

基于宽带稳健 STMV 波束形成的相关检测方法

李 涛, 蒋小勇, 周胜增

(上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

摘要: 采用一种宽带相关结合稳健自适应波束形成的检测方法, 来提高弱目标在强干扰背景下的检测能力。宽带相关检测具有多目标方位分辨力高的优点, 它基于常规波束形成得到, 但由于其旁瓣级有限, 存在强干扰时会导致其旁瓣区域的相关检测产生凹陷, 因此直接影响弱目标的检测能力。通过分析常规宽带相关检测中目标旁瓣区域产生凹陷原因, 利用宽带稳健自适应波束形成的干扰抑制能力, 提出了一种将宽带稳健导向最小方差波(Steered Minimum Variance, STMV)与宽带相关检测结合的宽带检测新方法。该方法能有效消除相关检测中强干扰的影响, 提高被动声呐的宽带检测性能。仿真和试验数据处理结果验证了该方法的有效性。

关键词: 被动声呐; 宽带相关检测; 稳健波束形成; 导向最小方差波束形成

中图分类号: TN911.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-05-0600-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.05.020

Correlation detection based on wideband robust STMV beamforming

LI Tao, JIANG Xiao-yong, ZHOU Sheng-zeng

(Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: A broadband correlation detection method with robust adaptive beamforming is proposed to improve the detection ability of weak targets in strong interference background in this paper. Conventional broadband correlation detection is based on conventional beamforming, but due to its limited sidelobe level, the correlation detection in the sidelobe region generates a depression when there is strong interference, which directly affects the detection ability of weak target. The cause of the depression in the conventional broadband correlation detection is analyzed in the paper. By using the anti-interference ability of broadband robust adaptive beamforming, a new method combining broadband robust Steered Minimum Variance (STMV) beamforming and broadband correlation detection is proposed. The influence of strong interference in correlation detection is effectively eliminated by this method, and the broadband detection performance of passive sonar is improved. The processing results of sea-trial data and simulation show the validity of the method.

Key words: passive sonar; broadband correlation detection; robust adaptive beamforming; steered minimum variance (STMV) beamforming

0 引言

宽带相关检测是被动声呐实现目标探测功能的常用方法, 在实际声呐系统中得到了广泛应用, 它能提供典型的十分之一波束分辨率的方位测量信息^[1]。马启明等^[2]利用分裂阵波束输出的相位差抑制了拖船对拖线阵的干扰, 提高了对舰艏方向上弱目标检测能力。FUMITAKA 等^[3]利用静止目标与水下慢速目标的相位差异、混响、噪声等特性, 在港口警戒声呐中应用分裂阵相关处理, 对低速目标实现了自动检测跟踪^[4]。

导向最小方差波(Steered Minimum Variance,

STMV)^[5]波束形成利用声场的空-时统计特性, 在一定带宽下仅需少量快拍数就能实现快速收敛, 每一快拍的波束输出可在单次快拍内完成。但在实际应用时导向矢量存在误差, 导致 STMV 性能急剧下降。在计算阵列功率输出时, 稳健 Capon 波束形成(Robust Capon Beamforming, RCB)^[6]为导向矢量加入了误差约束条件, 以阵列功率输出最大化为目的, 通过搜索得到最优导向矢量, 使导向矢量误差问题一定程度上得到了解决。随着声呐孔径的增大, 需大量数据快拍估计协方差矩阵, 使处理时间增长, 导致收敛速度变慢。文献[7]中在 RCB 方法中运用导向协方差矩阵(Steered Covariance Matrix, STCM)的思想, 能有效避免导向矢量误差的影响, 且利用快速收敛最小方差无失真响应(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)算法的相干累积特性, 加速了收敛, 降低了运算量。基于椭圆不确定集的 RCB 采用拉格朗日乘法寻优最佳权向量, 常需对协方差

收稿日期: 2019-06-04; 修回日期: 2019-07-22

作者简介: 李涛(1986—), 男, 湖北黄冈人, 工程师, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 李涛, E-mail: atao217@qq.com

