

三维成像声呐分区域 FFT 波束形成算法设计

于涤非 黄海宁 张春华* 吴长瑞

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

(中国科学院大学 北京 100190)

摘要: 为解决传统均匀 FFT 波束形成算法引起的 3 维声呐成像分辨率降低的问题, 该文提出分区域 FFT 波束形成算法。远场条件下, 以保证成像分辨率为约束条件, 以划分数量最少为目标, 采用遗传算法作为优化手段将成像区域划分为多个区域。在每个区域内选取一个波束方向, 获得每一个接收阵元收到该方向回波时的解调输出, 以此为原始数据在该区域内进行传统均匀 FFT 波束形成。对 FFT 计算过程进行优化, 降低新算法的计算量, 使其满足 3 维成像声呐实时性的要求。仿真与实验结果表明, 采用分区域 FFT 波束形成算法的成像分辨率较传统均匀 FFT 波束形成算法有显著提高, 且满足实时性要求。

关键词: 水声学; 3 维成像声呐; 波束形成; 成像分辨率; FFT

中图分类号: TB565; TN911.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)09-2175-07

DOI: 10.11999/JEIT161132

The Design of Sub Region FFT Beam Forming Algorithm of 3D-sonar

YU Difei HUANG Haining ZHANG Chunhua WU Changrui

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

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to solve the problem that traditional uniform FFT beamforming algorithm reduces the resolution of 3-D sonar imaging, this paper presents a sub-region FFT beamforming algorithm. In the far field, the imaging area is partitioned into multiple regions using genetic algorithm as the optimization method. The objective of the optimization process is to minimize the number of partitions, with the constraints being the imaging resolution. In each region, a beam direction is selected to obtain the demodulated output when each receiving element receives the directional echo as the original data, and the traditional uniform FFT beamforming is performed in the region. The FFT computation process is optimized to reduce the computational complexity of the new algorithm to meet the real-time requirements of 3D imaging sonar. Simulation and experimental results show that the imaging resolution of the sub-region FFT beamforming algorithm is significantly higher than that of the traditional uniform FFT beamforming algorithm, and satisfies the real-time requirement.

Key words: Hydroacoustics; 3-D sonar system; Beam forming; Imaging resolution; FFT

1 引言

3 维成像声呐^[1]波束形成算法的运算量巨大, 为降低运算量需要对波束形成算法进行优化^[2-4]。传统均匀 FFT 波束形成算法^[2]的运算量较低, 其利用窄带信号相移等效于时移的特性, 将延迟相加转化为相移相加, 然后利用 FFT 运算进行波束形成。传统均匀 FFT 波束形成算法的输入数据是全部接收阵元同一时刻的解调输出。当声呐发射信号为单频

窄脉冲时, 位于视场边缘方位的目标回波的波前到达接收基阵上两个阵元间的时间差可能超过一个发射脉宽, 此时对这两个阵元同一时刻的解调输出进行相移相加不再等效于时延相加。此时声呐对视场边缘目标成像时无法获得应有的空间增益, 其距离分辨率及角分辨率明显下降。

为提高 3 维成像声呐对视场范围边缘目标的成像分辨率, 本文在传统均匀 FFT 波束形成算法的基础上提出分区域 FFT 波束形成, 将成像区域划分为多个区域, 对每个区域使用传统均匀 FFT 波束形成, 其输入是该区域某一波束方向上目标回波波前到达每一个阵元时的解调输出。因此相比于对波束方向图进行一次 FFT 波束形成, 分区域波束形成对

收稿日期: 2016-10-25; 改回日期: 2017-05-31; 网络出版: 2017-06-23

*通信作者: 张春华 zch@mail.ioa.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(11304343)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (11304343)

位于视场范围边缘目标成像的分辨率有所提高。划分的区域数量越多,运算量越大,因此划分的数量需要在成像效果与计算量之间取得折中。

2 基本假设

声呐发射单频脉冲,脉冲宽度为 τ ,信号频率为 f_{omit} 。发射信号形式为 $e^{j2\pi f_{\text{omit}}t}[U(t)-U(t-\tau)]$,其中 $U(t)$ 为单位阶跃信号。波长 λ ,发射开角 $45^\circ \times 45^\circ$ 。接收基阵为 $N \times N$ 方阵,布阵间距 d 。波束形成时接收基阵第 m 行第 n 列的阵元(第 (m,n) 阵元)的权重 $\omega_{mn} = 1$ 。模拟通道采样率为 f_{sample} 。3维声呐成像的距离分辨率为 $d_r = (c\tau)/2$,其中 c 为声速。声呐最大作用距离为 d_{max} 。

