

采用分级聚焦波束形成的快速声成像算法*

谌颖 叶青华 黄海宁[†]

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 为了减小常规波束形成所需的庞大计算量以实现快速成像,本文提出了一种新的波束形成算法——分级聚焦波束形成。将基阵划分成各级子阵分级进行处理,对较短的子阵进行远场近似处理,逐级合并子阵进行子阵间的近场聚焦波束形成,并逐级进行波束插值。MATLAB 仿真计算结果表明,分级聚焦法与常规波束形成相比,计算量和数据存储量大幅下降。该方法尤其适用于多焦点近场聚焦的场合。

关键词 声成像,分级聚焦,近场聚焦,波束形成

A Fast Imaging Algorithm Using Multistage-Focusing Beamforming

CHEN Ying YE Qing-Hua HUANG Hai-Ning

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100190)

Abstract In order to reduce the huge computational task of conventional delay-sum beamforming so as to implement fast imaging, this paper describes a new algorithm of beamforming——multistage-focusing beamforming. The array is divided into subarrays and multistage processing is implemented. Conventional far-field beamforming is done for these short subarrays. At successive stages the near-field beams for pairs of subarrays are combined and additional beams are developed. The simulation results using MATLAB demonstrate that the multistage-focusing beamforming shows great savings in the computational load and the data storage compared with the conventional beamforming. This method is especially fit for the situation of multifocus focusing in the near field.

Key words Acoustic imaging, Multistage focusing, Near-field focusing, Beamforming

2006-09-05 收稿; 2007-01-04 定稿

* 本课题受国家自然科学基金资助项目(No. 60602054)

作者简介:谌颖(1983—),女,湖南人,硕士研究生,研究方向:水下声成像。

叶青华(1978—),男,助理研究员,博士。

黄海宁(1969—),男,研究员,博士,博士生导师。

[†] 通信联系人 E-mail: slchen@mail.ioa.ac.cn

1 引言

准确地探测到水下目标并对其进行精确定位和识别是声纳、鱼雷等水声设备的主要任务。水下信道比较复杂,目标信号总是掩蔽在各种噪声背景或混响背景干扰之中,因此要从各种干扰中提取目标信号的难度通常也较大。采用波束形成来实现目标方位估计是目前各种声纳系统普遍采用的方法。无论是主动声纳还是被动声纳,都需要有波束形成系统,它可以被看做是一种空间滤波器,使得接收基阵只在某一方向具有较高的灵敏度,同时抑制来自其他方向的噪声和干扰。传统的波束形成^[1,2]通常采用延时相加方法,对各个阵元接收的信号进行时延或相移,使其和目标方向矢量达到相同相位,从而形成极大值输出。这种方法既适用于窄带信号也适用于宽带信号,不过需要很大的计算量。因此,如何减小波束形成计算量得到了许多学者的关注^[3,4]。在水下声成像应用中经常会遇到近场聚焦的情况,除了计算量大,还会有数据存储量的问题,尤其在需要进行多个焦点聚焦的场合。如何实现快速成像是便携式成像声纳的一个关键问题。

本文提出了一种分级聚焦波束形成的算法,将一个较长的基阵分成若干个短的子阵,先对每个子阵进行远场波束形成,然后再对各个子阵的波束输出进行近场聚焦补偿。由于子阵的阵元数目比较少,波束宽度大,故远场波束形成时可以预形成较少的波束;近场波束形成是在各个子阵之间进行的,因此所需的延时表也大大小于常规波束形成;从而大大减小了数据存储量和计算量。

