

基于信号重构的阵列失效校准方法

徐朝阳, 章新华, 康春玉

(海军大连舰艇学院信号与信息技术研究中心, 大连 116018)

摘要: 针对失效阵元给阵列性能带来的影响, 提出一种基于信号重构的阵列失效校准方法。对于理想的均匀分布线列阵, 2 个相邻阵元相对同一信号源的接收信号之间仅相差一个固定的相移。利用这一点, 原本已经失真的失效阵元的输出可以通过合成其他正常阵元的输出信号得到恢复, 在一定程度上抑制了阵列失效带来的旁瓣增长。仿真结果表明该方法是可行、有效的。

关键词: 信号重构; 阵列失效校准; 波束形成

Array Failure Correction Method Based on Signal-reconstruction

XU Zhao-yang, ZHANG Xin-hua, KANG Chun-yu

(Research Center of Signal Information, Dalian Naval Academy, Dalian 116018)

【Abstract】 Failed elements can seriously degrade the performance of an array and a method for array failure correction based on signal-reconstruction is presented. The received signals at neighbouring elements differ only by a constant phase coefficient in an ideal equispaced linear array, so the distorted output of the failed elements can be reconstructed by synthesizing the output signals of neighbouring elements and the degraded sidelobe level can be partially compensated. The method is proved to be effective with the simulation.

【Key words】 signal-reconstruction; array failure correction; beamforming

1 概述

阵列信号处理是信号处理领域的一个重要研究方向, 在雷达、声纳等系统中得到了广泛的应用。利用空间传感器阵列对信号进行接收和处理, 不仅可以获得足够高的信噪比, 同时还具有良好的目标方位分辨能力。而失效阵元会破坏阵列的几何对称性, 使阵列响应发生锐变, 同时造成阵列波束形成器空间功率谱的旁瓣显著升高, 给阵列的性能带来了消极的影响^[1]。因此, 在阵元失效的情况下如何对阵列进行校准已经成为人们日益关心的问题。一般来讲, 阵列失效校准可以从 2 个方面入手, 一种方法是根据期望的阵列波束图对剩余正常阵元的权重进行重优化^[2-3]; 另一种方法是保持各阵元的权重不变, 利用其他正常阵元的输出信号重构失效阵元的输出, 从而保证波束形成器输入信号的完整性^[4-5]。

在声纳系统中, 均匀分布线列阵是最为常用的基阵形式。相对于平面阵, 线列阵的阵元数目一般较少, 阵元失效带来的影响也更为显著。本文探讨了一种利用重构失效阵元输出信号进行失效线列阵校准的方法。

2 模型与算法

考虑由多个各向同性水听器阵元组成的均匀分布线列阵接收位于基阵远场的窄带入射信号的情况, 如图 1 所示。假设基阵阵元个数为 N , 阵元间距为 d , 信号源 $s_i(t)$ 相对于基阵的入射方位角为 θ_i 。此时, 基阵第 m 个阵元的输出为

$$x_m(t) = F_m(t) + n_m(t) \quad (1)$$

其中, $F_m(t)$ 表示第 m 个阵元接收到的信号; $n_m(t)$ 表示第 m 个阵元上的加性噪声。在以下的讨论中假设信噪比足够大, 可以忽略阵元的加性噪声, 认为阵元输出与阵元接收到的信号 $F_m(t)$ 相等。由均匀分布线列阵的几何特征和上述假设可得

$$F_m(t) = s_i(t)e^{j(m-1)A} \quad (2)$$

其中, $A = 2\pi f_c d \sin(\theta_i) / c$; f_c 为入射信号的中心频率; c 为海洋参考声速。

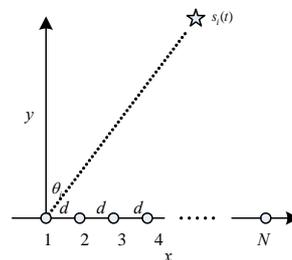


图 1 均匀分布线列阵对远场窄带信号的接收

若基阵远场共有 P 个信号源, 则

$$F_m(t) = \sum_{i=1}^P s_i(t)e^{j(m-1)A_i} \quad (3)$$

同样, 基阵的第 n 个阵元接收到的信号 $F_n(t)$ 可以表示为

$$F_n(t) = \sum_{i=1}^P s_i(t)e^{j(n-1)A_i} = \sum_{i=1}^P [s_i(t)e^{j(m-1)A_i}] e^{j(n-m)A_i} \quad (4)$$