接收换能器阵与发射换能器阵相对位置如图1所示,原点为发射声中心, m_0 为实数。

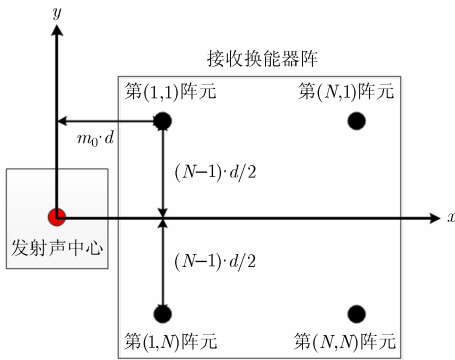


图1 接收换能器阵与发射换能器阵相对位置图

位于接收基阵第 (m,n) 阵元接收到位于 \mathbf{q}_0 方向上目标回波的模型如图2所示,图中 z 轴为接收阵法向量方向,坐标原点为发射声中心,收方阵位于 xoy 平面。

θ_0 为目标单位方向向量 \mathbf{q}_0 的水平角, β_0 为俯仰角。第 (m,n) 阵元的位置矢量为 $\mathbf{v}_{m,n} = (x_m, y_n, 0)$,目标的位置矢量为 $r_0 \mathbf{q}_0$, r_0 为目标与坐标原点间的距离, $\mathbf{q}_0 = (\sin \theta_0, \sin \beta_0, \sqrt{\cos^2 \theta_0 - \sin^2 \beta_0})$ 为目标方位的单位方向向量。

第 (m,n) 阵元输出信号 $X_{mn}(t)$ 经采样后为 $X_{mn}(h/f_{\text{sample}})$,其中 h 为整数。经解调^[5]变为基带

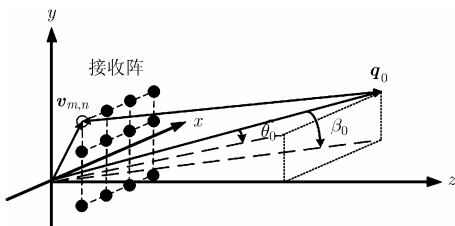


图2 坐标原点为发射声中心的信号回波模型

信号,其信号形式为 $S_{mn}(l)$, l 为整数。解调方法是将每 τ 时间段的 $X_{mn}(h/f_{\text{sample}})$ 信号求取 f_{omit} 处的DFT系数^[5]:

$$S_{mn}(l) = \sum_{h=lR}^{(l+1)R-1} X_{mn}(h/f_{\text{sample}}) e^{-j2\pi \frac{f_{\text{omit}}-h}{f_{\text{sample}}}}; \quad l = 0, 1, \dots, R = \lceil f_{\text{sample}} \times \tau \rceil \quad (1)$$

式中, $\lceil \cdot \rceil$ 表示四舍五入运算。3维成像声呐得到的一幅3维场景如图3所示,在沿 z 轴方向上,每 d_r 距离做一个截面,该截面为一个球面,包含 $P \times P$ 个像素点。声呐最大作用距离为 d_{max} ,因此共包含 $W = \lceil d_{\text{max}}/d_r \rceil$ 个截面, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。因此一幅3维场景,由 W 个截面组成,每个截面为包含 $P \times P$ 个像素点的目标回波强度分布图。图3中, $d_k = K \cdot d_r$ 表示组成3维场景的第 K 个截面所在位置, $d_w = W \cdot d_r$ 表示最后一个截面。3维成像声呐的处理系统,在接收到所有接收阵元的解调输出 $S_{mn}(l)$ 后,顺序计算第1至第 W 截面,每个截面均对应 $P \times P$ 个像素点的波束形成运算。3维成像声呐在进行每个截面的波束形成时采用远场近似,即 $|\mathbf{v}_{m,n} - r_0 \mathbf{q}_0| \approx r_0 - \mathbf{v}_{m,n} \cdot \mathbf{q}_0 = r_0 - (x_m \cdot \sin \theta_0 + y_n \cdot \sin \beta_0)$ 。

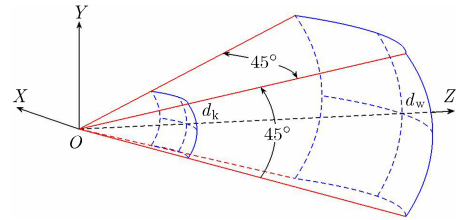


图3 3维成像声呐的3维场景示意图

3 传统均匀FFT波束形成对视场边缘目标成像分辨率分析

3维声呐对位于第 K 个截面 \mathbf{q}_0 上方向,即 $d_k \mathbf{q}_0$ 处的点目标成像时,目标回波的波前到达原点的时间为 $t_0 = 2d_k/c = K\tau$,不考虑噪声,原点处收到的回波信号:

$$X_o(t) = e^{j(2\pi f_{\text{omit}}t + \varphi_0)} [U(t - t_0) - U(t - t_0 - \tau)], \quad \varphi_0 = -2\pi f_{\text{omit}}t_0 \quad (2)$$

远场条件下波前到达第 (m,n) 阵元的时间为:

$$t_{mn} = \frac{d_k + |\mathbf{v}_{m,n} - d_k \mathbf{q}_0|}{c} \approx t_0 - \frac{\mathbf{v}_{m,n} \cdot \mathbf{q}_0^T}{c}, \quad \text{该阵元收到的回波信号:}$$

$$X_{mn}(t) = e^{j(2\pi f_{\text{omit}}t + \varphi_0 + 2\pi f_{\text{omit}}t_{mn}^\Delta)} \cdot [U(t - t_{mn}) - U(t - t_{mn} - \tau)], \quad t_{mn}^\Delta = \frac{\mathbf{v}_{m,n} \cdot \mathbf{q}_0^T}{c} \quad (3)$$

