

固定干扰抑制的声场匹配方法

张 猛^{1,2}, 黄晓砥¹

(1. 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘要: 利用波导中的声场匹配与自由空间中的阵列处理的相似性, 从自由空间的阵列零点方法出发推导一种适用于波导中垂直阵列声场匹配的抑制固定干扰的方法。通过声场模型预报已知空间位置干扰的声传播特征, 形成空间矢量。在保持期望点增益的前提下, 约束干扰点邻域增益, 得到垂直阵列的零点指向干扰的阵列权向量。

关键词: 干扰; 阵列信号处理; 声传播; 匹配场处理

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-02-0184-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.02.013

A matched acoustic field method with the fixed interference suppression

ZHANG Meng^{1,2}, HUANG Xiao-di¹

(1. State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduation University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Taking advantages of the similarity between the matched acoustic field in the wave-guide and the array processing in the free space, a new method of suppressing the fixed interference for vertical array MFP in the wave-guide is obtained by the array zero point in the free space. The space vector can be got by forecasting the sound propagation character with the interference whose location is known by the acoustic field model. The array weighting vector of the interference in the direction of the zero points of the vertical array can be given as keeping the anticipant point gain and restricting the interference point neighborhood gain.

Key words: interference; array single processing; sound propagation; Matched Field Processing(MFP)

0 引言

匹配场阵列处理摒弃了阵列接收信号平面波到达的假设条件, 在获得阵列增益的同时, 为获取更多目标的距离和深度等信息提供了可能。近 30 年来, 关于水声匹配场处理的论文大量出现, A. B. Baggeroer、W. A. Kuperman 和 P. Mikhalevsky 于 1993 年的综述文章^[1]总结了匹配场处理技术。A. Tolstoy 也出版了专著^[2]介绍这方面的发展。

匹配场处理方法应该有处理多目标的能力, 尤其是对弱目标的检测和定位的能力。利用垂直阵列进行弱目标的检测时极易受到强目标的干扰, 这使常规匹配场阵列处理方法检测弱目标的能力受到限制。特别是强干扰时目标的旁瓣影响显著且没有固定的模式, 旁瓣往往很高, 与主瓣的高度是相同量级, 出现的位置也随水文变化。因此, 匹配场阵

列处理方法近期的主要进展是围绕着抑制干扰、检测弱目标展开。

本文讨论了海洋波导中匹配场处理的干扰抑制问题, 并提出一种基于波导不变性的垂直阵列干扰抑制方法。采用类似自由空间的方法, 将垂直阵列的零点指向干扰位置。与自由空间方法不同的是, 这种将阵列零点指向干扰位置的阵列权矢量需要通过声场计算和干扰位置确定。利用阵列接收信号互谱矩阵的波导不变性扩展零点在 $r-\omega$ 平面上的范围, 提高阵列抑制干扰的能力。

1 阵列抑制干扰的常规方法

在阵列的观察方向以外, 阵列的响应并不为零。即除了阵列正在观测的期望目标以外, 其他干扰信源的信号可能通过主瓣或旁瓣(主瓣以外的次极大值)进入阵列的波束输出, 影响期望信号的正常接收。这种干扰的损害在很多情况下对声纳系统而言是致命的。常规的相控阵信号^[3]接收系统的信噪比(SINR)极易因之而降低, 在声对抗战术中, 如不进行干扰抑制会导致系统无法正常工作。

收稿日期: 2011-12-05; 修回日期: 2012-02-07

作者简介: 张猛(1982-), 男, 吉林人, 硕士研究生, 研究方向为分布式光纤传感。

通讯作者: 张猛, E-mail: zhangmeng06@mails.gucas.ac.cn

波束方向响应图中除了有高低不一的峰值到达角以外，还有阵列波束方向响应为零的特殊到达角，称这些到达角为阵列的零点。如能控制零点使之指向干扰，同时保持期望目标的方向的响应不变，则可以在阵列的输出中排除干扰对波束输出的影响。

通过调整相控阵的权矢量可以使阵列的零点指向干扰。控制零点指向干扰的过程可以用下面的模型来表示

$$\begin{aligned} \mathbf{W}^H \mathbf{X}_S &= \mathbf{S} \\ \text{and} & \\ \mathbf{W}^H \mathbf{X}_I &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

\mathbf{X}_S 为阵列接收期望目标信号， \mathbf{X}_I 为阵列接收的干扰信号源信号，可以是多个干扰信号矢量并列的矩阵。只要目标和干扰的个数小于阵元的个数，上述的零点指向干扰的做法是可以实现的。将阵列接收信号矢量与阵列方向矢量代入式(1)可得