由式(4)可知, 不同阵元相对于同一信号源的接收信号之间存在一个固定的相移, 该相移仅与阵元的位置、入射信号的方位以及入射信号的中心频率有关。这便是利用其他阵元的输出重构失效阵元输出信号的基本依据。

假设基阵第 n 个阵元为失效阵元, 则其实际输出近似为零。此时为了保证波束形成器输入信号的完整性, 需要利用其他正常阵元的输出重构其输出信号。若基阵远场仅存在单

作者简介: 徐朝阳(1980 -), 男, 博士研究生, 主研方向: 水声信号处理; 章新华, 教授、博士、博士生导师; 康春玉, 讲师、博士研究生

收稿日期: 2008-05-14 **E-mail:** doublexu1980@sina.com

个信号源, 问题将变得非常简单, 可以直接利用式(4)由其他阵元的输出得到 $F_n(t)$ 。若基阵远场存在多个信号源, 问题将变得复杂, 在利用式(4)重构 $F_n(t)$ 时必须将来自不同信号源的入射信号分离开来。以下重点探讨如何实现源信号的分离。

一般情况下, 当基阵存在失效阵元时, 需要保证工作正常的阵元个数大于入射的信号源个数 P 。此时, 从工作正常的阵元中任意选取 P 个(不失一般性, 假设选取从第 k 个阵元开始的连续 P 个阵元), 利用它们的输出构成如下的方程组:

$$\begin{cases} F_k(t) = \sum_{i=1}^P s_i(t) e^{i(k-1)A} \\ F_{k+1}(t) = \sum_{i=1}^P s_i(t) e^{ikA} \\ \dots \\ F_{k+P-2}(t) = \sum_{i=1}^P s_i(t) e^{i(k+P-3)A} \\ F_{k+P-1}(t) = \sum_{i=1}^P s_i(t) e^{i(k+P-2)A} \end{cases} \quad (5)$$

如果每个信号源的入射方位角及中心频率已知, 通过线性迭代求解上述方程组就能够实现源信号的分离, 得到参考阵元相对于各信号源的接收信号。接着, 便可以根据式(4)重构每一个失效阵元的接收信号, 实现阵列校准。

上述算法在重构失效阵元的输出信号时, 要求已知各信号源的精确入射方位。但是在实际的海洋环境中, 信号源的数目以及各信号源的入射方位角一般未知, 此时算法的应用可以分为不同的情况。如果已知信号源的大致方位, 可以在信号源的周边区域内均匀地设置若干虚拟信号源, 然后按照这些虚拟信号源的数目和方位进行阵列校准。如果完全不知道信号源的方位, 可以首先根据校准前得到的阵元输出直接进行波束形成, 预估出各信号源的大致方位, 再通过上述算法进行阵列校准, 改善阵列的性能。

3 仿真与结论

考虑阵元间隔为半波长、具有 32 个阵元的等距线列阵, 波束形成采用均匀加权。远场存在 2 个信号源, 相对基阵的入射角分别为 -5° 和 10° , 到达基阵时的信噪比均为 10 dB。假设阵元 4, 11, 16 失效, 阵列波束形成器的空间功率谱如图 2 所示。

(上接第 254 页)