$X_{mn}(t)$ 经采样、解调后的序列 $S_{mn}(l)$ 中, 包含回波信息的是 $S_{mn}(l_{mn}^{d_k q_0})$; $l_{mn}^{d_k q_0} = t_{mn}/\tau$ 。

传统均匀 FFT 波束形成算法在对第 K 个截面 q_0 方向波束做波束形成时, 是将所有阵元的解调输出 $S_{mn}(K)$ 移相 $-2\pi f_{\text{omit}} t_{mn}^\Delta$ 后相加:

$$B(q_0, K) = \left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \omega_{mn} S_{mn}(K) e^{-j2\pi f_{\text{omit}} t_{mn}^\Delta} \right| \quad (4)$$

当 q_0 与 z 轴夹角较小时, 有 $\sin\theta_0 \approx 0; \sin\beta_0 \approx 0$, 则 $l_{mn}^{d_k q_0} = \frac{t_{mn}}{\tau} \approx K + \frac{-(x_m \cdot \sin\theta_0 + y_n \cdot \sin\beta_0)/c}{\tau} \approx K$ 。

因此式(4)中的每一个阵元的 $S_{mn}(K)$ 均包含回波信息, 即位于视场中心附近的成像结果不会产生失真。

当 q_0 与 z 轴夹角较大, 即目标位于视场边缘时, 存在某些阵元对应的 $l_{mn}^{d_k q_0}$ 满足:

$$l_{mn}^{d_k q_0} = \frac{t_0 - t_{mn}^\Delta}{\tau} \approx K + \frac{-t_{mn}^\Delta}{\tau} = K + l_{mn}^{q_0} \neq K \quad (5)$$

此时 $S_{mn}(K)$ 不包含任何回波信息, 因此使用式(4)计算时, 包含回波信息的阵元数少于 $N \times N$, 导致阵增益及角分辨率降低。同时, 使用式(4)计算 $B(q_0, K + l_{mn}^{q_0})$ 时, 会存在某些阵元的 $S_{mn}(K + l_{mn}^{q_0})$ 包含第 K 个截面上 q_0 方向上目标的回波信号, 成像时, 第 $K + l_{mn}^{q_0}$ 个截面上在 q_0 方向上也会形成一个点目标, 从而导致距离分辨率降低。

图4为 $N = 48, m_0 = 6.5$ 时, 使用时域波束形成算法及传统均匀 FFT 波束形成算法对 $\theta_0 = 21.5^\circ, \beta_0 = -21.5^\circ$ 方位的目标成像结果对比。取波束方向图上 $\beta = -21.5^\circ$, 主瓣附近的切片进行对比。

图中黑色实线为时域波束形成的结果, 目标仅出现在一个截面上, 且真实目标位于该截面, 目标强度为 0 dB。彩色虚线为传统均匀 FFT 波束形成的结果, 目标共出现在 4 个截面上, 而真实目标并非位于这 4 个截面中的任何一个。4 个目标的主瓣略有展宽, 且强度最强为 -6.75 dB, 位于截面 3, 即

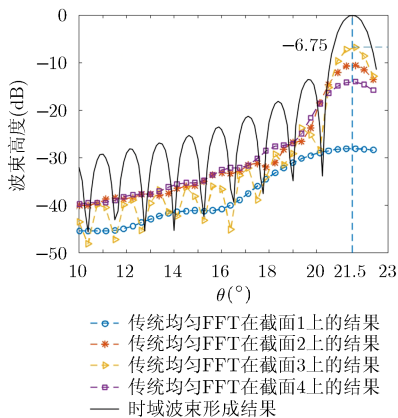


图4 两种算法对视场边缘目标成像结果对比

在计算该波束时, 只有 45.97% 的阵元的解调输出包含了回波信号, 因此声呐对该点目标成像时无法获得应有的空间增益。

假设该点目标的回声余量恰好等于零, 则使用时域波束形成算法时, 声呐恰好可以检测到该目标, 而使用传统均匀 FFT 波束形成算法时, 声呐无法对该目标成像。

由于对该点目标成像时的空间增益降低, 因此传统均匀 FFT 波束形成结果的主瓣结构与旁瓣结构发生改变, 图5比较时域波束形成与传统均匀 FFT 波束形成在截面3上的主瓣区域3维图像的对比。

传统均匀 FFT 波束形成算法的波束方向图在 $\theta = -\beta$ 切面上的主瓣宽度显著高于时域波束形成算法。在 $\theta = -\beta$ 切面上, 时域波束形成结果的主瓣 -3 dB 宽度为 1.26° 。传统均匀 FFT 波束形成在截面3上的主瓣 -3 dB 宽度为 3.34° 。表1比较两种算法在不同切面上 -3 dB 主瓣宽度。