2 分级聚焦波束形成的基本原理

目标位于远场或近场时波束形成的具体实现方法不同。当目标位于远场时,回波

声线基本平行,可以视作平面波处理。当目标位于近场时,回波近似为球面波,应进行球面波聚焦补偿;此时如果仍用平面波假设处理,波束形成器指向性将老化,表现为旁瓣变高和主瓣变宽。在工程应用中,当目标距离 R 满足

$$R \gg D^2/\lambda \quad (1)$$

条件时可认为是远场^[5],其中, D 表示基阵孔径长度, λ 是信号波长。设其临界距离为

$$R_f = D^2/\lambda \quad (2)$$

当 $R \ll R_f$ 时可认为是近场,应该进行聚焦补偿处理。

为方便讨论,下面以 9 元等间隔线阵为例,简单给出球面波聚焦原理。如图 1 所示, $X_i (i = 0, 1, \dots, 8)$ 为等间隔线阵上各个基元, F 为焦点,要使各个基元对焦点 F 处信号实现同相叠加,必须按球面波进行补偿。设球面半径为 R_0 ,则焦点 F 到各基元 X_i 的距离为

$$\Delta d_i = |F - X_i| = \sqrt{R_0^2 + [(k-i)d]^2} \quad (3)$$

其中, k 为基准阵元号, i 是任意阵元号, d 为阵元间距。假设 c 为声速,则各基元应补偿的时延为

$$\Delta \tau_i = (R_0 - \Delta d_i)/c \quad (4)$$

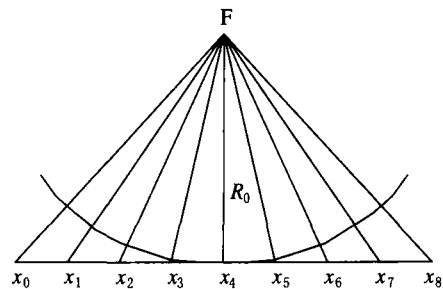


图 1 近场聚焦示意图

为防止波束形成器的聚焦性能降低,目标应限制在焦点 R_0 附近的区域范围,即每个焦点都有其对应的聚焦深度,目标只有位于聚焦深度所限定的区域范围内才能清晰成像。沿用远场与近场临界距离条件,得到

以下关系式^[5]:

$$\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_f} < \frac{1}{R} < \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_f} \quad (5)$$

在考虑焦点的设置时应综合考虑作用距离和各焦点的聚焦深度,主要应考虑距离向聚焦深度。因此,一般一部声纳系统需要设置多个焦点,分别对应不同工作区域,才能在整个作用距离内精确成像。而采用常规波束形成,每设置一个焦点就需要一个对应的延时表,这样在需要设置多个焦点进行近场聚焦的场合,延时表的存储量就很大。

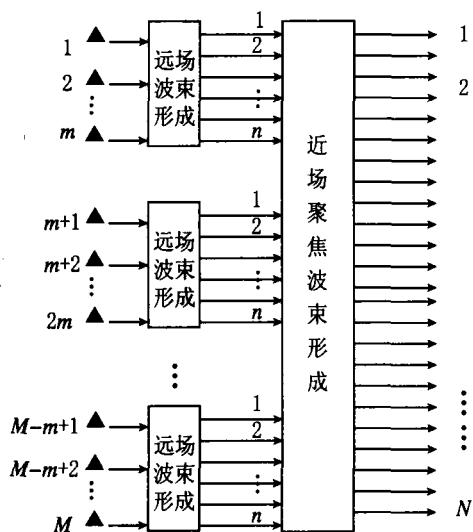


图 2 分级聚焦波束形成原理图

本文为此提出了分级聚焦波束形成。下面以一个 M 个基元组成的等间距线阵进行二级聚焦波束形成为例,来阐述分级聚焦波束形成的基本原理。如图 2 所示,首先,将 M 个基元组成的等间距线阵分成若干个 m 个基元组成的子阵,以各个子阵为单位进行第一级的远场波束形成;假设第一级每个子阵预形成 n 个波束, n 的取值由子阵的波束宽度决定。接着,对 M/m 个子阵的波束输出进行第二级的近场聚焦波束形成,假设第二级预形成 N 个波束,一般 $N > n$,这样,由于第一级仅有 n 个波束输出,因此在进行第二级波束形成时就需要进行波束插值。插值的方法很多,本文采用最简单的最近邻插值法。

