

一种基于稳健自适应波束形成的声隔离技术

肖 军, 苏 航, 曹宦植

(中国人民解放军 91388 部队, 广东 湛江 524022)

摘 要 介绍了一种基于稳健自适应波束形成的声隔离技术。通过分析声诱饵工作时干扰与信号的主要入射方位, 建立了边发边收声诱饵模型。针对 STMV 波束形成器在基阵模型失配情况下容易出现信号自消的现象, 研究了一种解决波束形成稳健性的新方法, 即 Robust Capon Beamforming (RCB) 算法, 实现有效的干扰抑制和信号提取。仿真和试验数据表明: 该方法对端射方向干扰具有良好的抑制效果, 且能无失真提取出目标信号, 为稳健自适应波束形成在声诱饵边发边收中的应用提供了参考。

关键词 边发边收; 稳健自适应波束形成; 声诱饵; 收发隔离

中图分类号 TB566 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2021)01-0032-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.01.006

An Acoustic Insulation Technology Based on Robust Adaptive Beamforming

XIAO Jun, SU Hang, CAO HuanZhi

(Unit 91388 of PLA, Zhanjiang 524022, China)

Abstract This paper introduces an acoustic insulation technique based on robust adaptive beamforming. By analyzing the main incident directions of interference and signal during operation of acoustic decoys, the ‘receiving while emitting’ acoustic decoy model is established. Aiming at the signal self-cancellation phenomenon that is prone to occur for STMV beamformer when the base array model is mismatched, a new RCB (Robust Capon Beamforming) algorithm method that solves the robustness of beamforming is proposed. It can effectively suppress the interference and extract the signal. Simulation and experimental data show that this method can effectively suppress the interference in the end-fire direction and extract target signals without distortion. It provides a reference for the application of robust adaptive beamforming in the ‘receiving while emitting’ of acoustic decoys.

Key words receiving while emitting; robust adaptive beamforming; acoustic decoy; transmitter-receiver isolation

0 引言

现代鱼雷自导信号多采用双脉冲形式, 且脉冲间隔不固定, 使用存储转发方式易导致声诱饵应答不完全, 很容易就被识别为假目标, 失去声诱饵的干扰作用。边发边收式声诱饵可以在发射应答信号的同时不关闭接收机, 保证应答完全的

同时大大减小了转发信号的延时, 提高了声诱饵模拟的逼真度。

边收边发过程中发射和接收同时工作, 转发信号在发射换能器端面方向存在声串漏, 容易给接收端造成干扰。所以实现边发边收的关键是如何克服发射换能器端面方向信号及其混响对声诱饵接收机的干扰。用声隔离来定义声诱饵接收机对声诱饵

发射信号的抑制能力。在以往的使用经验中, 实现有效声隔离的手段主要有 3 种: 1) 设计收/发换能器的指向性^[1-3]; 2) 在收/发换能器之间放置隔声障板^[1-4]; 3) 自适应干扰抵消^[3,5]。

本文提出的基于稳健自适应波束形成的声隔离技术是使用空域滤波对干扰进行抑制。首先建立边发边收声诱饵模型, 针对 STMV 波束形成器在基阵模型失配情况下容易出现信号自消的现象, 研究解决波束形成稳健性的新方法即 RCB 算法, 实现有效的干扰抑制和信号提取。仿真和试验数据表明, 该方法对端射方向干扰具有良好的抑制效果, 且能无失真提取出目标信号, 为稳健自适应波束形成在声诱饵边发边收中的应用提供了参考。

1 声隔离原理

1.1 边发边收声诱饵模型

图 1 为边发边收声诱饵的组成示意图。诱饵发射后, 悬浮于水中, 可近似认为收、发换能器中心在同一垂线上。如图所示, 声诱饵接收端收到的干扰来自于该垂线方位附近, 信号方位与干扰方位不重叠是实现空域滤波的基础。