矩阵进行特征分解，运算量较大。文献[8]中采用 Krylov 子空间、梯度搜索等方法计算 RCB 权向量，大幅度降低运算量，并进行性能比较。

本文分析宽带相关检测中目标旁瓣产生凹陷的原因，利用宽带稳健自适应波束形成具有的旁瓣抑制能力和阵列误差容错特性，结合宽带相关高分辨率特性，提出了一种宽带目标检测方法。仿真和试验数据处理结果验证了该方法能有效抑制强干扰目标产生的旁瓣凹陷，提高被动声呐宽带检测性能。

1 宽带信号检测

在被动声呐目标探测中，宽带信号检测常采用宽带能量或宽带相关的检测方法来实现^[9]。将整个频带划分为若干个子带，在水平面内对各子带预成多个波束，波束为局部扇面或者全部方位覆盖。宽带能量检测利用常规波束形成的输出进行能量积分处理；相关检测利用分裂波束输出进行互相关处理。根据其波束输出，分析常规波束的主瓣和旁瓣与分裂波束输出的关系。

假设均匀线阵由 N 个等间隔阵元组成，阵元间距为 d ，入射信号波长为 λ ，入射方向与线阵之间的夹角为 θ 。假设各阵元接收复信号幅度为 1，忽略时间因子 $e^{-j\omega t}$ 影响，则第 i 个阵元的接收信号为

$$x_i(t) = e^{-j\pi i d \cos \theta / \lambda} \quad (1)$$

将均匀线阵等分成两个子阵，若预成波束方位为 θ_0 ，子阵 1、子阵 2 均以线阵第一个阵元为参考点，则子阵 1、子阵 2 的归一化波束输出^[10]分别为

$$B_1(\theta) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N/2-1} e^{-j2\pi i d (\cos \theta - \cos \theta_0) / \lambda} \quad (2)$$

$$B_2(\theta) = \frac{2}{N} \sum_{i=N/2}^{N-1} e^{-j2\pi i d (\cos \theta - \cos \theta_0) / \lambda} \quad (3)$$

根据子阵 1 和子阵 2 的波束输出，通过简单数学推导，宽带能量检测波束图为

$$B_{\text{ced}}(\theta) = B_1(\theta) + B_2(\theta) = \frac{\sin(N\pi d (\cos \theta - \cos \theta_0) / \lambda)}{N \sin(\pi d (\cos \theta - \cos \theta_0) / \lambda)} \quad (4)$$

同理，可得宽带相关检测输出为

$$B_{\text{cor}}(\theta) = B_1(\theta) \times B_2^*(\theta) = e^{jN\pi d (\cos \theta - \cos \theta_0) / \lambda} \quad (5)$$

当 $\cos \theta - \cos \theta_0 = \pm k\lambda / d$ 时，宽带能量输出极大值为主瓣，宽带相关检测输出为 1，对应峰值。

当 $\cos \theta - \cos \theta_0 = \pm (k\lambda / Nd + \lambda / Nd)$ 时，宽带能量输出为旁瓣，宽带相关检测输出为 -1，对应凹陷。

因此，宽带相关检测在预成波束主瓣处形成峰值，具有较强的相关性(理论值为 1)，在预成波束旁瓣处形成凹陷，子阵间为负相关(相关系数为 -1 ~

0)。当干扰目标越强时，其旁瓣能量越大，负相关性越强，旁瓣形成的凹陷就越深。

2 宽带稳健自适应波束形成

自适应波束形成即快速收敛 MVDR 算法。该算法有着较好的旁瓣抑制能力和空间分辨力。但在实际应用中，受阵元位置、阵元幅度一致性或相位一致性和阵型畸变等因素影响，导向矢量真实值与期望值存在误差，使得 STMV 性能大幅度下降。而稳健 STMV 波束形成利用椭圆不确定集，在一定误差约束范围内寻找最优导向矢量，使得阵列输出功率最大。

对于均匀线阵，若将各阵元输出信号作快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)，得到各阵元在频率 f_k 的频域数据向量 $\mathbf{X}(f_k)$ ，则入射 θ 方向的阵列导向矢量^[11]为

$$\mathbf{a}(f_k, \theta) = [e^{-j2\pi f_k \tau_1(\theta)}, e^{-j2\pi f_k \tau_2(\theta)}, \dots, e^{-j2\pi f_k \tau_N(\theta)}]^T \quad (6)$$

