而且子阵协方差矩阵的秩低于全阵协方差矩阵的秩, 子阵处理可以在快拍数目较少时得到协方差矩阵的稳定估计, 在一定程度上避免了波束形成性能的下降。Yuanwei Jin^[1]等人发现当采样个数有限时, 子阵波束形成比全阵波束形成有更好的性能增益。

子阵阵元域自适应算法的原理是将多元线列阵均匀分成若干条子阵, 对各子阵进行常规波束形成, 将每条子阵看作一个等效阵元, 得到等效阵元的输出快拍矩阵, 然后, 将此矩阵作为第二级处理的输入快拍矩阵, 进行自适应波束形成。但当存在阵元位置误差时, 由于阵元的实际幅相响应和理论估计之间的误差, 会导致波束形成性能的下降。而且在空间非均匀噪声场中, 直接进行自适应波束形成会导致波束响应受随机误差影响, 旁瓣起伏较大, 降低了波束形成的性能。针对现有算法的不足, 考虑到空间平滑处理^[2]每条子阵的协方差矩阵求和取平均对相关信号解相关, 可以用来消除有限次快拍带来的影响, 本文提出了一种基于子阵波束域自适应波束形成算法来解决以上问题。

1 算法理论分析

1.1 算法基本原理

由于随机噪声一般认为是零均值的, 所以对每条子阵的协方差矩阵求和取平均可以减弱随机噪声的影响。假定总阵元数为 N , 实际处理子阵阵元数为 M , 此时算法的处理维数由 N 减少为 M , 但是有效阵元的个数也从 N 个减少为 M 个。取较大的 M 值可以避免阵列孔径损失, 但这样又会增加算法的计算量。因此, 我们首先对每条子阵进行降维处理, 使各子阵的阵元域输出转换为 P 个波束输出, 可以通过控制 P 的个数来减少运算量, 这就是本算法的主要思想, 其原理框图如图1所示。

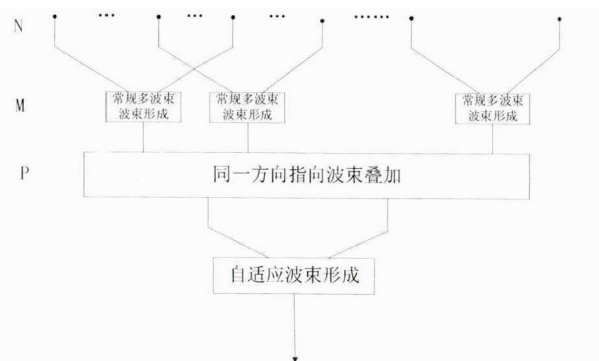


图1 子阵波束域自适应波束形成框图

算法主要分为三个步骤:

步骤1 将每条子阵上接收到的数据转换到波束域, 进行常规波束形成, 降低处理维数。阵列阵元域输出数据为 $\mathbf{x}(t)$, 则相应的协方差矩阵为 $\mathbf{R} = E\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)\}$ 。设 M 为子阵阵元数目, P 为波束数目, \mathbf{T} 为 $M \times P$ 维波束转换矩阵, 则得到的波束域输出数据可表示为:

$$\mathbf{x}_B(t) = \mathbf{T}^H \mathbf{x}(t) \quad (1)$$

通过波束转换矩阵 \mathbf{T} ，得到第 m 条子阵波束域输出：

$$\mathbf{X}_B^{(m)} = \mathbf{T}^H \mathbf{X}^{(m)} \quad (2)$$

其中， $\mathbf{X}^{(m)}$ 是对第 m 条子阵接收的快拍矩阵。由式 (2) 可以得到第 m 条子阵的波束域协方差矩阵：

$$\mathbf{R}_B^{(m)} = E \{ \mathbf{X}_B^{(m)} \mathbf{X}_B^{(m)H} \} = \mathbf{T}^H \mathbf{R}^{(m)} \mathbf{T} \quad (3)$$

同样我们可以得到子阵波束域的流形向量：

$$\mathbf{a}_B(\theta_0) = \mathbf{T}^H \mathbf{a}(\theta_0) \quad (4)$$

其中， θ_0 为期望信号入射方向。 $\mathbf{a}(\theta_0)$ 为第一条子阵的阵元域流形向量。

步骤 2 对各子阵的波束域协方差矩阵取平均。设第一步处理得到的协方差矩阵数目为 Q ，将这 Q 个 $P \times P$ 维的协方差矩阵取算术平均，得到波束域的总协方差矩阵：

$$\mathbf{R}_B = \frac{1}{Q} \sum_{m=1}^Q \mathbf{R}_B^{(m)} \quad (5)$$

步骤 3 由式 (4)、(5) 计算得结果进行 MVDR 波束形成，得到的最优权向量为

$$\mathbf{w}_{Bmvdr} = \frac{\mathbf{R}_B^{-1} \mathbf{a}_B(\theta_0)}{\mathbf{a}_B^H(\theta_0) \mathbf{R}_B^{-1} \mathbf{a}_B(\theta_0)} \quad (6)$$