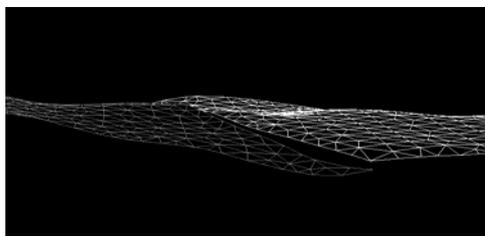


图 5 拟合后层位面

由图 5 可见, 在交线附近的网格形状有所变化, 形成了裂缝, 较好地体现了断层对层位的切分效果。

5 结束语

本文针对在三维地质建模领域中进行网格曲面重建的特点, 综合几何信息和地质信息, 提出以“移动立方体”为关键技术, 重建出层位和断层曲面, 并在交线附近对层位面进行基于二次误差测度方法的网格拟合处理, 从而反映出地质曲面的真实情况。下一步将综合考虑

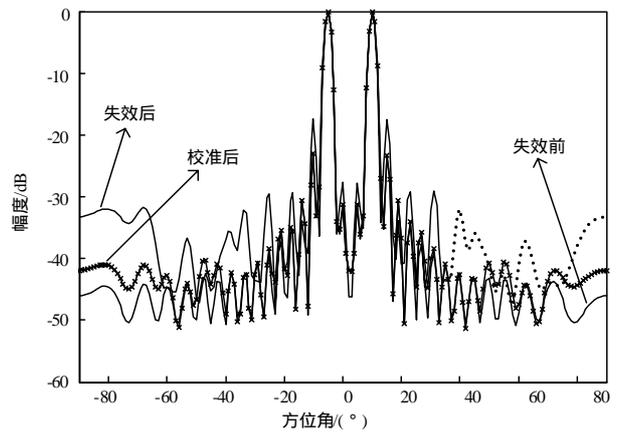


图 2 阵列波束形成器的空间功率谱

由图 2 可知, 当阵列存在失效阵元时, 谱图的旁瓣级明显升高, 阵列性能受到了影响。利用上述方法对阵列进行校准后, 谱图旁瓣重新得到抑制, 在主瓣附近区域校准后的谱图与阵元失效前的谱图基本重合, 在一定程度上改善了阵列的性能。

参考文献

- [1] Ramsdale D J, Howerton R A. Effect of Element Failure and Random Errors in Amplitude and Phase on the Sidelobe Level Attainable with a Linear Array[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68(3): 901-906.
- [2] Peters T J. A Conjugate Gradient-based Algorithm to Minimize the Sidelobe Level of Planar Arrays with Element Failures[J]. IEEE Trans. on Antennas Propagate, 1991, 39(10): 1497-1504.
- [3] Er M H, Hui S K. Beamforming in Presence of Element Failure[J]. Electronics Letters, 1991, 27(3): 273-275.
- [4] Mailloux R J. Array Failure Correction with a Digitally Beamformed Array[J]. IEEE Trans. on Antennas Propagate, 1996, 44(12): 1543-1550.
- [5] Steyskal H, Mailloux R J. Generalisation of an Array-failure-correction Method[J]. IEEE Trans. on Antennas Propagate, 1998, 46(4): 332-336.

拟合前交线的整体形状, 使拟合后的曲面更具有有效性和实用性。

参考文献

- [1] Hoppe H, Deroose T, Duchamp T, et al. Surface Reconstruction from Unorganized Points[J]. Computer Graphics, 1992, 26(2): 71-78.
- [2] Lorensen W, Cline H. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm[C]//Proc. of the SIGGRAPH'87. Anaheim, California, USA: [s. n.], 1987: 63-169.
- [3] 周儒荣, 张丽艳, 苏旭, 等. 海量散乱点的曲面重建算法研究[J]. 软件学报, 2001, 12(2): 249-255.
- [4] Graland M, Heckert P S. Surface Simplification Using Quadric Error Metrics[C]//Proc. of the SIGGRAPH'97. Los Angeles, USA: [s. n.], 1997: 209-216.
- [5] 王军安, 魏生民. 距离加权的二次误差测度网格简化算法[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2001, 13(2): 189-192.

