

高分辨多波束海底地形探测的 MSB-RMU 算法研究

周天^{①②} 李海森^② 么彬^② 魏玉阔^② 陈宝伟^②

^①(哈尔滨工程大学水下智能机器人技术国防科技重点实验室 哈尔滨 150001)

^②(哈尔滨工程大学水声技术国防科技重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要: 常规多波束测深系统中采用的 FT 波束形成技术不能完成外侧波束区域海底地形的高精度估计, 而采用相位检测法的相干多波束测深系统在此区域能得到高精度和高分辨地形估计。基于此, 该文提出 MSB-RMU 算法, 此算法结合 FT 波束形成技术和相位检测法的优势, 具有较高的空间分辨率, 能够同时实现中央波束区域和外侧波束区域的高精度地形估计。对试验数据的处理结果表明此方法的有效性、实用性与优越性。此算法保证了国内首台多波束测深系统能够达到 6 倍水深以上的覆盖扇面。

关键词: 信号处理; 多波束; 海底地形测量; 宽覆盖; 高分辨率

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)07-1644-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01125

Research on MSB-RMU Algorithm on High Resolution Multibeam Detection of Seafloor Bathymetry

Zhou Tian^{①②} Li Hai-sen^② Yao Bin^② Wei Yu-kuo^② Chen Bao-wei^②

^①(National Defence Key Laboratory of Autonomous Underwater Vehicle Technology,

Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

^②(National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Traditional multibeam bathymetry system based on FT beamforming method can not achieve high accuracy seafloor bathymetry estimation of outer beams area, while interferometric multibeam bathymetry system based on phase detection method can estimate the bathymetry information in such area with high accuracy and resolution ability. To improve the performances of traditional multibeam bathymetry system, MSB-RMU algorithm is proposed, combining the advantages of FT beamforming and phase detection methods, which has high spatial resolution ability and achieves high accuracy bathymetry estimation of both central beams area and outer beams area. The processing results of experiment data prove the efficiency, practicality and superiority of the new algorithm, which ensures the first domestic multibeam bathymetry system to achieve 6 times coverage of the water depth.

Key words: Signal processing; Multibeam; Seafloor bathymetry; Wide coverage; High resolution

1 引言

多波束测深系统自上世纪 50 年代问世以来发展至今, 已成为当前海洋资源调查必不可少的重要设备之一。依据工作原理的不同可以分为两类: 传统多波束测深系统和相干多波束测深系统。传统多波束测深系统采用常规的 FT(Fourier Transform)波束形成技术, 通过增加接收基阵的孔径(通常有上百通道)来提高海底回波方位估计的分辨率, 此类系统

的优点是在中央波束方向有很高的分辨率, 但外侧波束方向分辨率低; 相干多波束测深系统利用各通道接收波形的相位差对接收回波的每个时间样本进行到达方位估计, 其通道数一般在 2~6 之间, 此类系统在外侧波束方向能够得到高精度高分辨率的方位估计, 但其缺点是中央波束方位估计精度差。通过对比可以发现, 两类系统的优缺点有着很强的互补性^[1-3]。

研究表明, 基于传统多波束测深系统的接收基阵结构, 最佳的信号处理方案是在中央波束方向采用常规 FT 波束形成技术, 而在外侧波束方向采用基于回波相位信息的估计技术, 从而保证在两个区域都能够获得高精度的方位估计^[4,5]。但是在实际应

2009-08-25 收到, 2010-02-04 改回

国家 863 计划项目 (2007AA09Z124), 中国高等学校博士点基金 (20070217022), 哈尔滨工程大学基础研究项目(HEUFT07017)和 underwater intelligent robot technology national key laboratory open research project fund support research communication author: 周天 zt198055@hotmail.com

用中,中央波束方向和外侧波束方向的主观划分通常会引入误差甚至错误。基于以上分析,本文提出了MSB-RMU(Multiple Subarrays Beamspace-Root MUSIC)算法,并利用算法对试验数据进行处理,验证了其有效性、实用性与优越性。

2 信号模型与求根 MUSIC 算法

设阵元数为 M 的等距线阵,阵元有着相同的指向性,阵元间距为 d , D 个远场窄带信号源,到达方向分别为 $\theta_1, \dots, \theta_D$, 其中 $M > D$ 。以阵列的第 1 个阵元为基准,各窄带信号在基准阵元的复包络分别 $s_1(t), \dots, s_D(t)$, 则第 m 个阵元接收到的信号为

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^D s_i(t) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(m-1)d \sin \theta_i} + g_m(t) \quad (1)$$

其中 λ 为信号的波长, $g_m(t)$ 表示第 m 个阵元上的零均值、方差为 σ^2 的白噪声。

表示成向量形式为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{g}(t) \quad (2)$$

其中 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_D)]$, $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_D(t)]^T$, $\mathbf{g}(t) = [g_1(t), g_2(t), \dots, g_M(t)]^T$, $\mathbf{a}(\theta_m) = \left[1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \theta_m}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(M-1)d \sin \theta_m} \right]^T$ 。