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{W}^H \mathbf{X}_S &= \mathbf{S} \\ \text{and} & \\ \mathbf{W}^H \mathbf{X}_I &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (2)$$

$$\mathbf{W}^H [a_s \ a_{i1} \ a_{i2} \ \dots] = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] \Rightarrow \mathbf{A}^H \mathbf{W} = \mathbf{f}$$

其中 $\mathbf{A} = [a_s \ a_{i1} \ a_{i2} \ \dots]$ 和 $\mathbf{f} = [1 \ 0 \ 0 \ \dots]^T$ 。一般情况下上式为多解方程， \mathbf{W} 的最优解应是使阵列输出中各向同性噪声功率最小。加权阵中每个阵元的各向同性噪声的输出为 $w_i \sigma_n^2 w_i$ ，则阵列波束输出中的各向同性噪声功率为权矢量内积和噪声的方差 σ_n^2 的乘积。即：

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &= \arg \min_{\mathbf{W}} \mathbf{W}^H \mathbf{W} \\ \text{subject to} & \\ \mathbf{A}^H \mathbf{W} &= \mathbf{f} \end{aligned} \quad (3)$$

上面的问题就实质为多约束的最优化问题。利用拉各朗日乘数法求解最优权矢量，构造代价函数

$$\mathbf{H}(\mathbf{W}) = \frac{1}{2} \mathbf{W}^H \mathbf{W} - \boldsymbol{\lambda}^H (\mathbf{A}^H \mathbf{W} - \mathbf{f}) \quad (4)$$

其中 $\boldsymbol{\lambda}$ 为拉各朗日乘数列矢量。如果式(4)为 \mathbf{W} 的二次型且二次项系数为正，那么其导数的零点对应代价函数的最小值点。求代价函数的导数使之为零：

$$\frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{W})}{\partial \mathbf{W}} = \mathbf{W} - \mathbf{A} \boldsymbol{\lambda} = 0 \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)的约束中，有

$$\mathbf{A}^H \mathbf{A} \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{f} \quad (6)$$

如果空间采样满足奈奎斯特采样定理，则角度不同的方向矢量线性无关， $\mathbf{A}^H \mathbf{A}$ 为满秩矩阵：

$$\mathbf{W} = \mathbf{A} (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{f} \quad (7)$$

用上述零点指向方法得到的阵列波束方向响

应如图 1 所示。阵列 16 阵元均匀线阵(ULA)，入射窄带信号中心频率满足 $f=c/4d$ ，阵列的零点对准 80° 和 120° ，观察方向为 50° 。图 1 中粗实线为控制零点权矢量的波束方向响应，虚线为常规相控阵的波束方向响应。细点划线为设定的干扰方向，粗点划线为观察方向。

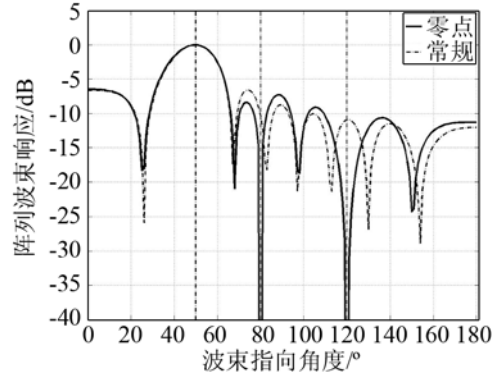


图 1 控制零点指向相控阵的波束方向响应
Fig.1 Beam response of the phased array with controlling the direction to zero point

2 匹配场阵列处理的干扰抑制方法

在干扰抑制方面主要解决两方面的问题：

- (1) 如何在阵列波束形成得到信号源信号时避免干扰的影响；
 - (2) 如何在估计空间谱时避免干扰的影响。
- 这两方面的问题性质有差异，应用也不尽相同。前者在预知期望信号信源位置的情况下，通过阵列增强信号，得到信源发射信号的估计；后者在未知目标位置时通过阵列的处理判断信源可能位于的空间位置。这里讨论在波束形成时利用零点指向干扰的抑制干扰方法。

仿照第 1 节自由空间中抑制干扰的做法，利用离散空间采样的阵列实现在海洋波导中抑制干扰处理，这个过程实际是在“距离—深度”二维匹配模糊度表面上实现在干扰位置阵列相应的零点。形成零点的方法有零点指向和自适应两类方法，其中零点指向是在指定的深度和距离的点周围形成阵列响应很低的零陷，而自适应方法使这个零陷自动指到干扰所在的位置上。当干扰位置到阵列的传递函数矢量与期望目标的阵列传递函数矢量接近时，上述两种方法形成的阵列权矢量会有较高的白噪声增益损失。

