

具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法研究

葛士斌^{*①②} 陈新华^① 孙长瑜^①

^①(中国科学院声学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100190)

摘要: 在阵列信号处理中,逆波束形成干扰抑制算法利用干扰的方位信息估计干扰信号从而进行干扰抑制,但在复杂海洋环境中阵列接收的干扰信号往往存在相位随机扰动,此方法估计的干扰信号与实际干扰信号有较大偏差,造成干扰抑制效果不理想。为适应干扰相位的随机扰动,具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法充分考虑随机扰动的存在,利用干扰重建矩阵估计干扰信号,此时估计干扰信号更接近实际干扰信号,保证干扰抑制有较好的结果。该文算法充分考虑了复杂海洋环境中干扰信号的相位扰动,可以获得较好的干扰抑制效果,提高了算法的宽容性。理论分析、计算机仿真结果均表明该文算法的有效性。

关键词: 水下信号处理; 阵列; 干扰抑制; 逆波束形成; 宽容性

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)02-0380-06

DOI: 10.11999/JEIT140578

The Research on the Algorithm of Inverse Beamforming for Interference Suppression with Good Robust

Ge Shi-bin^{①②} Chen Xin-hua^① Sun Chang-yu^①

^①(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In the array signal processing, the inverse beamforming for interference suppression algorithm uses the azimuth information of interference to estimate and suppress the interference. In the complex marine environment the phase of the interference which is received by the array has the random disturbances, there is a big deviation between the actual interference and the interference which is estimated by the algorithm, which makes the effect of the interference suppression not good. In order to adapt the random disturbances of the phase of the interference, the inverse beamforming for interference suppression algorithm with good robust takes the random disturbances into full consideration and uses the interference reconstruction matrix to estimate the interference. In this case the estimated interference is closer to the actual interference signal and the result of interference suppression is better. The proposed method takes the random disturbances of the phase of the interference into full consideration, so it shows good robust in the complex ocean environment. Both the theoretical analysis and the computer simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Key words: Under water signal processing; Array; Interference suppression; Inverse beamforming; Robust

1 引言

微弱信号的检测与估计是阵列信号处理的关键技术之一。当目标信号很弱而干扰信号较强时,在空间谱估计中目标信号的谱峰会被干扰谱的旁瓣所掩盖,对微弱信号检测概率和波达方向估计造成很大影响。因此,若要对微弱目标的检测和估计,必须对干扰进行有效抑制。国内外学者对干扰抑制

问题进行了广泛而深入的探究,提出了许多行之有效的办法,例如基于波束形成的干扰抑制方法、基于信号分离技术的干扰抑制方法以及一些针对特殊干扰的抑制方法。其中以波束形成为基础的干扰抑制方法有零陷技术^[1,2],阵列极化技术^[3,4]。零陷技术在雷达、声呐^[5]、通信、地震信号检测等领域得到了广泛应用,它使波束主瓣对准信号,而指向性零陷对准干扰,从而抑制干扰、保留信号。基于信号分离技术的干扰抑制方法利用某种信号分离算法将包含干扰和目标的阵列输出数据分离成几个数据

2014-05-06 收到, 2014-07-18 改回

国家自然科学基金(61372180)资助课题

*通信作者: 葛士斌 geshibin@126.com

块, 每个数据块只包含某一目标或干扰的信息, 只要能够分离出干扰, 就可以从阵列接收数据中消去干扰, 从而起到抑制干扰的目的。针对特殊情况的干扰抑制方法有针对相干干扰^[6,7]的特征矢量剔除算法(Eigenvectors Eliminated Method, EEM)^[8], 该算法利用强干扰和微弱目标特征矢量的保向正交性剔除强干扰; 有针对同频干扰的分数阶傅里叶域滤波与时域反异步处理相结合的方法^[9], 另外对同频干扰还可以从改变工作频率^[10]、改变发射信号形式以及降低天线旁瓣增益和采用旁瓣对消技术等方面入手。

逆波束形成干扰抑制算法^[11]是近年来提出的一种干扰抑制方法, 该算法充分利用干扰的方位知识重建干扰信号, 然后用重建的干扰信号进行干扰抑制。文献[12]将逆波束形成引入到声矢量信号处理中, 文献[13]将逆波束形成干扰抑制应用于体积阵, 文献[14]将逆波束形成干扰抑制算法与其他干扰抑制算法进行了分析比较, 得出逆波束形成干扰抑制算法在阵元级抵消干扰, 具有能够将干扰的主瓣和旁瓣一并去除的优点。但在复杂海洋环境中, 由于阵型畸变等因素阵列接收的干扰信号往往存在相位随机扰动, 此时该算法干扰抑制效果会严重下降, 影响信号的进一步检测与估计。