表1 两种算法各个切面 -3 dB 主瓣宽度对比(°)

	$\theta = 21.5$	$\beta = -21.5$	$\theta = -\beta$
时域波束形成	1.16	1.16	1.26
传统均匀 FFT 波束形成	1.25	1.25	3.34

传统均匀 FFT 波束形成算法的主瓣宽度在 $\theta = -\beta$ 切面上明显高于时域波束形成算法。若该点目标回波强度较强, 采用传统均匀 FFT 波束形成算法时, 截面3上该点目标会变为线目标, 3维成像声呐的角分辨率显著降低。

因此传统均匀 FFT 波束形成算法在对视场边缘目标进行成像时, 会造成失真, 距离分辨率下降, 测距误差增加, 阵增益降低, 角分辨率下降。为改善对视场边缘目标成像的分辨率, 需要对传统均匀 FFT 波束形成算法进行改进。

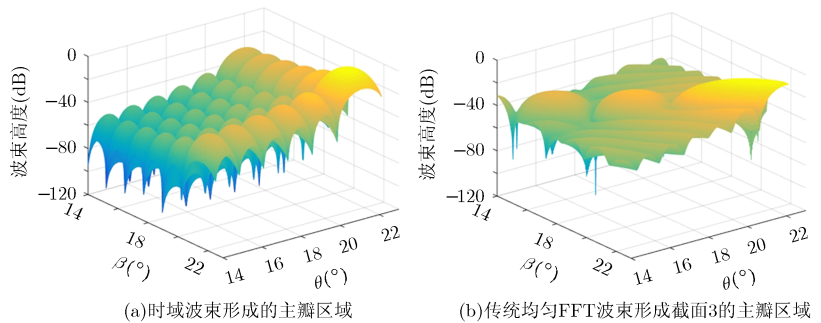


图5 两种算法主瓣区域对比

4 分区域 FFT 波束形成算法设计

式(5)给出3维声呐对位于第 K 个截面, \mathbf{q}_0 方向的目标成像时, 所有阵元的解调输出序列中包含回波信息的索引 $K + l_{mn}^{q_0}$ 。因此波束形成时应使用:

$$B(\mathbf{q}_0, K) = \left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \omega_{mn} S_{mn}(K + l_{mn}^{q_0}) e^{-j2\pi f_{\text{omit}} t_{mn}^{\Delta}} \right| \quad (6)$$

由式(6)可见, 在远场条件下, 任意一个波束方向 \mathbf{q} 均对应一个索引集合 $\Omega(\mathbf{q}) = \{l_{mn}^{\mathbf{q}}; 1 \leq m \leq N, 1 \leq n \leq N\}$ 。当两个波束方向夹角较大时, 其对应的索引集合是不同的。因此使用式(6)直接计算^[4]的波束方向图不存在失真, 但即使采用CORDIC算法^[6]优化其计算过程, 直接波束形成的运算量依然较大。只能使用并行运算的处理系统^[7,8]才能做到实时处理。而运用FFT降低运算量的CZT算法^[9]、NFFT算法^[10]及传统均匀FFT波束形成^[2]算法则可以同时使用指令型处理系统^[11]实现, 其运算量较低, 实现方式灵活。但是运用FFT降低运算量的波束形成算法的共同特点就是在计算全部波束输出时只能使用一个索引集合 $\Omega(\mathbf{q}_c)$, 否则无法使用蝶形运算降低运算量, 因此其只能使用式(4)进行计算, 即假定所有 $\Omega(\mathbf{q}) = \Omega((0, 0, 1)) = \{l_{mn}^{\mathbf{q}} = 0; 1 \leq m \leq N, 1 \leq n \leq N\}$ 。当某一波束方向 \mathbf{q} 与向量 $(0, 0, 1)$ 的夹角较大时, 式(4)的计算结果有较大失真。

如果将每一个截面的波束方向图按照同样的方式划分为多个区域 $A_i; i = 1, 2, \dots, Q$, 使用区域中心位置附近的 $\Omega(\mathbf{q}_i)$ 作为索引集合, 则每个区域内的波束方向与 \mathbf{q}_i 的夹角均较小, 可以降低误差, 同时每个区域内采用传统均匀FFT波束形成, 可以有效降低运算量。

划分区域的数量越多, 波束形成的误差越小, 但运算量越大, 在保证成像分辨率的前提下, 应尽可能减少划分个数以降低运算量。根据指标要求给出优化的目标:

(1)改进后的算法依然能够满足实时性的要求, 运算量的增加在可以接受的范围内。

(2)声呐对任何位置强度为0 dB的目标成像时, 目标强度至少达到 $T_{\text{min}} = -3$ dB。即在计算任意波束时, 至少有70%阵元的解调输出包含了回波信号。