如图 3 所示,实线表示第一级已经预形成的波束,虚线表示需要进行插值的波束,实线和虚线的总和表示第二级所形成的波束。在进行第二级波束形成时,先对 M/m 个子阵对应方位的 M/m 个一级波束进行近场聚焦,扫描 n 个方位后得到二级波束中的 n 个实线波束,然后对这 n 个波束进行插值处理得到各虚线波束,经过插值后就得到了 N 个二级波束。这里给出的是二级聚焦波束形成的具体步骤。同理,对于多级聚焦波束形成来说,首先进行子阵的多级划分,例如第一级是 2 个基元组成的子阵,第二级是 2 个第一级子阵组成的子阵,第三级是 2 个第二级子阵组成的子阵,依次类推。每一级的子阵都是前一级子阵的组合,每一级都是在前一级波束输出的基础上进行波束形成,其间伴随着波束的逐级插值。前面一些级数上采用远场处理,在近场效应较为严重的第 i 级子阵开始使用近场聚焦。

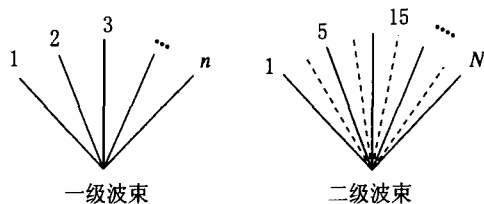


图 3 各级波束插值示意图

3 分级聚焦法与常规波束形成的比较

用分级聚焦法进行波束形成,各级波束形成(除了第一级)是在前一级各个子阵之间进行的,前一级阵元数目较少,波束宽度较大,可以形成较少的波束;加上各级波束间的插值,大大减小了数据存储量和计算量。以上节的 M 个基元组成的等间距线阵进行二级聚焦波束形成为例,表 1 给出了分级聚焦法和常规波束形成的计算量和存储量对比(表中未包含插值所需的计算量)。为了更形象地进行对比,表 2 给出了一个对 48 个

阵元组成的基阵进行二级波束形成的实例。从表中可见,分级聚焦法的计算量和存储量都要远远小于常规波束形成,尤其在设置多个焦点的情况下这种优势更加明显。对于一个48个阵元组成的线阵,分级聚焦法就已经显示了其计算量和存储量上明显的优势,当基阵尺寸更大或更复杂的二维面阵时这种优势将更加扩大。

表1 分级聚焦法与常规波束形成对比

	常规法	分级聚焦法	
		第一级	第二级
阵元数	M	m	M/m
波束数	N	n	N
计算量	MN	$Mn + MN/m$	
存储量(1个焦点)	MN	$mn + MN/m$	
存储量(3个焦点)	3MN	$mn + 3MN/m$	

表2 分级聚焦法与常规波束形成对比实例

	常规法	分级聚焦法	
		第一级	第二级
阵元数	48	8	6
波束数	181	61	181
计算量	8688	4014	
存储量(1个焦点)	8688	1574	
存储量(3个焦点)	26064	3746	

4 仿真实验结果及分析

我们就等间距线阵采用二级聚焦波束形成的算法进行 MATLAB 仿真计算。基阵由48个阵元组成,工作频率为500kHz,以半波长等间距布阵。第一级将基阵分成6个由8个阵元组成的子阵,对各个子阵分别进行远场波束形成,预形成61个波束,覆盖 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。第二级对第一级的6个子阵的波束输出进行近场聚焦补偿,采用最近邻法进行波束间的插值后一共预形成181个波束,覆盖

$-90^\circ \sim 90^\circ$ 。通过计算可以得到第一级子阵的临界距离为0.0368m,整个基阵的临界距离为1.6568m。由于第一级是对子阵进行远场波束形成,第二级是对整个基阵进行近场聚焦,因此基阵的工作距离R在同时满足子阵的远场条件和基阵的近场条件,即 $0.0368m \ll R \ll 1.6568m$ 时,分级聚焦波束形成的性能能够接近于常规的近场聚焦波束形成性能。我们对目标处于不同距离时分级聚焦波束形成的性能进行了测试,与常规的整个阵列的远场处理和近场聚焦比较,发现随着距离范围的变化,方法的性能也不尽相同。当目标位于0.2m附近时,如图4所示,分级聚焦法性能远远优于远场处理,接近于近场聚焦法,在计算量和存储量与波束指向性能矛盾之间取得了较好平衡。当目标位于远场5m时,如图5所示,分级聚焦法跟常规的远场处理方法性能一致,可见分级聚焦法本质上是常规波束形成的近似处理。当目标位于很近的近场时,如图6所示,分级聚焦法有较高的旁瓣。究其原因,当目标过近时,各个子阵对应目标的波束序号就不一致了,而在第二级进行近场聚焦时仍旧是按一致波束序号进行波束形成的,这样得出的结果误差太大,方法失效。下一步的工作需要根据几何模型采取合适的波束序号选择算法来改善性能。