针对逆波束形成干扰抑制算法的缺点, 本文提出了具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法。此方法构造干扰信号时, 充分考虑复杂海洋环境中的干扰相位随机扰动, 能在复杂海洋环境中获得较好的干扰抑制效果, 有利于对弱信号的下一步处理。

2 算法理论

2.1 逆波束形成干扰抑制算法

设空间中有 M 元均匀线列阵, 阵元间距为 d , 结构如图 1 所示。干扰信号 $I(t)$ 和目标信号 $S(t)$, 分别以 α 和 β 入射到该线列阵。

此时阵列的输出信号可表示为

$$\mathbf{X}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)\}^T \quad (1)$$

其中 $x_k(t)$, $k = 1, 2, \dots, M$ 表示第 k 个阵元在时刻 t 的输出信号, 它包括 $I(t)$, $S(t)$ 和环境噪声。T 表示矩阵转置。

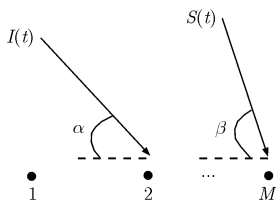


图1 均匀线列阵示意图

假设环境噪声各向同性; 目标信号和干扰均为远场信号, 均以平面波形式到达线列阵; 干扰信号、目标信号和环境噪声相互独立^[15]。在上述假设下式(1)写为向量形式为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (2)$$

式(2)中 $\mathbf{X}(t)$ 为 $M \times 1$ 维的阵列接收信号, $\mathbf{S}(t)$ 为 $N \times 1$ 维信号空间 (N 为信源个数, 包括信号和干扰), $\mathbf{N}(t)$ 为 $M \times 1$ 维噪声数据, \mathbf{A} 为 $M \times N$ 的导向矢量矩阵。按图 1 假定的信源数目和入射角度, \mathbf{A} 可写为 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_I(\alpha), \mathbf{a}_S(\beta)]$, $\mathbf{a}_I = [1 e^{-j\omega\tau_1} \dots e^{-j\omega(M-1)\tau_1}]^T$, $\mathbf{a}_S = [1 e^{-j\omega\tau_2} \dots e^{-j\omega(M-1)\tau_2}]^T$, $\tau_1 = \frac{d \cos \alpha}{c}$, $\tau_2 = \frac{d \cos \beta}{c}$, c 是水下声速, ω 表示信号角频率。

逆波束形成干扰抑制算法分 3 步进行干扰抑制, 具体如下^[12]:

首先, 对阵列输出信号 $\mathbf{X}(t)$ 进行常规波束形成以检测干扰信号的方位, 常规频域波束形成的输出为

$$P(\omega, \theta) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} X_m(\omega) e^{j\omega m d \cos \theta / c}$$

其中 ω 表示接收信号的角频率, θ 表示搜索的方位角, $X_m(\omega)$ 表示第 m 个阵元输出信号的频域表示。根据波束形成结果, 找到最大波束输出方位 θ_{\max} 。在需要进行干扰抑制的场景中干扰信号往往很强, 一般 θ_{\max} 即为干扰来向。

然后, 利用检测到的干扰方向 θ_{\max} , 重建干扰信号。重建的干扰信号 I_{est} 可表示为

$$I_{\text{est}}(\omega, m) = P_{\max}(\omega, \theta_{\max}) e^{-j\omega m d \cos \theta_{\max} / c}$$

其中 $I_{\text{est}}(\omega, m)$ 表示阵元 m 对应的重建干扰信号的频域表示, $P_{\max}(\omega, \theta_{\max})$ 表示最大波束输出结果。

最后, 利用阵元输出信号减去上述重建干扰信号得到干扰抑制后的阵元输出信号。

在实际海洋环境中由于阵型畸变、声速变化等多种因素的存在, 各阵元接收信号的相位往往存在一个随机扰动, 由于扰动是大量无规因素引起的, 因此根据中心极限定理, 可以认为接收信号相位随机扰动在一定范围内是遵从高斯分布的随机信号。现在讨论扰动的相位扰动对干扰抑制的影响, 假设各阵元干扰信号的相位扰动是统计独立、零均值的高斯随机变量, 且假设方差均为 σ^2 。考虑阵元干扰信号相位扰动后, 阵列接收信号频域形式为

$$\mathbf{X}(\omega) = \mathbf{a}_S S(\omega) + \mathbf{a}_I' I(\omega) + \mathbf{N}(\omega) \quad (3)$$