式中， $\tau_i(\theta) = (i-1)d \cos(\theta) / c$ 为第 i 个阵元相对参考阵元的延时。经过预处理后的频域数据向量 $\mathbf{Y}(f_k, \theta)$ 为

$$\mathbf{Y}(f_k, \theta) = \mathbf{T}(f_k, \theta) \mathbf{X}(f_k) \quad (7)$$

式中， $\mathbf{T}(f_k, \theta)$ 为对角驱动矩阵^[11]，其对角元素为阵列导向矢量。名驱动矩阵表达式为

$$\mathbf{T}(f_k, \theta) = \text{diag}[e^{-j2\pi f_k \tau_1(\theta)}, e^{-j2\pi f_k \tau_2(\theta)}, \dots, e^{-j2\pi f_k \tau_N(\theta)}] \quad (8)$$

根据式(7)和式(8)， $\mathbf{T}(f_k, \theta) \mathbf{a}(f_k, \theta) = \mathbf{I}$ ^[11]。对于一定带宽的信号，导向协方差矩阵^[11]可表示为

$$\mathbf{R}_{\text{STCM}}(\Delta f, \theta) = \sum_{k=1}^K \mathbf{T}(f_k, \theta) \mathbf{R}(f_k) \mathbf{T}^H(f_k, \theta) \quad (9)$$

式中， $\mathbf{R}(f_k)$ 为频率 f_k 的互谱密度矩阵， Δf 为处理的频带范围。若对导向协方差矩阵 $\mathbf{R}_{\text{STCM}}(\Delta f, \theta)$ 进行特征分解，则有：

$$\mathbf{R}_{\text{STCM}}(\Delta f, \theta) = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^H \quad (10)$$

式中， $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N)$ ，为特征值组成的对角矩阵， \mathbf{U} 为对应的特征向量，特征值要求从大到小排列。

由于实际中真实的信号到达方位是未知的，其导向矢量 $\tilde{\mathbf{a}}(f_k, \theta)$ 也未知，一般需要通过预成方位进行计算得到假想的导向矢量 $\bar{\mathbf{a}}(f_k, \theta)$ 。因此，真实导向矢量与假想导向矢量存在误差即 $\tilde{\mathbf{a}}(f_k, \theta) \neq \bar{\mathbf{a}}(f_k, \theta)$ 时，可以用 RCB 方法求解最优导向矢量，稳健 RCB 波束形成^[11]问题可表述为

$$\min_a \mathbf{a}(f_k, \theta)^H \mathbf{R}(f_k) \mathbf{a}(f_k, \theta), \quad \text{s.t.} \|\mathbf{a}(f_k, \theta) - \bar{\mathbf{a}}(f_k, \theta)\|^2 \leq \varepsilon_0 \quad (11)$$

式(11)中， ε_0 为 $\mathbf{a}(f_k, \theta)$ 与 $\bar{\mathbf{a}}(f_k, \theta)$ 间的误差限。若将导向协方差矩阵与 RCB 结合起来，则稳健 STMV 的优化问题可化为

$$\min_b \mathbf{b}(f_k, \theta)^H \mathbf{R}_{\text{STCM}}(\Delta f, \theta) \mathbf{b}(f_k, \theta),$$

$$s.t. \|\mathbf{b}(f_k, \theta) - \bar{\mathbf{b}}(f_k, \theta)\|^2 \leq \varepsilon \quad (12)$$

式(12)中, ε 为 $\mathbf{b}(f_k, \theta)$ 与 $\bar{\mathbf{b}}(f_k, \theta)$ 间的误差限, $\mathbf{b}(f_k, \theta) = \mathbf{T}(f_k, \theta) \mathbf{a}(f_k, \theta)$, $\bar{\mathbf{b}}(f_k, \theta) = \mathbf{T}(f_k, \theta) \bar{\mathbf{a}}(f_k, \theta)$ 。利用拉格朗日乘法对式(12)进行求解, 令构造函数为

$$F(\mathbf{b}, \lambda) = \mathbf{b}(f_k, \theta)^H \mathbf{R}_{\text{STCM}}(\Delta f, \theta) \mathbf{b}(f_k, \theta) + \lambda (\|\mathbf{b}(f_k, \theta) - \bar{\mathbf{b}}(f_k, \theta)\|^2 - \varepsilon) \quad (13)$$