T_{min} 的取值越接近0 dB, 成像失真越小, 但需要划分的区域就越多, 运算量越大, 因此这一参数的选取需要在成像效果与运算量之间取得折中。

每一个区域 A_i 的属性由 $\Omega(\mathbf{q})$ 决定, 为获得最优划分, 首先分析 $l_{mn}^{\mathbf{q}}$ 。由图1有:

$$\mathbf{v}_{m,n} = (x_m, y_n, 0) = \left((m + m_0)d, \left(\frac{N+1}{2} - n \right)d, 0 \right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} l_{mn}^{\mathbf{q}} &= \frac{-t_{mn}^{\Delta}}{\tau} = \frac{-\mathbf{v}_{m,n} \cdot \mathbf{q}}{c\tau} \\ &= \left[- \left[(m + m_0) \sin \theta + \left(\frac{N+1}{2} - n \right) \sin \beta \right] \cdot \frac{1}{f_{\text{omit}} \tau} \cdot \frac{d}{\lambda} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

由于每个区域内使用传统均匀FFT波束形成算法, 因此 A_i 的形状必然是矩形, 可用式(9)描述:

$$A_i = A_i(\mathbf{q}_i, \theta_i^s, \beta_i^s, \theta_i^e, \beta_i^e) \quad (9)$$

A_i 为波束方向图上 $\theta_i^s \leq \theta \leq \theta_i^e, \beta_i^s \leq \beta \leq \beta_i^e$ 的矩形区域, 该区域使用 $\Omega(\mathbf{q}_i)$ 作为索引集合, $\mathbf{q}_i = (\theta_i, \beta_i)$ 为 A_i 的索引波束。定义运算: $\Delta\{\Omega(\mathbf{q}_1), \Omega(\mathbf{q}_2)\} = \Omega(\mathbf{q}_1), \Omega(\mathbf{q}_2)$ 中相等元素的个数。

根据优化的目标, A_i 区域中的任意波束 \mathbf{q} 以及该区域索引集合所对应的 \mathbf{q}_i 满足:

$$\Delta\{\Omega(\mathbf{q}), \Omega(\mathbf{q}_i)\} \geq 0.7 \times N \times N \quad (10)$$

对于分布于波束方向图上的 Q 个 $\mathbf{q}_i, i = 1, 2, \dots, Q$, 通过式(10)必然可以计算出 Q 个互不重叠的矩形区域, 其覆盖波束方向图的面积最大。当这 Q 个矩形区域互不重叠且能够覆盖整个波束方向图时, 这 Q 个矩形区域就构成了一种划分 $A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_Q)$ 。

分区域波束形成算法的关键就是能够找到 Q 取最小值的划分 $A_0(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_Q)$ 。这一优化过程是集合覆盖问题^[12], 属于经典组合优化问题的一种, 可以采用遗传算法作为优化手段, 来求解最优划分方式^[13,14]。

由于 $\sin \theta, \sin \beta$ 均为奇函数, 因此波束方向图的划分必然关于 θ 轴以及 β 轴是对称的, 只需要在 $0 \leq \theta \leq 22.5^\circ, 0 \leq \beta \leq 22.5^\circ$ 范围内进行搜索, 就可以获得最终的优化结果。声呐的角分辨率约为 1° , 因此搜索时取 0.25° 作为步长, 则可以保证足够的搜索精度。因此在搜索范围内共有 $G = 91 \times 91 = 8281$ 个波束, 标记为 $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_G$, 其中 \mathbf{q}_i 表示 $\theta = \text{mod}(i, 91) \times 0.25^\circ; \beta = [i \div 91] \times 0.25^\circ$ 方向的波束, mod表示求余运算, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。则建立如下的染色体模型来描述划分:

$$\text{Chrome}(A) = \{g_1, g_2, \dots, g_G\} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \quad (11)$$

$$g_i = \begin{cases} 0, & \mathbf{q}_i \text{ 不作为任何区域的索引波束} \\ 1, & \mathbf{q}_i \text{ 为某一区域的索引波束} \end{cases}$$

Chrome(A)中等于1的染色体的个数即为划分区域的个数 Q 。优化的目标函数 $f_{\text{dest}} = Q$, 即划分数量最小化。取 $N = 48, m_0 = 6.5$, 优化的结果如图6所示。每个区域的属性如表2所示。

图6所示4个区域关于 θ 轴以及 β 轴镜像就是 $-22.5^\circ \leq \theta \leq 22.5^\circ, -22.5^\circ \leq \beta \leq 22.5^\circ$ 波束方向图的划分结果, 共有14个区域, 如图7所示。