式(3)中, $\mathbf{X}(\omega)$ 是阵列接收信号的频域表示, $S(\omega)$ 是目标信号频域形式, $I(\omega)$ 是干扰信号频域形式,

$\mathbf{N}(\omega)$ 表示噪声的频域形式, $\mathbf{a}'_l = [1 e^{-j\omega(\tau_2+\Delta_2)} \dots e^{-j(M-1)\omega(\tau_2+\Delta_M)}]^\top$, 其中 $\Delta_2, \dots, \Delta_M$ 表示各个阵元的随机扰动, 它们均服从均值为 0, 误差为 σ^2 的高斯分布, 且相互独立。

在存在干扰相位扰动的前提下, 利用逆波束形成干扰抑制算法重建的干扰信号为

$$I_{\text{est}}(\omega, m) = P_{\text{max}}(\omega, \theta_{\text{max}}) e^{-j\omega m d \cos \theta_{\text{max}} / c} \quad (4)$$

式中 $P_{\text{max}}(\omega, \theta_{\text{max}}) = \frac{s(\omega)}{M} \sum_{i=1}^M e^{-j(i-1)\omega(\tau_1-\tau_2)} + \frac{I(\omega)}{M} \sum_{i=1}^M e^{-j(i-1)\omega\Delta_i} + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M n_i(\omega) e^{j(i-1)\omega\tau_2}$ 。为了方便分析将 $\sum_{i=1}^M e^{-j(i-1)\omega(\tau_1-\tau_2)}$ 记为 γ_1 , $\sum_{i=1}^M e^{-j(i-1)\omega\Delta_i}$ 记为 γ_2 , $\sum_{i=1}^M n_i(\omega) e^{j(i-1)\omega\tau_2}$ 记为 γ_3 。经上述化简, 式(4)可写为

$$I_{\text{est}}(\omega, m) = \left(\frac{s(\omega)}{M} \gamma_1 + \frac{I(\omega)}{M} \gamma_2 + \frac{\gamma_3}{M}\right) e^{-j\omega m d \cos \theta_{\text{max}} / c} \quad (5)$$

利用估计干扰信号 $I_{\text{est}}(\omega, m)$ 对阵列进行干扰抑制, 并对干扰抑制后信号在方向 θ 进行波束形成, 记 $\tau' = d \cos \theta / c$, 此时波束形成结果为

$$P(\omega, \theta) = P_s(\omega, \theta) + P_I(\omega, \theta) + P_n(\omega, \theta) \quad (6)$$

式中 $P_s(\omega, \theta) = \frac{s(\omega)}{M} \sum_{i=1}^M \left[\left(\frac{\lambda_1}{\lambda}\right)^{i-1} - \frac{\gamma_1}{M} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda}\right)^{i-1} \right]$, $P_I(\omega, \theta) = \frac{I(\omega)}{M} \sum_{i=1}^M \left[\left(\frac{\lambda_2}{\lambda}\right)^{i-1} \left(e^{-j(i-1)\omega\Delta_i} - \frac{\gamma_2}{M} \right) \right]$, $P_n(\omega, \theta) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left[\lambda^{1-i} \left(n_i(\omega) - \frac{\gamma_3}{M} \lambda_2^{i-1} \right) \right]$, 其中 $\lambda = e^{-j\omega\tau'}$ 。

由上述分析可知, 干扰的随机扰动 Δ_i 导致了干扰项 $P_I(\omega, \theta)$ 的存在, 而随 θ 变化, $P_I(\omega, \theta)$ 的幅值会在某方位 θ_1 上取得最大值 $P_I(\omega, \theta_1)$, 如果 $P_I(\omega, \theta_1)$ 较大且方位 θ_1 与目标方位 β 不同, 则有可能导致 $P(\omega, \theta)$ 在方位 θ_1 上的幅值超过在方位 β 上的幅值, 出现虚假峰, 使真实目标无法被检测到。另外, 通过式(6)可以发现, Δ_i 仅存在于 $P_I(\omega, \theta)$ 中, 如果能通过一定方法在干扰不变的情况下减少 $P_I(\omega, \theta_1)$ 的大小, 则可以减小干扰项对目标检测的影响, 进而改善逆波束形成方法在复杂海洋环境中的性能。