由此可见，如何构成波束转换矩阵 \mathbf{T} 是本算法需要解决的一个问题。

1.2 转换矩阵的构成

针对均匀线列阵，文献[3]介绍了一种较为简洁的波束转换矩阵构成方法。假设接收阵列在 $\theta_i (i=1, 2, \dots, P)$ 方向上形成 P 个波束，则波束转换矩阵表示为：

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} e^{-jk_0 d \kappa_1} & e^{-jk_0 d \kappa_2} & \dots & e^{-jk_0 d \kappa_P} \\ e^{-jk_0 d 2\kappa_1} & e^{-jk_0 d 2\kappa_2} & \dots & e^{-jk_0 d 2\kappa_P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-jk_0 d M \kappa_1} & e^{-jk_0 d M \kappa_2} & \dots & e^{-jk_0 d M \kappa_P} \end{bmatrix} \quad (7)$$

转换矩阵中的元素为

$$T_{ni} = \exp(-jk_0 d n \kappa_i) \quad (n=1, 2, \dots, M, i=1, 2, \dots, P) \quad (8)$$

式中， $k_0 = 2\pi f / c$ ， d 表示阵元间距， f 为信号频率， c 为声速， $\kappa_i = \sin \theta_i$ ， θ_i 为第 i 个波束的方向角。

2 仿真性能分析

与阵元域相比，波束域 MVDR 仅在有限的区域内形成波束，使得区域外的信息受到一定程度的衰减，转换后的波束域数据损失了部分信息。因此，使得观测区域外的噪声得到有效的降低，从而可以在观测区域内较低的信噪比下得到好的结果。

常规波束形成对阵元的实际幅响应和理论假设之间的误差有较大的宽容性，因此基于常规波束输出而进行的波束域波束形成改善了抗阵元误差的能力。而且，将阵列数据的维数降低，使得运算量得以减小，提高了收敛速度。

根据上述理论，我们对此算法进行了一个仿真，并与全阵和子阵阵元域 MVDR 算法性能上做了对比。仿真参数为 64 阵元半波长分布的直线阵，阵元间距为 1.2 m，信号入射角度为 60° ，SNR 为 -20 dB，采样频率为 1 300 Hz，子阵数量为 4，子阵重叠度为 0，快拍长度为 128。图 2~图 4 给出了在有限次快拍下，全阵与子阵阵元域 MVDR 以及本文所提算法的性能。