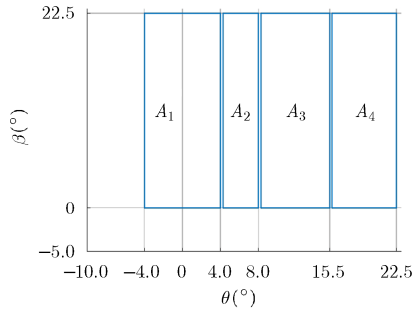


图6 区域划分最优解

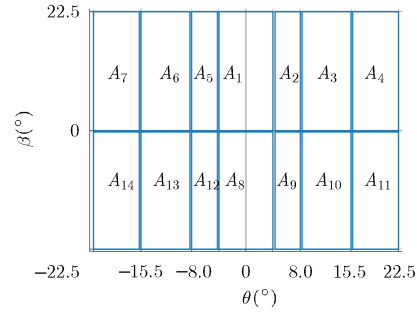


图7 波束方向图区域划分

表2 最优解对应的区域属性

区域编号	索引波束 q_i	θ_i^s	θ_i^e	β_i^s	β_i^e
A_1	$(0^\circ, 15^\circ)$	-4°	4°	0°	22.5°
A_2	$(6^\circ, 7^\circ)$	4.25°	8°	0°	22.5°
A_3	$(12.25^\circ, 10.75^\circ)$	8.25°	15.5°	0°	22.5°
A_4	$(18.75^\circ, 10^\circ)$	15.75°	22.5°	0°	22.5°

最终划分结果对 θ, β 并非对称的，原因是式(8)中 $\sin\theta$ 与 $\sin\beta$ 系数的取值范围不同。式(8)中， $1 \leq m \leq 48, 1 \leq n \leq 48, m_0 = 6.5$ ，因此 $\sin\theta$ 的系数 $m + m_0 \in [7.5, 54.5]$ ，而 $\sin\beta$ 的系数 $(N + 1)/2 - n \in [-23.5, 23.5]$ 。因此相对于 $\sin\beta$ ， $\sin\theta$ 的变化对 l_{mn}^a 的影响更大，因此在 θ 维度上需要划分更多的区域。

5 计算量优化

分区域 FFT 波束形成将波束方向图划分为 14 个区域，每个区域做 2 维 FFT 运算，最终获得整个波束方向图，如果对运算过程不做优化，则运算时间相当于传统均匀 FFT 波束形成时间的 14 倍，无法满足实时性的要求。因此为了让分区域 FFT 波束形成算法达到实时的效果，必须降低运算量。

划分的每一个区域都只是波束方向图的一部分，相当于使用全部阵元的数据，计算部分频谱。而 FFT 则是计算全部频谱，因此当只需要计算部分频谱时，可以通过 FFT 剪除^[15]算法直接降低计算量。

假设每个截面包含 46×46 像素点， $\theta = -22.5^\circ : 1^\circ : 22.5^\circ, \beta = -22.5^\circ : 1^\circ : 22.5^\circ$ ，则 $A_1 \sim A_4$ 包含的波束数量如表 3 所示。

由于阵元数为 $N \times N$ ，因此计算 A_1 区域时，首先进行 N 次行 1 维 FFT，每个行 FFT 为 N 个原始

表3 $A_1 \sim A_4$ 区域波束数量

序号	A_1	A_2	A_3	A_4
波束数量	8×23	4×23	8×23	7×23

数据，计算 8 个频点。然后进行 8 次列 1 维 FFT，每个列 FFT 同样为 N 个原始数据，计算 23 个频点。共进行 $N + 8$ 次 1 维 FFT。则计算 14 个区域共需要进行 $14N + 92$ 次 1 维 FFT。而传统均匀 FFT 波束形成算法计算整个成像区域时只需要进行 $N + 46$ 次 1 维 FFT。因此通过 FFT 剪除^[15]来降低每次 1 维 FFT 的运算量是最为直接的优化方法。

基本的 FFT 剪除方法是去掉蝶形运算中冗余的部分，以 8 点 FFT 为例，假设原始数据为 6 个，频点仅计算 0, 1，则进行 FFT 蝶形运算时，大量计算可以省略，如图 8 所示。

共需要 8 次复数乘法，10 次复数加法即可完成所需运算，而 8 点 FFT 共包含 12 次复数乘法，24 次复数加法运算。基 2 FFT 运算中，某些复数乘法的乘数为 ± 1 或 $\pm j$ ，可以不使用复数乘法实现。3 维成像声呐设计时为了降低硬件复杂度，常采用对接收基阵进行稀疏抽取^[2]，此时参与波束形成的基阵不再是 $N \times N$ ，计算 FFT 的原始数据更加稀疏，运算量可以进一步降低。

取 $N = 48$ ，波束方向图为 46×46 波束，每次 1 维 FFT 为 64 点 FFT，优化后的运算量如表 4 所示。

经过优化，满阵时 ($N \times N$ 基阵的全部阵元均参

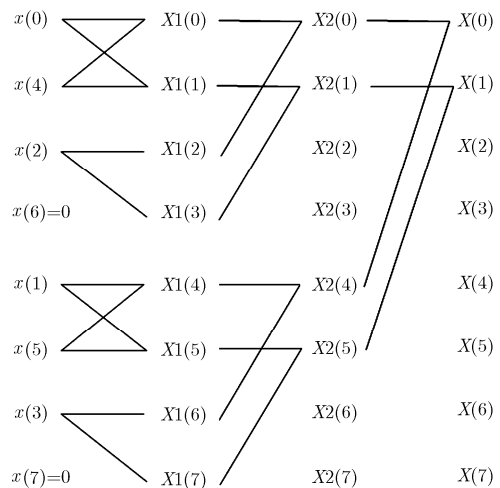


图8 8点FFT剪除运算示意图

表4 运算量对比

	传统均匀 FFT 波束 形成算法	分区域 FFT 波束 形成算法满阵	分区域 FFT 波束 形成算法 稀疏抽取 ^[2]
复数加法 数量	36096	155036	63496
复数乘法 数量	18048	43040	34912