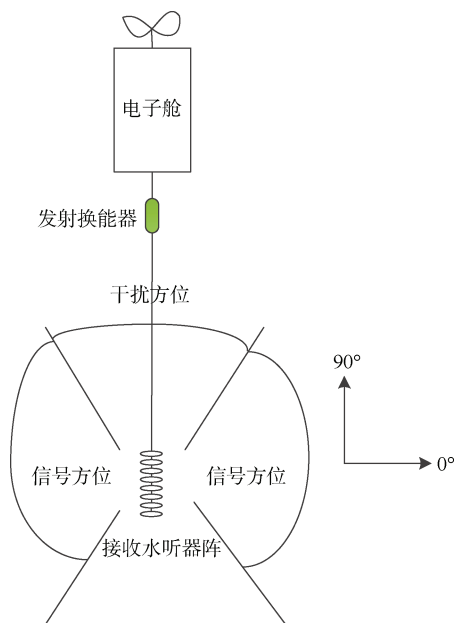


图 1 边发边收声诱饵的组成示意图

Fig. 1 Compositional diagram of a receiving-while-emitting acoustic decoy

考虑接收水听器是由 p 个阵元组成的等间隔

均匀线列阵, 阵元间距为 d , 空间存在的信号源包括鱼雷寻的信号、声诱饵自身发射的应答回波和模拟辐射噪声, 则线阵的第 p 个阵元信号输出 $x_p(t)$ 可以表示为^[6]

$$x_p(t) = s(t - \tau_p(\theta_s)) + g(t - \tau_p(\theta_g)) + n(t - \tau_p(\theta_g)) \quad (1)$$

式中: $s(t - \tau_p(\theta_s))$ 为接收端鱼雷寻的信号; $g(t - \tau_p(\theta_g))$ 为接收端收到的声诱饵自身发射的应答回波; $n(t - \tau_p(\theta_g))$ 为接收端收到的声诱饵模拟辐射噪声; θ_s 取值范围如图 1 所示信号方位; θ_g 取值范围如图 1 所示干扰方位; $\tau_p(\theta_g) = (p-1)d \cos \theta / c, p=1, 2, \dots, P$ 。

使用基阵接收完成声诱饵边发边收的信号处理流程如图 2 所示。波束形成一般在频域实现, 所以首先将阵列输出向量通过傅里叶变换从时域转换到频域。鱼雷寻的信号为窄带信号, 该窄带信号的频率在一定带宽范围内随机出现。检测背景噪声为宽带, 当信噪比足够时, 在进行波束形成前须进行预检测估计, 找到信号的频带范围后, 进行窄带波束形成, 既可以提高信噪比, 也可以减小计算量。根据波束形成结果完成信号有无判断, 并提取峰值方位波束信号用于回波生成。

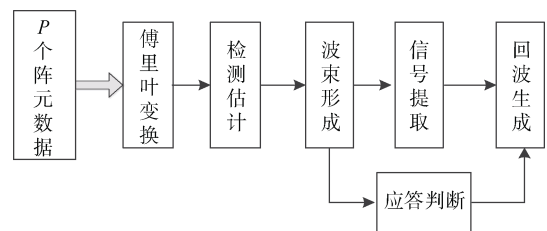


图 2 基阵接收声诱饵信号处理流程图

Fig. 2 Signal processing flow chart of array receiving acoustic decoys

1.2 稳健自适应波束形成

在窄带波束形成器中, 通过设计合适的加权值, 可以有选择地增强某一指定方向的信号, 抑制其他方向到达的信号 (成为干扰与噪声), 提高输出信噪比。

常规波束形成器 (CBF) 的加权向量与输入信号无关, 每个阵元、每个频点采用相同的值,

具有最好的稳健性，但空间增益有限，且旁瓣过高，不能有效抑制来自旁瓣区域的干扰。STMV 是一种基于导向协方差矩阵的时空统计的最优波束形成方法，其在保证感兴趣方位信号无失真输出的条件下，使输出功率最小，最大限度地提高输出信噪比，该波束形成器具有较强的干扰抑制能力。