2.2 具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法

具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法与常规逆波束形成干扰抑制算法的主要区别在于对干扰信号的重建过程不同。具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法重建干扰信号的思路是独立估计每个阵元对应的干扰信号, 充分体现每个阵元干扰相位的随机变化。为实现上述思路, 选取被估计阵元 m 临近的 N (N 小于等于 M , 假设 $M = kN$, M 为阵元数目, k 为正整数) 个阵元的输出信号

来估计阵元 m 对应的干扰信号。可利用 $M \times M$ 维的矩阵 \mathbf{W} 实现对干扰信号的重建。干扰重建矩阵 \mathbf{W} 的作用, 首先是选取阵元。由于各阵元的相位扰动是随机且相互独立的, 所以从统计结果来看只要选取的 N 个临近阵元中含有 m 即可, m 的位置对重建结果无影响。但如果 m 位于选取的 N 个阵元中间, 则构造干扰重建矩阵 \mathbf{W} 时, 要考虑 m 的位置与 N 的大小关系及 N 的奇偶性, 增大了构造复杂度, 且不利于构造通用性强的干扰重建矩阵。所以一般选取从 m 开始的 N 个阵元或到 m 结束的 N 个阵元, 此时对应的矩阵 \mathbf{W} 为上三角矩阵或下三角矩阵。然后, 对阵元 m 进行处理, 为了更好地反映随机扰动, 阵元 m 的相位应保持不变, 所以矩阵 \mathbf{W} 的对角线元素应为 1, 且对角线元素为 1 时, 下一步的干扰抑制不再需要相移, 减小了算法的计算量。最后, \mathbf{W} 将其他 $N-1$ 个阵元, 以阵元 m 的相位为基准进行相移。综合上述因素, 干扰重建矩阵 \mathbf{W} 一般为主对角线元素为 1 的上三角矩阵或下三角矩阵。上三角矩阵、下三角矩阵效果是相同的, 本文采用下三角矩阵作为干扰重建矩阵进行干扰抑制, 其主对角元素均为 1, 下 1 对角元素(主对角线往下第 1 条对角线上的元素)元素均为 $e^{-j\omega d \cos \theta / c}$, 下 i 对角元素均为 $e^{-j\omega i d \cos \theta / c}, \dots$, 下 $(N-1)$ 对角元素均为 $e^{-j\omega(N-1)d \cos \theta / c}$, 其余元素为 0, 具体如式(17)所示。

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \Gamma_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \Gamma_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & & & & \vdots \\ \Gamma_{N-1} & & & \ddots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & \Gamma_{N-1} & & & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \Gamma_{N-1} & \dots & \dots & \Gamma_1 & 1 \end{bmatrix}_{M \times M} \quad (7)$$

式中, $\Gamma_n = e^{-j\omega n d \cos \theta / c}$ 。

利用 \mathbf{W} 重建干扰信号 $\mathbf{I}'_{\text{est}}(\omega)$, $\mathbf{I}'_{\text{est}}(\omega) = \mathbf{W}\mathbf{X}(\omega)$ 。利用 $\mathbf{I}'_{\text{est}}(\omega)$ 进行干扰抑制, 得到干扰抑制后的阵列输出信号 $\mathbf{X}'_{\text{pro}}(\omega)$, $\mathbf{X}'_{\text{pro}}(\omega) = \mathbf{X}(\omega) - \mathbf{I}'_{\text{est}}(\omega)$ 。将输出信号 $\mathbf{X}'_{\text{pro}}(\omega)$ 在方位 θ 进行波束形成, 此时波束形成结果中干扰项 $P'_I(\omega, \theta)$ 如式(18)所示。

$$P'_I(\omega, \theta) = \frac{I(\omega)}{M} \sum_{i=1}^M \left[\left(\frac{\lambda_2}{\lambda}\right)^{i-1} \left(e^{-j(i-1)\omega\Delta_i} - \frac{1}{\min(i, N)} \sum_{k=\max(1, i-N+1)}^i e^{-j(k-1)\omega\Delta_k} \right) \right] \quad (8)$$