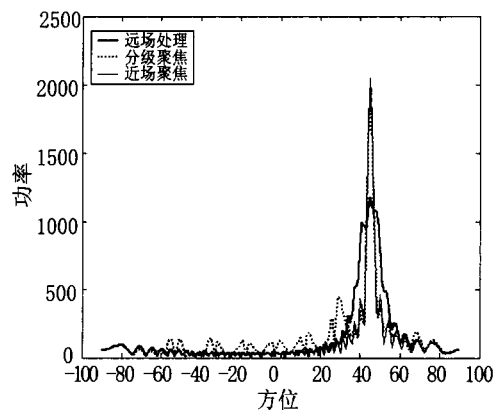


图4 目标位于0.2m处时,各种方法波束形成结果图

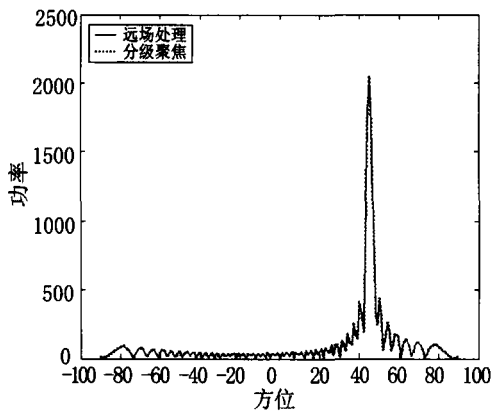


图 5 目标位于远场 5m 时,分级聚焦法和常规远场处理波束形成结果图

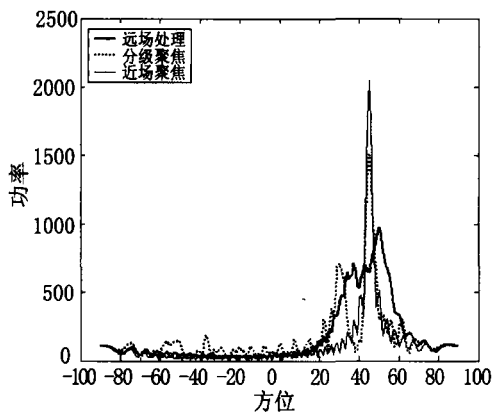


图 6 目标位于 0.1m 处时,各种方法波束形成结果图

5 结论

本文提出了一种新型波束形成算法——分级聚焦法,通过划分子阵和分级处理来实现远场和近场波束形成,有效减小了波束形成所需的计算量和存储量。不过,按一致波束序号进行级间波束形成,算法性能一定程度上受到目标距离的限制,需要进一步研究通过合成子阵间指向不同方位的波束来实现更近距离的波束形成。分级聚焦法也可用于面阵等复杂阵,还适用于某些不能直接进行近场聚焦的场合。该算法可以应用于雷达、声纳、地震勘测等领域的波束合成技术中。

参 考 文 献

- [1] Nielsen R O. Sonar Signal Processing. Artech House, 1991.
- [2] 李启虎. 数字式声纳设计原理. 安徽教育出版社, 2002.
- [3] Houston K M. A Fast Beamforming Algorithm, Oceans'94 Proceedings, 1994, 1: I/211 - I/216.
- [4] Yoon Y S, Kaplan L M. Pruned Multi-angle Resolution Fast Beamforming, Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop Proceedings, 2002: 490 - 494.
- [5] 郭燕和. 三维成像算法在并行系统上的实现研究. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2000 年 12 月.