其中, λ 为拉格朗日乘子。对式(13)求导, 并令导数为 0, 则有

$$\mathbf{R}_{\text{STCM}}^{-1}(\Delta f, \theta) \mathbf{b}(f_k, \theta) + \lambda (\mathbf{b}(f_k, \theta) - \bar{\mathbf{b}}(f_k, \theta)) = 0 \quad (14)$$

根据式(14)可得到 $\mathbf{b}(f_k, \theta)$ 的解为

$$\hat{\mathbf{b}}(f_k, \theta) = (\mathbf{R}_{\text{STCM}}^{-1} / \lambda + \mathbf{I})^{-1} \bar{\mathbf{b}}(f_k, \theta) \quad (15)$$

令 $\mathbf{z} = \mathbf{U}^H \mathbf{I}$, 并代入式(15), 通过推导可得:

$$g(\lambda) = \sum_{m=1}^N \frac{|z_m|^2}{(1 + \lambda \gamma_m)^2} = \varepsilon \quad (16)$$

由式(16)可知, $g(\lambda)$ 是关于 λ 的单调递减函数, 且 $g(0) > \varepsilon$, $\lim_{\lambda \rightarrow \infty} g(\lambda) = 0 < \varepsilon$, λ 的唯一解可由式(16)得出。定义特征值 γ 的最小值为 γ_M , 最大值为 γ_L , γ_M 和 γ_L 可由式(16)唯一确定。 λ 的范围限定为

$$\frac{\|\bar{\mathbf{b}}\| - \sqrt{\varepsilon}}{\gamma_L \sqrt{\varepsilon}} \leq \lambda \leq \min \left\{ \frac{\|\bar{\mathbf{b}}\| - \sqrt{\varepsilon}}{\gamma_M \sqrt{\varepsilon}}, \left(\frac{1}{\varepsilon} \sum_{m=1}^N \frac{|z_m|^2}{\gamma_m^2} \right)^{1/2} \right\} \quad (17)$$

根据牛顿迭代法, 利用式(17)求解得到 λ , 将 λ 代入式(15)得到估计的导向向量 \mathbf{b} , 则稳健 STMV(Robust Steered Minimum Variance, RSTMV) 的权向量为

$$\mathbf{W}_{\text{RSTMV}}(\theta) = \frac{\mathbf{R}_{\text{STCM}}^{-1}(\Delta f, \theta) \hat{\mathbf{b}}(f_k, \theta)}{\hat{\mathbf{b}}^H(f_k, \theta) \mathbf{R}_{\text{STCM}}^{-1}(\Delta f, \theta) \hat{\mathbf{b}}(f_k, \theta)} \quad (18)$$

稳健 STMV 自适应波束形成的频域输出为

$$B_{\text{RSTMV}}(f_k, \theta) = \mathbf{W}_{\text{RSTMV}}^H(\theta) \mathbf{Y}(f_k, \theta) \quad (19)$$

3 宽带稳健相关检测

根据上述分析可知, 宽带相关检测在强目标的旁瓣处形成凹陷, 使得凹陷附近的弱目标检测能力降低。由于宽带稳健自适应波束形成具有较强的旁瓣抑制能力, 可降低旁瓣对邻近方位目标的影响。因此, 本文采用宽带相关结合稳健自适应波束形成的检测方法, 在强干扰目标背景下, 能提高弱目标的检测能力。先利用分裂阵处理思想, 将接收阵分为两相同子阵, 对其进行宽带稳健 STMV 处理。然后将分裂波束输出进行宽带相关处理, 并预白化相关检测谱。对处理后的互谱做逆傅里叶变换得到时延值, 波束输出即为预成波束角附近的相关值。宽带稳健 STMV 相关检测的处理流程见图 1。该算法对于宽带相关检测方法的改进在于, 子阵常规波数