下面比较在相同条件下，式(6)中 $P_I(\omega, \theta)$ 与式(8)中 $P'_I(\omega, \theta)$ 的幅值最大值的大小。由于两式中均含有随机变量，首先求上述两式的期望。根据 Δ_i 的分布特性及正态分布的特征函数可得

$$E[P_I(\omega, \theta)] = \frac{I(\omega)}{M} \sum_{i=1}^M \left[\left(\frac{\lambda_2}{\lambda} \right)^{i-1} \left(e^{-\omega^2 \sigma^2 (i-1)^2 / 2} - \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M e^{-\omega^2 \sigma^2 (k-1)^2 / 2} \right) \right] \quad (9)$$

$$E[P'_I(\omega, \theta)] = \frac{I(\omega)}{M} \sum_{i=1}^M \left[\left(\frac{\lambda_2}{\lambda} \right)^{i-1} \left(e^{-\omega^2 \sigma^2 (i-1)^2 / 2} - \frac{1}{\min(i, N)} \sum_{k=\max(1, i-N+1)}^i e^{-\omega^2 \sigma^2 (k-1)^2 / 2} \right) \right] \quad (10)$$

给出式(9)和式(10)幅值最大值随阵元数目变化的数值仿真结果，如图 2 所示。仿真中阵元间距为 1 m，水下声速为 1500 m/s，干扰频率为 100 Hz，干扰方位为 90°，随机扰动均值为 0，随机扰动方差为 1，仿真中具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制方法中的 $N=4$ 。由图 2 可以看出具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法对应的干扰项期望的幅值最大值要小于常规逆波束形成干扰抑制算法对应干扰项的幅值最大值。这说明在相同随机扰动的情况下，采用具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法会减小干扰项对干扰抑制后波束形成结果的影响，利于信号的检测与估计。

3 仿真结果

仿真采用 64 元均匀线列阵，阵元间距为 2.5 m；干扰和目标信号均为宽带随机信号，频率范围为 100~300 Hz，信干比为 -24 dB，目标信号方位 $\beta = 70^\circ$ ，干扰信号方位 $\alpha = 20^\circ$ ；背景噪声为带限高斯噪声，频率范围为 100~300 Hz，信噪比为 -15 dB；采样频率为 3000 Hz；水中声速取为 1500 m/s，仿真中具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制方法中

的 $N=4$ 。

首先，给出没有随机扰动时，常规逆波束形成干扰抑制算法和具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法，在上述仿真条件下干扰抑制结果。图 3 给出的是无扰动时，Matlab 仿真结果，为便于比较，仿真结果均经过归一化处理。图 3 中“—”表示阵列信号直接波束形成结果，由该结果可见 20° 干扰太强导致 70° 目标难以被辨认；图 3 中的虚线和实线分别表示常规逆波束形成干扰抑制算法与具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法干扰抑制后的波束形成结果。由两种算法的干扰抑制结果可见，在没有随机扰动的情况下这两种方法均可进行干扰抑制而不影响信号的进一步检测与估计。

接下来，仿真分析两种方法在存在随机扰动时的干扰抑制效果，假设随机扰动均值 $\mu = 0$ ，随机扰动方差 $\sigma^2 = 1$ ，其他仿真条件不变。图 4 是有扰动时，Matlab 仿真结果，为方便比较，对仿真结果进行归一化处理。图 4 中“—”表示阵列信号直接波束形成结果，由该结果可见 20° 干扰太强导致 70° 目标难以被辨认。图 4 中的虚线是常规逆波束形成干扰抑制算法干扰抑制后的波束形成结果，此时由随机扰动造成的干扰项在 14° 取得最大值，影响 70° 方向目标信号的检测。图 4 中的实线是具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法干扰抑制后的波束形成结果，此时干扰项较常规方法小，不影响目标信号的进一步检测。

最后仿真分析不同随机扰动方差及背景噪声强度对两种算法的影响。图 5 是不同随机扰动方差下两种算法的成功检测概率(不同应用场景目标可被检测的定义不同，在此假设干扰抑制后最大波束输出方位为目标方位时，目标可被正确检测)。仿真中随机扰动方差的取值范围为 [0,4]，步长取为 0.2，对每个扰动方差进行 100 次独立实验，其他仿真条件如上所述。