通过对不同频点的互谱密度矩阵进行相干积累，计算一定频带的空间谱。STMV 可以获得带宽增益并减少收敛时间^[7]。导向协方差矩阵可表示为

$$R_{\text{stmv}}(\Delta f, \theta) = \sum_{k=l}^K T(f_k, \theta) R(f_k) T^H(f_k, \theta) \quad (2)$$

式中： $T(f_k, \theta)$ 为对角导向矩阵； $R(f_k)$ 为频率 f_k 的互谱密度矩阵； Δf 为处理的频带范围； $k = l, l+1, \dots, K$ 为相应的频率下标。

由于实际中精确的互谱密度矩阵和导向向量很难获得，当快拍数比较少或是存在导向向量误差时，就会使 STMV 波束形成器性能下降，甚至出现“自消”现象。

为克服导向向量误差引起的方向图性能下降的问题，Li^[8]等提出了一种求解稳健性波束形成问题的新方法即 RCB 算法。

RCB 稳健性波束形成的优化问题可以表述为

$$\min_{a_s} a_s^H R^{-1} a_s, \text{ s.t. } \|a_s - \bar{a}_s\|^2 \leq \varepsilon_0 \quad (3)$$

式中， ε_0 为设定的导向向量误差范围上界，理想情况下 $\varepsilon_0 = \varepsilon$ 。

从式 (3) 可以看出，RCB 方法的主要目的是从功率估计角度出发，在一定的导向矢量误差范围内，求解最优 a_s ，使其对应的信号功率最大，这是 RCB 算法的物理意义。

其方法的具体设计步骤如下：

1) 对数据协方差矩阵 $R_{x_{\Delta t}}$ 进行特征分解：

$$R_{x_{\Delta t}} = \mathbf{U} \mathbf{T} \mathbf{U}^H$$

2) 运用牛顿迭代法解式：

$$g(\lambda) \triangleq \left\| \mathbf{U} (\mathbf{I} + \lambda \mathbf{T})^{-1} \mathbf{U}^H \bar{a}_s \right\|^2 = \sum_{m=1}^M \frac{|z_m|^2}{1 + \lambda \gamma_m} = \varepsilon_0$$

由于 $g(\lambda)$ 是关于 λ 的单调递减函数，因此可

用牛顿迭代法进行求解。牛顿迭代法所取初值点需满足在其上下界之间， $\hat{\lambda}$ 的上下界限为

$$\frac{\|\bar{a}_s\| - \sqrt{\varepsilon_0}}{\gamma_1 \sqrt{\varepsilon_0}} \leq \hat{\lambda} \leq \frac{\|\bar{a}_s\| - \sqrt{\varepsilon_0}}{\gamma_M \sqrt{\varepsilon_0}}$$

式中 γ_1 和 γ_M 分别是最大和最小的特征值。

3) 根据求解出的 $\hat{\lambda}$ 估计导向向量 \hat{a}_s ：

$$\hat{a}_s = \bar{a}_s - \mathbf{U} (\mathbf{I} + \lambda \mathbf{T})^{-1} \mathbf{U}^H \bar{a}_s$$

4) 由估计导向向量 \hat{a}_s ，估计信号功率为

$$\hat{\sigma}_s = \frac{1}{\hat{a}_s^H \mathbf{R}^{-1} \hat{a}_s} = \frac{1}{\hat{a}_s^H \mathbf{U} \mathbf{T} (\lambda^{-1} \mathbf{I} + 2\lambda^{-1} \mathbf{T} + \mathbf{T}^2)^{-1} \mathbf{U}^H \bar{a}_s}$$

加权向量为

$$\hat{W}_{\text{RCB}} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \hat{a}_s}{\hat{a}_s^H \mathbf{R}^{-1} \hat{a}_s} = \frac{(\mathbf{R} + 1/\lambda \mathbf{I})^{-1} \bar{a}_s}{\hat{a}_s^H \mathbf{U} \mathbf{T} (\lambda^{-1} \mathbf{I} + 2\lambda^{-1} \mathbf{T} + \mathbf{T}^2)^{-1} \mathbf{U}^H \bar{a}_s}$$