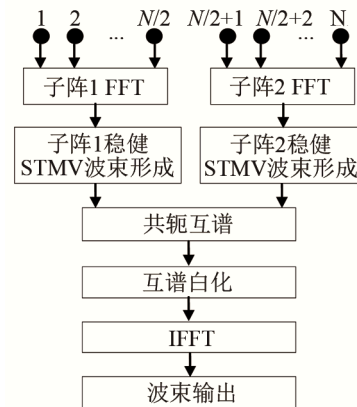


图 1 宽带稳健相关检测流程图

Fig.1 Flow chart of robust broadband correlation detection

形成替换为子阵稳健 STMV 波数形成。

4 仿真及试验数据计算

4.1 阵列数据仿真计算

仿真半波长布阵的均匀线列阵, 阵元数为 100。设目标 1 的方位角为 80° , 带宽为 1500 Hz, 信噪比为 -10 dB; 设目标 2 的方位角为 85° , 带宽 1000 Hz, 信噪比为 15 dB。将线列阵等分为两个相同子阵, 两子阵均以该线列阵的第一个阵元为参考点。

图 2 给出了常规宽带相关检测和宽带稳健相关检测的仿真结果。从图 2 可以看出, 常规相关检测在强目标的旁瓣处形成两个对称的凹陷, 目标能量越强, 其旁瓣凹陷就越深, 这使得处于凹陷附近的 80° 弱目标不易检测; 宽带稳健相关检测利用 STMV 旁瓣抑制能力强的特点, 在保持强目标峰值不变的情况下, 能有效抑制强目标的旁瓣凹陷, 使处于凹陷邻近的信号得以检测, 提高了弱目标的检测能力。在仿真中宽带稳健相关检测方法输出的子阵相关系数由常规相关检测方法的 0.1474 提高至

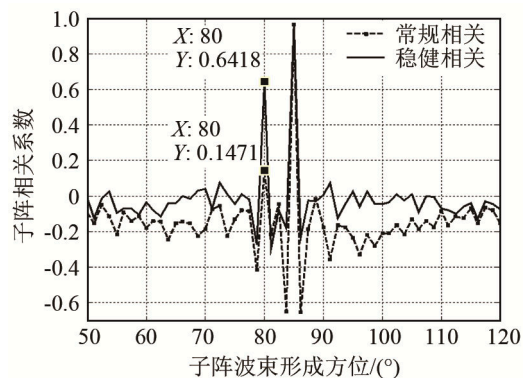


图 2 常规宽带相关检测和宽带稳健相关检测的仿真结果对比
Fig.2 Comparison between the simulation results of common broadband correlation detection and broadband robust correlation detection