与波束形成)分区域 FFT 波束形成运算量约为传统均匀 FFT 算法的 3.5 倍。稀疏抽取时,其运算量约为传统均匀 FFT 算法的 1.8 倍,可以满足实时性要求。

6 实验结论

3 维成像声呐样机的接收阵采用稀疏抽取^[2]的设计方式,并对数据采集系统的幅相误差进行校正^[16]以降低随机误差的影响。使用直径 1.5 cm 的绳子作为目标,将直接波束形成(使用式(6)直接计算每一个波束输出)、传统均匀 FFT 波束形成、分区域 FFT 波束形成 3 种算法的成像效果进行比较。

采用直接波束形成算法成像结果如图 9 所示,该图为声呐实时成像结果中的一帧,是将波束形成结果进行可视化后的结果。由式(6)计算的结果为如图 3 所示的数据,其包含 $W \times P \times P$ 个像素点,该数据的可视化过程分为两步。第 1 步取每一个波束方向 \mathbf{q}_i 上的 W 个像素点中强度值 $B(\mathbf{q}_i, K_i)$ 最高的点作为该波束方向上的成像点,即仅保留 $P \times P$ 个像素点用于显示。第 2 步将图像进行滤波,滤除 $P \times P$ 个像素点中的噪声点,仅保留强度值足够高的目标

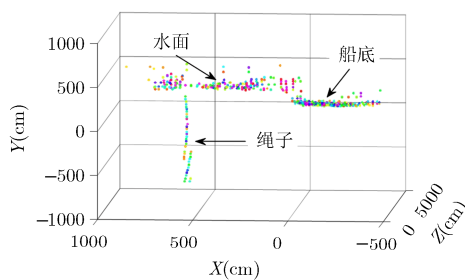


图9 直接波束形成算法成像结果

点用于显示。因此图 9 中的目标点数量小于 46×46 , 每个点的颜色代表目标强度 $B(\mathbf{q}_i, K_i)$ 。 \mathbf{q}_i 为第 i 个点目标的方向向量, K_i 为第 i 个点目标所处的距离截面。

将 3 种算法的成像结果中绳子部分在 XOY 平面内的投影作比较,如图 10 所示。

表 5 对比图 10 所示的 3 种算法成像结果绳子部分所包含的点目标数量、绳子在 X 轴和 Y 轴上的投影长度,所有点目标的平均强度 $E\{B(\mathbf{q}_i, K_i)\}$,直接波束形成算法的平均强度为 0 dB。

图 9 中,绳子最下端点目标的坐标为(578, -666, 1499)该点对应的视场角为: $\theta = 19.4^\circ, \beta = -22.5^\circ$ 。因此绳子的末端位于视场边缘。图 10 中,传统均匀 FFT 波束形成算法在对位于视场边缘的绳子末端进行成像时,由于未获得应有的空间增益,无法从噪声背景中检测到目标点,因此其成像的点目标数量少于直接波束形成结果。传统均匀 FFT 波束形成算法在对图 10 中 $Y = 0$ 附近的绳子中段进行成像时,由于目标强度较高且主瓣展宽,成像的角分辨率降低,使绳子在 X 轴方向投影长度较分区域 FFT 波束形成算法的结果明显展宽,产生较为严重的失真。

7 结论

在远场近似的条件下,传统均匀 FFT 波束形成算法在对视场边缘目标进行成像时分辨率降低,失真较为严重。分区域 FFT 波束形成算法采用将成像区域划分为多个区域分别计算的方法,改善对视场边缘目标成像的效果,提高成像分辨率,减少失真。为满足 3 维成像声呐实时性的要求,通过求解优化

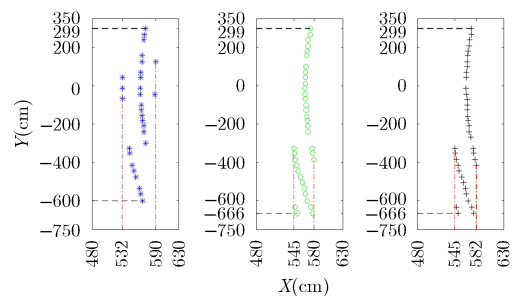


图10 3种算法成像结果比较

表5 3种算法成像结果对比

算法	点目标数量	X 轴投影长度(cm)	Y 轴投影长度(cm)	平均强度 $E\{B(\mathbf{q}_i, K_i)\}$ (dB)
传统均匀 FFT 波束形成	29	58	899	-1.331
分区域 FFT 波束形成	36	35	965	-0.246
直接波束形成	38	37	965	0