5) 根据上述算法会造成信号功率过估计问题，为了解决“比例模糊问题”，可以将估计的导向向量进行归一化，即令： $\hat{a}_s = P^{1/2} \hat{a}_s / \|\hat{a}_s\|$ ，相应的信号功率也变成 $\hat{\sigma}_s = \hat{\sigma}_s \|\hat{a}_s\|^2 / P$ 。

对角加载方法对导向向量误差与协方差矩阵误差都具有稳健性，RCB 方法的信号功率估计能力较好，几乎能正确指示信号功率。 ε_0 过大或过小都会引起性能下降， ε_0 越大，计算得到的 $\hat{\lambda}$ 值越小，对角加载量 $1/\hat{\lambda}$ 也就越大，RCB 波束稳健性越强。同时，为了保证波束形成器对干扰的抑制能力， ε_0 应该选择尽可能小。

综上所述，RCB 算法是基于导向矢量椭圆不确定性的约束条件，从功率估计的角度出发，根据协方差矩阵拟合原理提出的稳健性波束形成算法。该波束形成算法比 STMV 有更好的稳健性。

2 仿真与试验验证

2.1 仿真分析

选取阵元数为 8 的均匀线阵，按照 30 kHz 半波长布阵，采样频率 160 kHz，单拍处理设置为 1 024 点。设定目标入射方位为 0° ，30 kHz 单频信号，背景噪声为海洋环境噪声，信号功率为 149 dB，信噪比 -15 dB。仿真时不存在导向向量误差，RCB 算法设定导向向量误差上界为 0.001。

分别进行常规波束形成、STMV 波束形成、RCB 波束形成, 对这 3 种方法形成的方位谱的比较, 如图 3 所示。

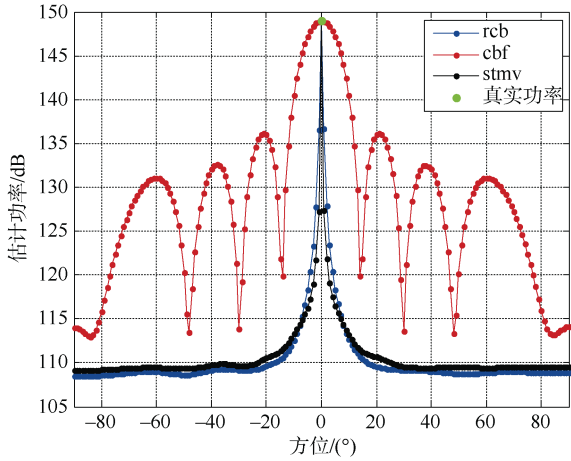


图 3 方位谱
Fig. 3 Azimuth spectrum

从图 3 中可以看到, 在没有导向向量误差的情况下, 3 种方法均能正确指示信号功率, STMV 和 RCB 波束宽度更窄, 旁瓣干扰抑制效果更好, 且 RCB 旁瓣干扰抑制效果略优于 STMV。

2.2 试验验证

湖试试验时接收阵采用 8 元线列阵, 按照 30 kHz 半波长布阵, 阵元间距为 0.025 m, 采样频率 160 kHz, 单拍处理设置为 1 024 点。信号频率为 30 kHz, 接收端标定为 148.6 dB, 分别从 0°, 10°, 20°, 30°, 56°, 80°, 90°方向入射。干扰频率为 20 kHz, 接收端标定为 155.4 dB, 入射角为 90°。

考虑 RCB 对导向向量误差上界 ϵ_0 的选取, ϵ_0 过大或过小都会引起性能下降, 其选取准则是尽可能接近真实导向向量误差。因此, 首先对数据进行预处理, 得到 0°情况下, 不同参数选取对信号功率的影响, 如图 4 所示。可以看到当参数 ϵ_0 大于 0.3, 即可对信号功率进行有效估计, 所以 0°方向的最佳参数选取值为 0.3。运用同样的方法, 分别对 10°, 20°, 30°, 56°, 80°, 90°入射角方向进行预处理, 得到各个角度应该选取的最佳参数值, 如图 5 所示。