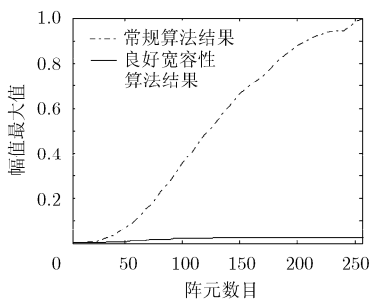


图 2 幅值最大值随阵元数目变化曲线

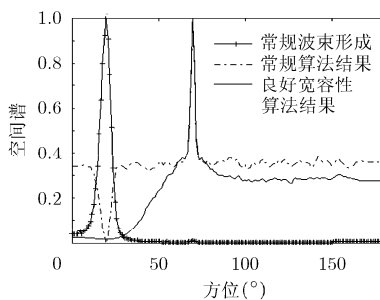


图 3 无扰动时，干扰抑制仿真结果

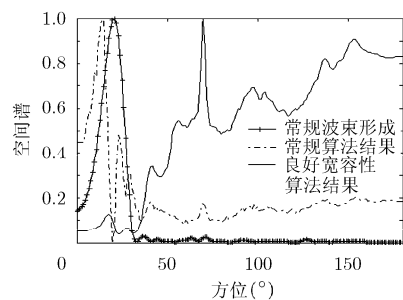


图 4 有扰动时，干扰抑制仿真结果

由图 5 可见无论常规算法还是具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法的成功检测概率随扰动方差的增大而下降。但具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法的成功检测概率随方差的增大下降缓慢,且在相同方差下,具有良好宽容性算法的成功检测概率一直不低於常规算法。由此说明具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法较常规算法可以适应更大方差的随机扰动,在复杂海洋环境中可以获得更高的成功检测概率,具有更好的宽容性。

图 6 是不同信噪比下两种算法的成功检测概率,假设仿真中没有随机扰动,考虑实际海洋环境,

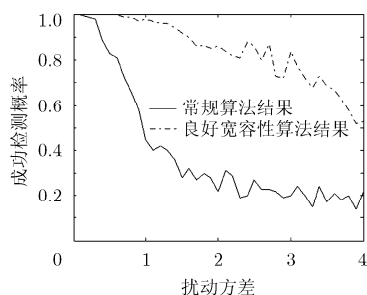


图 5 随机扰动方差对成功检测概率影响

仿真中信噪比取值范围为 $[-30\text{ dB}, 0\text{ dB}]$,仿真步长为 3 dB ,对每个信噪比进行 100 次独立实验,其余仿真条件如上所述。由图 6 可见两种算法在信噪比高于 -25 dB 的情况下,成功检测概率随信噪比变化不大;当信噪比低于 -25 dB 时,两种算法的成功检测概率随信噪比下降急剧下降。另外,在低信噪比情况下具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法的成功检测概率要略高于常规算法,这是因为干扰抑制后具有良好宽容性算法的噪声项要略低于常规算法的噪声项。

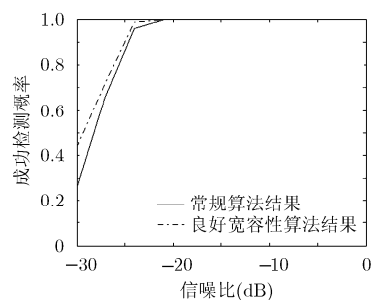


图 6 背景噪声强度对成功检测概率的影响

4 结束语

本为提出的具有良好宽容性的逆波束形成干扰抑制算法充分考虑干扰相位随机扰动的变化情况,分别估计各个阵元的干扰信号,使该算法在复杂多变的海洋环境中表现出良好的宽容性。理论分析、仿真验证均表明了具有良好宽容性的干扰抑制算法在干扰信号存在相位扰动的情况下,可以获得较好的干扰抑制效果,提高了算法在复杂海洋环境中的宽容性,利于目标信号的进一步检测与估计;而常规逆波束形成干扰抑制算法当存在随机扰动时,干扰抑制效果不理想,严重影响目标信号的进一步检测与估计。

参考文献

[1] 曹运合,张焕颖,张守宏,等. 宽带相控阵雷达数字波束形成及干扰置零方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2): 365-369.
Cao Yun-he, Zhang Huan-ying, Zhang Shou-hong, et al. Digital beamforming and jammer nulling method for wideband phased array radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(2): 365-369.

[2] 梁国龙,韩博,范展. 近场自适应波束形成的零陷展宽方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 34-39.
Liang Guo-long, Han bo, and Fan Zhan. Null broadening of near-field adaptive beamforming[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2013, 41(8): 34-39.