模型,使划分的区域数量最小化,同时对FFT运算过程进行优化,降低分区域FFT波束形成算法的运算量。实验结果表明,分区域FFT波束形成算法的成像分辨率较传统均匀FFT波束形成算法有显著提高,失真程度较低,且满足实时性要求,能够降低声呐成像失真度,提高成像质量。

参考文献

- [1] 李斌,金利军,洪佳,等. 三维成像声呐技术在水下结构探测中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 184-188. doi: 10.11705/j.issn.1672-643X.2015.03.38.
LI Bin, JIN Lijun, HONG Jia, et al. Application of three-dimension imaging sonar technology in detection of underwater structure[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2015, 26(3): 184-188. doi: 10.11705/j.issn.1672-643X.2015.03.38.
- [2] 王朋. 基于稀疏布阵的三维成像声呐信号处理算法研究[D]. [博士学位], 中国科学院大学, 2015: 40-90.
WANG Peng. Research on signal processing algorithm of three-dimensional acoustical imaging sonar based on sparse planar array [D]. [Ph.D. dissertation], Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 40-90.
- [3] 袁龙涛. 相控阵三维成像声呐系统信号处理关键技术研究[D]. [博士学位], 浙江大学, 2013: 67-83.
YUAN Longtao. Research on key technologies of signal processing for phased array three-dimensional imaging sonar system [D]. [Ph.D. dissertation], Zhejiang University, 2013: 67-83.
- [4] 陈朋. 相控阵三维成像声呐系统的稀疏阵及波束形成算法研究[D]. [博士学位], 浙江大学, 2009: 61-79.
CHEN Peng. Research on sparse array and beamforming algorithm for phased array three-dimensional imaging sonar system[D]. [Ph.D. dissertation], Zhejiang University, 2009: 61-79.
- [5] 李启虎. 声呐信号处理引论[M]. 北京: 海洋出版社, 2000: 222-224.
LI Qihu. Introduction to Sonar Signal Processing [M]. Beijing: China Ocean Press, 2000: 222-224.
- [6] HAMPSON G and PAMPLINSKI A. phase shift beamforming using Cordic[C]. International Symposium on Signal Processing and Its Applications, ISSPA, Gold Coast, Australia, 1996: 684-687.
- [7] 印明明, 刘平香. GPU 实现水下三维成像研究[J]. 声学技术, 2014, 33(5): 53-57.
YIN Mingming and LIU Pingxiang. Study on 3D image sonar based on GPU[J]. *Technical Acoustics*, 2014, 33(5): 53-57.
- [8] 胡将. 基于 Kintex-7 的三维声学成像主信号处理系统硬件设计[D]. [硕士学位论文], 浙江大学, 2016: 17-47.
HU Jiang. Hardware design of three-dimensional acoustic imaging main signal processing system based on Kintex-7[D]. [Master dissertation], Zhejiang University, 2016: 17-47.
- [9] PALMESE M and TRUCCO A. Three-dimensional acoustic imaging by Chirp Zeta transform digital beamforming[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(7): 2080-2086. doi: 10.1109/TIM.2009.2015523.
- [10] CHI Cheng, LI Zhaohui, and LI Qihu. Fast broadband beamforming using nonuniform fast Fourier transform for underwater real-time 3-D acoustical imaging[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, 41(2): 249-261. doi: 10.1109/JOE.2015.2429251.
- [11] 王朋, 张扬帆, 黄勇, 等. 基于稀疏布阵的实时三维成像声呐系统[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 843-851.
WANG Peng, ZHANG Yangfan, HUANG Yong, et al. Real-time 3D acoustical imaging sonar system based on sparse planar array[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(4): 843-851.
- [12] 王继强. 集合覆盖问题的模型与算法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(17): 15-17. doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1303-0383.
WANG Jiqiang. Model and algorithm for set cover problem[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(17): 15-17. doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1303-0383.
- [13] ZHANG Xinyang, ZHANG Jun, GONG Yuejiao, et al. Kuhn-Munkres parallel genetic algorithm for the set cover problem and its application to large-scale wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2016, 20(5): 695-710. doi: 10.1109/TEVC.2015.2511142.
- [14] MAHMOUD Owais, MOSTAFA K, and GHADA Moussa. Multi-objective transit route network design as set covering problem[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, 2016, 17(3): 670-679. doi: 10.1109/TITS.2015.2480885.
- [15] XU Yihu and LIM Myongseob. Split-radix FFT pruning for the reduction of computational complexity in OFDM based cognitive radio system[C]. Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems(ISCAS), Paris, 2010: 69-72. doi: 10.1109/ISCAS.2010.5537048.
- [16] 程静静. 阵列幅相误差校正及实现研究[D]. [硕士学位论文], 南京理工大学, 2014: 36-53.
CHENG Jingjing. Research on implementation of array gain and phase error calibraion[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Science and Technology, 2014: 36-53.

于涤非: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为信号与信息处理。
 黄海宁: 男, 1968年生, 研究员, 研究方向为信号与信息处理。
 张春华: 男, 1962年生, 研究员, 研究方向为信号与信息处理。
 吴长瑞: 女, 1983年生, 副研究员, 研究方向为信号与信息处理。