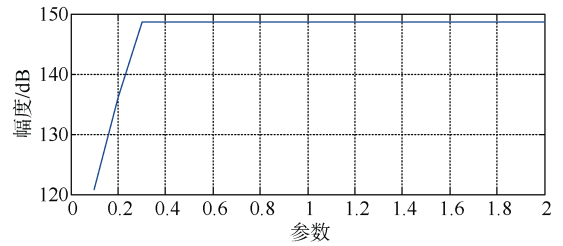


图 4 RCB 在 0°下参数选取与估计功率关系
Fig. 4 Relationship between parameter selection and power estimation at 0° of RCB

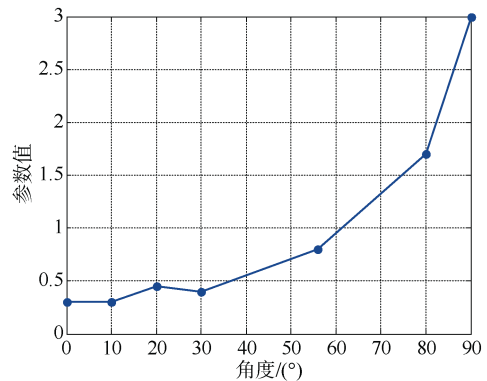


图 5 RCB 在不同角度下最佳参数选取
Fig. 5 Selection of optimal parameters from different angles of RCB

通过图 5 可以看到, 随着入射角度的增大, 最佳参数选取值也逐渐增大。因此, 参数选取应该随着从 0°~90°逐渐增大。从图 1 可以看到, 干扰来自于 90°附近, 将 [80° 90°] 范围内的参数设定小于最佳参数, 抑制干扰。将 0°信号与 90°干扰叠加后, 进行常规波束形成、STMV 波束形成、RCB 波束形成, 对这 3 种方法形成的方位谱进行比较, 如图 6 所示。

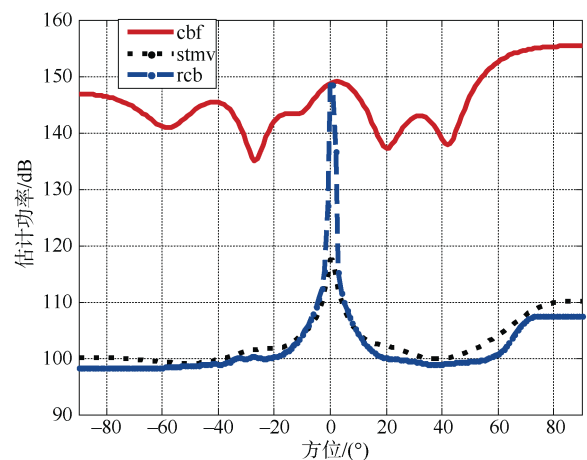


图 6 方位谱
Fig. 6 Azimuth spectrum

通过图 6 可以看到 CBF 和 RCB 波束形成都可以对信号功率进行准确估计，估计功率为 148.6 dB，但 CBF 主波束宽，且无法消除干扰信号的影响，方位谱的峰值方位在干扰方位处；STMV 无法准确估计信号功率，发生了自消，对信号功率的估计仅为 117.5 dB，验证了实际存在导向向量误差的情况下，STMV 误将信号视作了干扰进行抑制，产生自消；RCB 相比于 CBF，能有效抑制干扰信号的影响，相比于 STMV 可以准确指示信号

功率，且在根据先验信息对参数进行合适选取后，可获得较窄主瓣和低旁瓣。

分别提取 CBF 和 RCB 的 0°方位波束谱，如图 7 所示。可以看到 RCB 的 0°方位波束中 20 kHz 干扰完全被抑制，产生了较深的零陷；CBF 的 0°方位波束中干扰仍然存在，相较初始输入干扰被抑制 16 dB。