[3] 戴幻尧,李永祯,刘勇,等. 主瓣干扰极化抑制的新方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2012, 42(4): 460-468.
Dai Huan-yao, Li Yong-zhen, Liu Yong, et al. Novel research on main-lobe jamming polarization suppression technology[J]. *SCIENCE CHINA: Information Sciences*, 2012, 42(4): 460-468.

[4] 戴幻尧,王晓雯,崔建玲,等. 现代巡航导弹突防中的雷达极化技术[J]. 航天电子对抗, 2013, 29(6): 1-4.
Dai Huan-yao, Wang Xiao-wen, Cui Jian-ling, et al. Radar polarization technology in modern cruise missile penetration [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2013, 29(6): 1-4.

[5] 姚瑶,张明敏,袁骏. 基于零陷展宽的双基地声呐直达波抑制算法[J]. 声学技术, 2012, 31(6): 310-313.
Yao Yao, Zhang Ming-min, and Yuan Jun. A direct path interference suppression algorithm of bistatic sonar based on null broaden method[J]. *Technical Acoustics*, 2012, 31(3): 310-313.

[6] 黄聪. 强相干干扰抑制技术研究[D]. [硕士论文], 哈尔滨工程大学, 2012: 19-24.
Huang Cong. Study of strong coherent interference[D]. [Master dissertation], Harbin Engineering University, 2012: 19-24.

[7] 沈峰,李平敏,许保同,等. 相干干扰下的一种稳健波束形成算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(8): 1012-1016.
Shen Feng, Li Ping-min, Xu Bao-tong, et al. Robust beamforming in a coherent signal environment[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34(8): 1012-1016.

- [8] 李洪兵, 郭艺夺, 宫健, 等. 强干扰背景下相干弱信源 DOA 估计方法[J]. 现代雷达, 2012, 34(9): 45-49.
Li Hong-bing, Guo Yi-duo, Gong jian, *et al.* DOA estimation method for coherent weak signal sources in the presence of strong jamming[J]. *Modern Radar*, 2012, 34(9): 45-49.
- [9] 郇浩, 陶然, 李元硕, 等. 基于变换域和时域联合处理的雷达同频干扰抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(12): 2978-2984.
Huan Hao, Tao Ran, Li Yuan-shuo, *et al.* Co-channel interference suppression for homo-type radars based on joint transform domain and time domain[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(12): 2978-2984.
- [10] Sarto M S, D'Aloia A G, Tamburrano A, *et al.* Synthesis, modeling and experimental characterization of graphite nanoplatelet-based composite for EMC applications[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2012, 54(1): 17-27.
- [11] 刘闪, 孙长瑜, 陈新华, 等. 拖船辐射噪声特性分析及实用[J]. 声学技术, 2013, 32(2): 92-95.
Zhao Shao, Sun Chang-yu, Chen Xin-hua, *et al.* The analysis of tow ship radiated noise characteristics and the cancellation of the noise[J]. *Technical Acoustics*, 2013, 32(2): 92-95.
- [12] 周伟, 惠俊英. 基于声矢量适应干扰抵消的逆波束形成[J]. 兵工学报, 2010, 31(9): 1188-1191.
Zhou wei, and Hui Jun-ying. Inverse beamforming based on coherent interference vector adaptive canceling[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(9): 1188-1191.
- [13] Ma Qian, Sun Chao, Liu Xiong-hou, *et al.* Passive direction-of-arrival estimation under high noise and strong interference condition for volumetric array[C]. TENCON 2013 - 2013 IEEE Region 10 Conference, Xi'an, 2013: 1-5.
- [14] Zhang Bin. Research on the directional interferences canceling[C]. 2010 Third International Symposium on Intelligent Information Technology and Security Informatics, Jingganshan, 2010: 549-552.
- [15] 李焱, 陈新华, 孙长瑜, 等. 声呐中具有方向性宽带强干扰的实时抑制方法[J]. 应用声学, 2008, 27(4): 257-263.
Li Yi, Chen Xin-hua, Sun Chang-yu, *et al.* Real-time cancellation of directional wideband interference in sonar[J]. *Applied Acoustics*, 2008, 27(4): 257-263.
- 葛士斌: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理.
陈新华: 男, 1978 年生, 副研究员, 研究方向为水声信号处理.
孙长瑜: 男, 1954 年生, 研究员, 研究方向为信号与信息处理、微弱信号检测、水声工程.