基于上述信号模型,求根 MUSIC 算法实现过程如下^[6]:

(1) 利用实际样本估计阵列接收向量 $\mathbf{x}(t)$ 的协方差矩阵:

$$\mathbf{R}_x = E\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)\} = \mathbf{A}E\{\mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t)\}\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I}$$

此处, $\mathbf{x}^H(t)$ 为 $\mathbf{x}(t)$ 的埃尔米特矩阵。

(2) 对 \mathbf{R}_x 进行特征值分解,得到其特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$ 及其对应的特征向量 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_M$ 。

(3) 根据先验的或者利用某方法估计出的信号源数 D , 确定信号子空间 $\mathbf{S} = \text{span}\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_D\}$ 和噪声子空间 $\mathbf{G} = \text{span}\{\mathbf{e}_{D+1}, \mathbf{e}_{D+2}, \dots, \mathbf{e}_M\}$ 。

(4) 定义多项式 $f(z) = \mathbf{p}^H(z)\mathbf{G}\mathbf{G}^H\mathbf{p}(z)$, 并求出单位圆上的根。其中 $\mathbf{p}(z) = [1, z, \dots, z^{M-1}]^T$ 。

(5) 利用表达式 $\theta_i = \arcsin(\lambda/(2\pi d) \arg\{\hat{z}_i\})$, $i = 1, \dots, D$ 得到 D 个信源的方位估计。

3 MSB-RMU 算法

为了减小运算量,提高算法的稳健性和鲁棒性,基于阵元域 MUSIC 算法,许多文献进一步研究了波束空间的 MUSIC 算法^[7,8],本文提出的算法不仅利用了波束空间信息,而且还引入了多子阵信息。

3.1 算法模型与原理

将 M 元线阵分为 N 个子阵,每个子阵是 $M - N + 1$ 元线阵,且满足 $M - N + 1 \geq N \geq 1$, 相

邻子阵间隔 1 个基元,基阵结构图 1 所示。

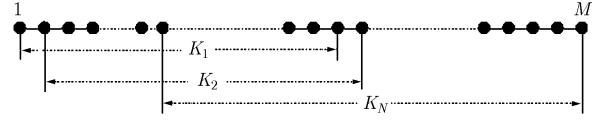


图 1 基阵模型

参照式(1)的表示方法,各子阵输出的向量形式为

$$\mathbf{x}_n(t) = \mathbf{A}_n\mathbf{s}(t) + \mathbf{g}_n(t) = \mathbf{A}_1\mathbf{\Phi}^{n-1}\mathbf{s}(t) + \mathbf{g}_n(t), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

其中 \mathbf{A}_1 是 $M \times D$ 维矩阵 \mathbf{A} 的前 $M - N + 1$ 行,而 $D \times D$ 维对角阵 $\mathbf{\Phi}$ 包含了目标的 DOA 信息

$$\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \theta_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \theta_2} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d \sin \theta_D} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对每个子阵分别作 FT 波束形成,对于子阵 n , 设预成于方向 θ_b 上的 FT 波束形成行向量为 \mathbf{T}_{nb} , 预成波束数为 B , 即

$$\mathbf{T}_{nb} = \frac{1}{\sqrt{M - N + 1}} \begin{bmatrix} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(n-1)d \sin \theta_b}, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}nd \sin \theta_b}, \dots, \\ e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(M-N+n-1)d \sin \theta_b} \end{bmatrix}, \quad n = 1, 2, \dots, N; \quad b = 1, 2, \dots, B \quad (5)$$

则每个子阵 θ_b 方向的波束输出为

$$\begin{aligned} H_{nb}(t) &= \mathbf{T}_{nb}\mathbf{x}_n(t) = \mathbf{T}_{nb}\mathbf{A}_n\mathbf{s}(t) + \mathbf{T}_{nb}\mathbf{g}_n(t) \\ &= \mathbf{T}_{nb}\mathbf{A}_1\mathbf{\Phi}^{n-1}\mathbf{s}(t) + \mathbf{T}_{nb}\mathbf{g}_n(t), \\ n &= 1, 2, \dots, N; \quad b = 1, 2, \dots, B \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\mathbf{g}_n(t) = [g_n(t), \dots, g_{M-N+n}(t)]^T$; $D \times D$ 维对角阵 $\mathbf{\Phi}_C$ 反映目标 DOA 与波束方向 θ 间的偏离 $\mathbf{\Phi}_C =$

$$\begin{bmatrix} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d(\sin \theta_b - \sin \theta_1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d(\sin \theta_b - \sin \theta_2)} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d(\sin \theta_b - \sin \theta_D)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