对每拍数据提取的 CBF 和 RCB 的 0°方位波束谱作傅立叶逆变化，用于回波生成，如图 8 所示。通过谱分析，可以看到 RCB 可得到较纯净的目标信号。

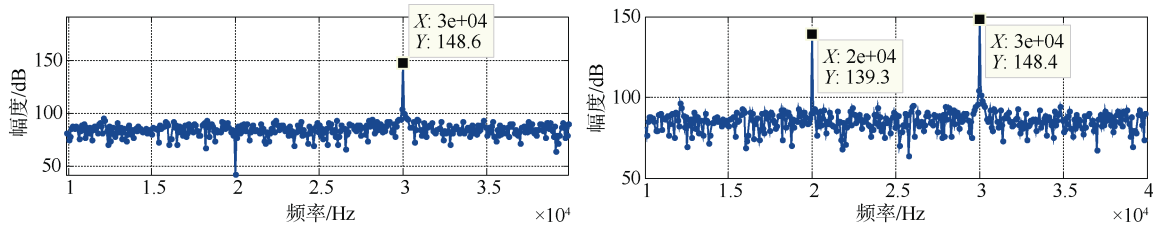


图 7 方位谱 0°方位波束谱
Fig. 7 Beam spectrum at 0° of azimuth spectrum

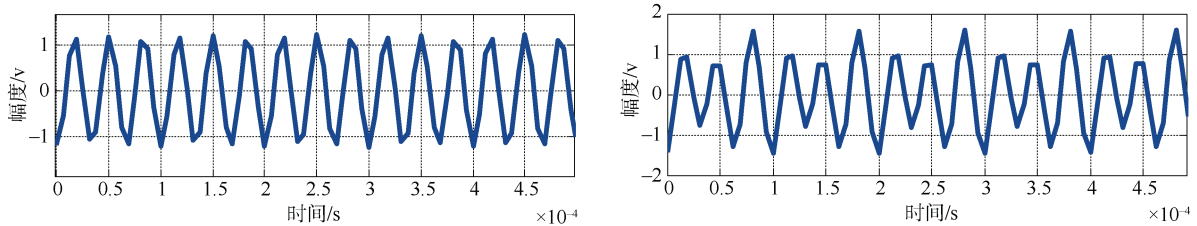


图 8 信号提取及分析
Fig. 8 Signal extraction and analysis

3 结束语

本文针对边发边收带来的发射声串漏问题和波束形成中导向向量失配问题，研究了一种稳健性自适应波束形成方法。仿真表明该方法可以正确指示信号功率，试验数据处理结果显示，其性能不受导向向量误差的影响，具有较好的稳健性，且可通过对试验数据预处理制定合理参数选取，抑制干扰对目标信号的影响。本文所研究的方法稳定，计算量小，可为稳健自适应波束形成在声诱饵边发边收中的应用提供参考。

参考文献

[1] 赵龙龙. 水下无人航行器声学系统实收实发声隔离度分析研究[J]. 声学技术, 2017, 36 (3): 228-232, 167.
[2] 赵龙龙. 抑制尺度靶收发换能器边收边发干扰方法[J].

兵器装备工程学报, 2017, 38 (7): 116-122, 167.
[3] 吴培荣. 基于边收边发技术的声隔离度研究[J]. 声学技术, 2013, 32 (4): 281-285.
[4] 周益明, 王建中, 张涛, 等. 一种新型的声隔离系统[J]. 声学技术, 2013, 32 (6): 519-523.
[5] 王守义. 智能声诱饵第一类边发边收方案及信号处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
[6] 王自娟, 惠俊英, 余贻, 等. 悬浮式矢量边发、边收声诱饵关键技术[J]. 声学技术, 2010, 29 (3): 318-322.
[7] 蒋小勇, 于李洋, 杜选民. 提高被动声纳宽带检测性能的一种新方法[J]. 声学技术, 2011, 30 (6): 484-488.
[8] LI J, STOICA P, WANG Z S. On robust capon beamforming and diagonal loading[J]. IEEE Signal Processing, 2003, 51 (7): 1702-1715.

(责任编辑: 曹晓霖)