0.6418, 显著提高了对弱目标的检测能力。

4.2 海试数据处理

以某次海上试验数据为例, 阵型为均匀线列阵, 对该数据进行宽带稳健自适应相关处理。在试验时存在一强干扰目标, 方位从 135°变化至 150°。

图 3 为常规宽带相关检测处理历程图, 图 4 为宽带稳健自适应相关检测处理历程图。为了更加直观地显示目标检测结果, 图 5 给出在 51 s 时刻两种

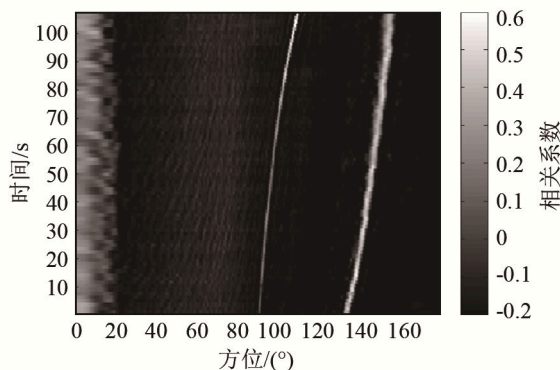


图 3 常规宽带相关检测处理历程图

Fig.3 Processing course diagram of common broadband correlation detection

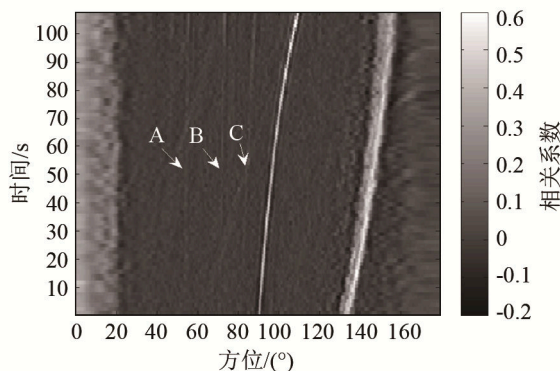


图 4 宽带稳健相关检测处理历程图

Fig.4 Processing course diagram of broadband robust correlation detection

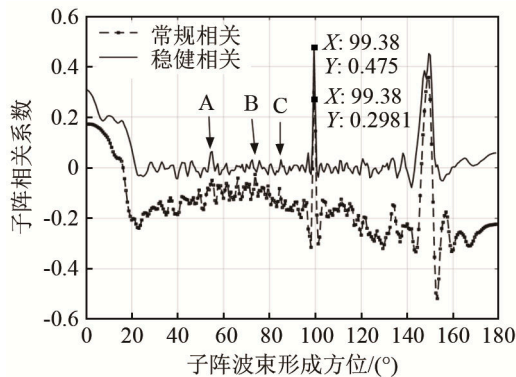


图 5 海试数据的宽带稳健自适应相关检测与常规宽带相关检测对比

Fig.5 Comparison between broadband robust correlation detection and common broadband correlation detection of sea trial data

方法的输出对比图。在图 3 中可以看到 2 个目标, 图 4 中增加了 3 个弱目标轨迹(A、B、C)。从图 5 可以看出, 方位 100°目标的相关系数由 0.2981 提升至 0.475, 同时, 弱目标 A、B、C 的峰值也得到明显改善。可看出稳健 STMV 与相关检测相结合的方法, 可以有效提高目标对应的子阵间的相关性, 从而提高强干扰背景下的弱目标检测能力。

5 结论

本文通过分析宽带相关检测中波束旁瓣产生凹陷的原因, 利用宽带稳健自适应波束形成较好的旁瓣抑制能力和阵列误差容错特性, 结合宽带相关检测高分辨率的特点, 提出了一种宽带目标检测新方法。模拟仿真计算和海试数据的处理结果, 验证了所提方法的优越性。该方法能有效抑制强干扰目标旁瓣凹陷, 提高了被动声呐宽带检测性能。

参 考 文 献

- [1] WAITE A D. 实用声纳工程[M]. 3 版. 王德石译. 北京: 电子工业出版社, 2004.
WAITE A D. Sonar for practising engineers[M]. Third Edition. WANG Deshi, translate. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [2] MA Q M, ZHOU L S, DU S P. Research of the weak signal detection algorithm for tow sonar based on the phase difference of the sub-array beam output[C]//UDT 2009 Europe.
- [3] FUMITAKA M, KURAMOTO K. Development of underwater low-speed moving target detection using spatiotemporal variance of phase difference for port surveillance sonar[J]. J. Acoust. Soc. Jpn., 2010, 37(1): 34-45.
- [4] 蒋小勇, 谭君红, 周胜增. 分裂阵宽带相关检测在圆柱阵中应用[J]. 舰船科学技术, 2017, 8(8): 160-163.
- [5] KROLIK J, SWINGLER D. Multiple broadband source location using steered covariance matrices[J]. IEEE Acoustics Speech and Signal Processing, 1989, 37(10): 1481-1494.
- [6] LI J, STOICA P, WANG Z S. On robust capon beamforming and diagonal loading[J]. IEEE Signal Processing, 2003, 51(7): 1702-1715.
- [7] SOMASUNDARAM S D. Wideband robust capon beamforming for passive sonar[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, 38(2): 308-322.
- [8] SOMASUNDARAM S D, JAKOBSSON A. Low-complexity uncertainty set based robust adaptive beamforming for passive sonar[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1996, 6: 3045-3048.
- [9] ZARNICH R E. A fresh look at broadband passive sonar processing[C]//Adaptive Sensor Array Processing Workshop, 1999: 99-104.
- [10] 杜选民, 周胜增, 高原. 声纳阵列信号处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
DU Xuanmin, ZHOU Shengzeng, GAO Yuan. Array signal processing techniques for sonar[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018.
- [11] 鄢社锋, 马远良. 传感器阵列波束优化设计及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
YAN Shefeng, MA Yuanliang. Sensor array beampattern optimization theory with applications[M]. Beijing: Science Press, 2009.