阵列抑制干扰的稳健性是这种方法能够实用的前提，利用波导不变性可有效地提高阵列抑制干扰的能力并且具有对目标位置估计误差的宽容性。

类比于前节阵列的波束方向响应，定义“阵列

Bartlett 匹配处理的波束响应”为

$$Y(z, r, f) = \frac{|H^H(z_e, r_e, f)H(z, r, f)|}{|H^H(z_e, r_e, f)||H(z, r, f)|} \quad (8)$$

其中： $H(z_e, r_e, f)$ 为对于频率 f 、期望位置 (z_e, r_e) 的阵列传递函数矢量； $H(z, r, f)$ 为目标可能出现的位置 (z, r) 的阵列传递函数矢量， $Y(z, r, f)$ 为频率 f 上的阵列匹配处理的波束响应。在一定频率范围内的阵列匹配处理的波束响应为

$$Y(z, r) = \sum_i \frac{|H^H(z_e, r_e, f_i)H(z, r, f_i)|}{|H^H(z_e, r_e, f_i)||H(z, r, f_i)|} \quad (9)$$

其它匹配处理器的波束响应的定义类似，不一赘述。阵列匹配处理的波束响应表示在无失配情况下，阵列“指向”期望位置 (z_e, r_e) 时，各个目标可能出现的位置的匹配处理归一化相关结果。在这个结果中，期望位置 (z_e, r_e) 的相关值为 1，其他位置的相关值的大小和分布将直接关系到匹配算法的性能。它和匹配处理模糊表面的区别在于：模糊表面是对测量场相关匹配的结果，匹配值代表了期望目标在某位置出现的可能性；而匹配处理的波束响应是目标在某位置出现时，整个场内的匹配值的分布。阵列匹配处理的波束响应的意义在于能够揭示干扰如何影响期望目标阵列处理。

海洋波导中阵列的传递函数矢量不像自由空间阵列的方向矢量仅与期望方向有关，而是随阵列的形式、海洋的环境参数以及期望目标的空间位置（不仅仅是角度）有明显的改变。通常的做法是在特定的环境参数下，以一定的方式（例如等步长网格）划分期望观察的区域，求取每个网格点相对于阵列的传递函数矢量，进行匹配场处理。不失一般性，采用等温层水文，声速为 1447.7 m/s，海底密度、声速和衰减系数分别为 1.87 g/cm³，1587 m/s 和 0.15 dB/λ，说明海洋波导中阵列抑制干扰的方法。选取距离接收阵列位置水平距离 5~10 km，深度 0~100 m 的范围为期望观测的区域。网格如图 2 所示，在这一距离-深度平面内的均匀网格水平间距为 20 m，垂直间距为 2 m。接收阵列为间距 5 m 的 16 元垂直阵列，布放在水下 10~90 m 处，阵列传递函数变量由 BDMR 理论计算^[4]。

在上述网格区域典型的阵列 Bartlett 匹配处理的波束响应如图 3 所示。

期望目标位置为距离 7 km，深度 40 m 的网格点。图 3 的结果为 95~145 Hz 内的 10 个频点波束响应的累加结果。从图 3 中可以看出，波束响应二维平面上除期望点以外，其他点亦有比较高的匹配值。这使得当有较强的其它目标出现时，期望目标

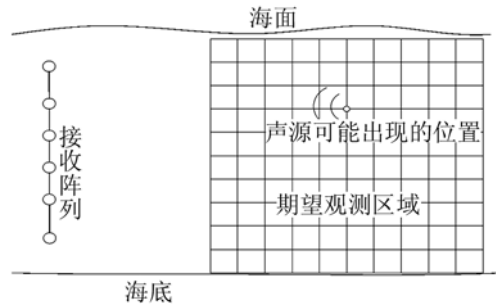


图 2 匹配场处理示意
Fig.2 Matched field processing

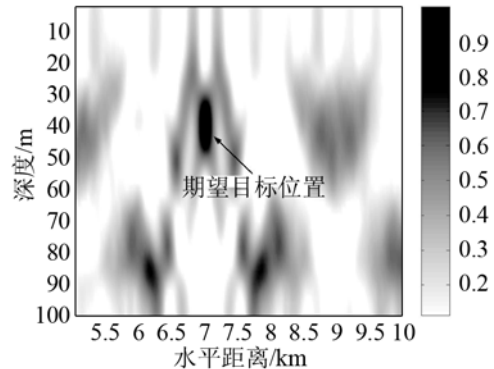


图 3 阵列匹配处理的波束响应
Fig.3 Beam response of the array matched processing

的匹配场处理结果将变差，甚至不能处理出有效的结果。

当接收信号中有两个目标信号成份时，两个信号互为干扰。图 4 示例了在强干扰情况下的阵列匹配的模糊度表面。例中海面干扰位于 9 km、深度 10 m，功率是期望目标的 4 倍。可以看到由于有海面干扰的存在，从模糊度的二维图上几乎看不到期望目标的匹配结果。这是由于在阵列对准期望目标时，干扰点的声强通过其旁瓣影响了阵列对准期望点波束形成。对于期望目标而言，干扰的旁瓣随干扰位置的不同有十分复杂的变化规律，但是当声场准确预报和干扰位置预知的情况下，可以掌握并利用这种规律使其对期望目标的干扰降至最低。