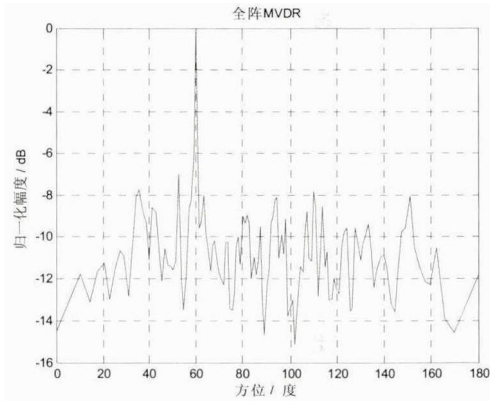


图 2 全阵 MVDR 波束形成

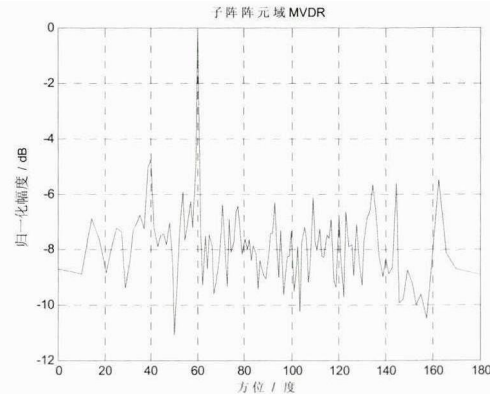


图 3 子阵阵元域 MVDR 波束形成

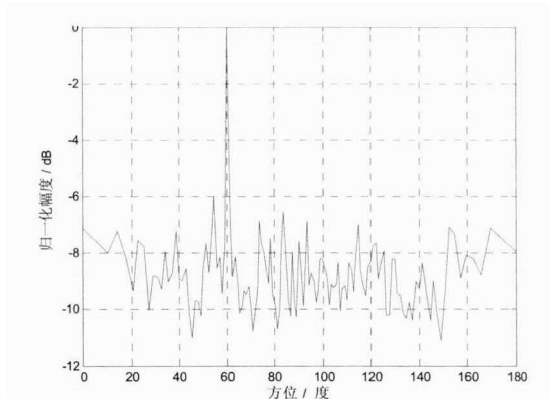


图4 本文所提算法

由图可见，相同条件下，全阵和子阵阵元域 MVDR 以及本文所提算法效果虽然有优劣，但均能准确地检测出目标方位。下面我们在此基础上加入阵元位置误差的影响。利用模型 $\mathbf{d}_{vec} = \bar{\mathbf{d}}_{vec} + \mathbf{var} * \mathbf{r}_{dn} * \mathbf{d}$ 模拟阵元位置误差，其中， \mathbf{d}_{vec} 表示估计的阵元位置； $\bar{\mathbf{d}}_{vec}$ 表示实际的阵元位置； \mathbf{r}_{dn} 表示方差为 1 的随机向量； \mathbf{var} 表示阵元位置误差调节系数， \mathbf{d} 为阵元间距。其他条件不变，令阵元位置方差为 0.2，三种算法的仿真图见图 5~7。图中给出了存在阵元误差时，全阵与子阵阵元域 MVDR 以及本文所提算法的性能。比较三幅图可以得出，当存在阵元误差时，全阵与子阵阵元域 MVDR 的检测性能明显下降，已经无法检测出目标方位，但本文所提算法依然能够准确检测出目标，较阵元域 MVDR 有更好的检测效果。

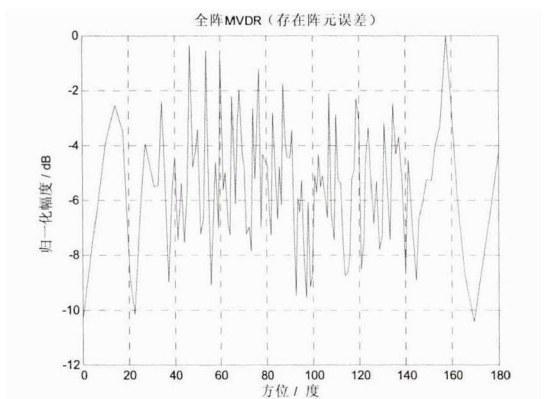


图5 存在阵元误差时的全阵 MVDR 波束形成

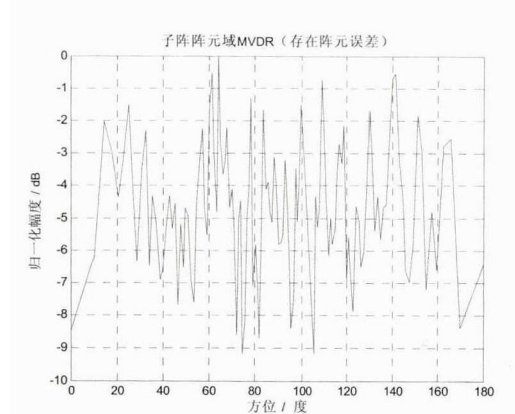


图6 存在阵元误差时的子阵阵元域 MVDR 波束形成

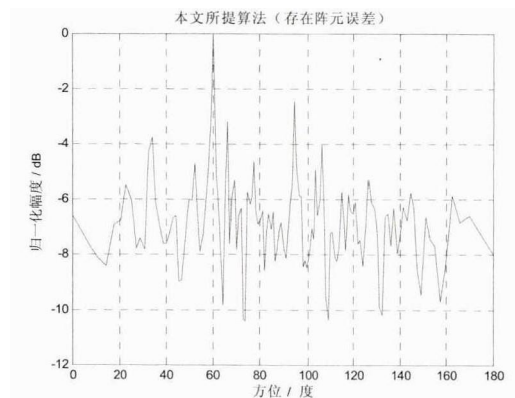


图7 存在阵元误差时本文所提算法波束形成

3 结论

当存在阵元误差时，由于阵元的实际幅相应和理论估计之间的误差，会导致波束形成性能的下降，本文提出的算法将子阵的阵元域输出转换为波束输出，改善了抗阵元误差的能力。理论分析和仿真结果表明：存在阵元误差时，本文提出的方法比全阵与子阵阵元域 MVDR 具有更好的检测性能。

参考文献：

- [1] YUANWEI JIN, FRIEDLANDER B. Reduced-rank adaptive detection of distributed sources, using subarrays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53:13-25.
- [2] ZATMAN M, MARSHALL D. Forward-backward averaging in the presence of array manifold errors[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998,46(11): 1700-1704.
- [3] YANG T C. Motion compensation for adaptive horizontal line array processing[J].Acoustical Society of America, 2003, 113(1):245-259.