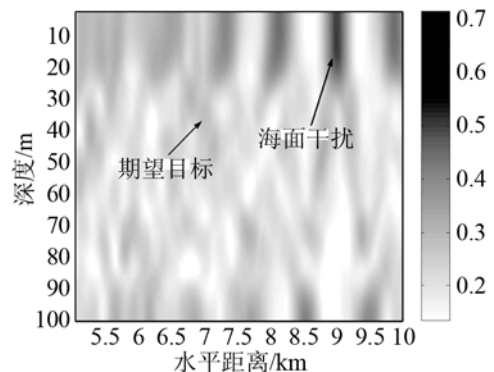


图 4 强干扰下的阵列匹配的模糊度表面
Fig.4 The ambiguity surface of a weak target in the presence of a strong interference

从上节关于自由空间抑制干扰的讨论可知：改变阵列的加权矢量有可能实现抑制干扰。设干扰源位于 i_1, i_2, \dots, i_n 点，对应的阵列传递函数矢量为 $H_{i1}, H_{i2}, \dots, H_{in}$ ；期望观察的空间点为 s 点，对应的阵列传递函数矢量为 H_s ，则抑制干扰的最优权矢量为

$$W = H(H^H H)^{-1} f \tag{9}$$

其中 $H = [H_s \ H_{i1} \ H_{i2} \ \dots \ H_{in}]$ ， $f = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]^H$ 。权矢量 W 对于期望点的响应为 1，对于干扰点的响应为 0。设各声源信号为 S_s 和 $S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{in}$ 由于 $X = [H_s \ H_{i1} \ H_{i2} \ \dots \ H_{in}][S_s \ S_{i1} \ S_{i2} \ \dots \ S_{in}]^H = HS$ ，则 $y = W^H X = f^H (H^H H)^{-1} H^H HS = S_s$ (10)

即能够实现期望信号的波束形成。

权矢量的波束响应由图 5 给出。由图 5 可见，

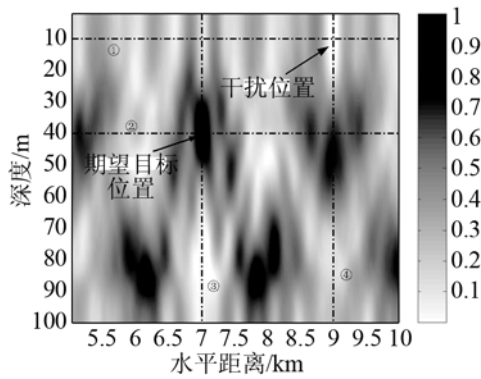


图 5 权矢量的波束响应
Fig.5 Beam response of the weighting vector

在干扰的位置上，这个处理方法上的输出为接近零。在阵列对准期望点波束形成时，阵列将不受点声源干扰的影响，有效实现了对弱目标的定位。

3 结论

常规 Bartlett 匹配器的旁瓣较高，如不进行对干扰位置施以零点阵列将无法正常的波束形成。通过最优化权向量，将波束响应的零点对准干扰位置，可以有效抑制干扰对匹配场处理的影响。

应指出零点方法的应用是有限制的，当干扰点相对于阵列的传递函数矢量与期望点的传递函数矢量接近时，这种方法得到的权矢量有较高的白噪声增益损失。对于目标快速运动和非点声源的情况，需要更宽的零点，将另文讨论这种方法的稳健性。

参 考 文 献

- [1] Baggeroer A B, Kuperman W A, Mikhalevsky P N. An overview of matched-field methods in ocean acoustics[J]. IEEE J. Oceanic Eng., 1993, 18(4): 401-424.
- [2] Tolstoy A. Matched Field Processing for Underwater Acoustic[M]. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore, 1993.
- [3] Compton R T. Adaptive antennas: concepts and performance[M]. National Defense Industry Press, 1988.
- [4] ZHANG Renhe, LI Fenghua. Beam-displacement ray mode theory of sound propagation in shallow water[J]. Science in China (Series A), 1999, 29(3): 241-251.