以每个子阵 b 号波束方向 θ_b 的波束输出 H_{nb} 构成新的信号向量 $\mathbf{H}_b(t)$, 则

$$\mathbf{H}_b(t) = \mathbf{B}\mathbf{s}'(t) + \mathbf{g}_b(t) \quad (8)$$

其中 $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}(\theta_1) & \mathbf{a}(\theta_2) & \cdots & \mathbf{a}(\theta_D) \\ \mathbf{a}(\theta_b) & \mathbf{a}(\theta_b) & \cdots & \mathbf{a}(\theta_b) \end{bmatrix}$, 依然具有

Vandermonde 结构; $\mathbf{g}_b(t) = \mathbf{T}_{nb}\mathbf{g}_n(t)$ 。

$$\mathbf{s}'(t) = \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_D(t) \\ + \cdots + e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(N-1)d(\sin\theta_b - \sin\theta_1)} \\ \vdots \\ + \cdots + e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(N-1)d(\sin\theta_b - \sin\theta_D)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d(\sin\theta_b - \sin\theta_1)} \\ \vdots \\ 1 + e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d(\sin\theta_b - \sin\theta_D)} \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

可以得到对应于某 b 号波束方向 θ_b 的新的信号向量 $\mathbf{H}_b(t)$ 的协方差矩阵 \mathbf{R}_{Hb} 为

$$\mathbf{R}_{Hb} = E\{\mathbf{H}_b(t)\mathbf{H}_b^H(t)\} = \mathbf{B}E\{\mathbf{s}'(t)\mathbf{s}'^H(t)\}\mathbf{B}^H + \sigma^2\mathbf{E} \quad (10)$$

其中 \mathbf{E} 为噪声相关矩阵如下式:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{M-N}{M-N+1} & \cdots & \frac{M-2N+2}{M-N+1} \\ \frac{M-N}{M-N+1} & 1 & \cdots & \frac{M-2N+3}{M-N+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{M-2N+2}{M-N+1} & \frac{M-2N+3}{M-N+1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

对于 MSB-RMU 算法, 由于利用了多个相互重叠的子阵, 因此引入了色噪声, 噪声协方差矩阵 \mathbf{E} 不再是单位阵。在色噪声环境下, 信号协方差矩阵的特征值会偏离白噪声环境下的特征值分布而导致估计误差增大^[9]。

为了更准确地得到信号子空间, 需要消除色噪声对信号协方差矩阵的影响, 从式(11)可以看到: 当子阵结构确定时, 矩阵 \mathbf{E} 确定, 且具有 Toeplitz 结构, 由矩阵理论可知, 存在酉阵 \mathbf{U} 与对角阵 $\mathbf{\Lambda}$, 使得 $\mathbf{E} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^H$ 成立。其中 $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_N)$ 的对角线元 $\lambda_n (n = 1, 2, \cdots, N)$ 是矩阵 \mathbf{E} 的特征值。根据这些特征值可以对色噪声进行白化。在式(10)两边分别左乘 \mathbf{U}^H 及右乘 \mathbf{U} , 其中 $U'_n = U_n/\sqrt{\lambda_n}$, 则式(10)可重写为

$$\mathbf{R}'_{Hb} = \mathbf{U}^H\mathbf{R}_{Hb}\mathbf{U} = \mathbf{U}^H\mathbf{B}E\{\mathbf{s}'(t)\mathbf{s}'^H(t)\}(\mathbf{U}^H\mathbf{B})^H + \sigma^2\mathbf{I} \quad (12)$$

\mathbf{R}'_{Hb} 是对称阵, 对其进行特征值分解, 最小的 $N-D$ 个特征值即等于 σ^2 。

得到 σ^2 的估计后, 对式(10)进行修正, 得到某 b 号波束的子阵信号协方差矩阵 \mathbf{R}_{sb}

$$\mathbf{R}_{sb} = \mathbf{R}_{Hb} - \sigma^2\mathbf{E} = \mathbf{B}E\{\mathbf{s}'(t)\mathbf{s}'^H(t)\}\mathbf{B}^H \quad (13)$$

综上, MSB-RMU 算法总结如下:

(1)按照式(6)计算每个子阵的常规波束形成, 可以使用 FT 计算多个预成波束的输出。

(2)根据多个预成波束的输出, 选择幅度最大的 L 个波束输出, 对所选择的波束, 根据式(12)估计噪声的方差 σ^2 。

(3)利用式(13)得到 L 个波束输出的协方差矩阵, 对此 L 个 $N \times N$ 维协方差矩阵, 分别求数学平均, 并利用求根 MUSIC 算法得到信源方位的高分辨估计。

(4)由式(13)可进一步得到各信源的强度信息矩阵为

$$\mathbf{P} = E\{\mathbf{s}'(t)\mathbf{s}'^H(t)\} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{R}_{sb}(\mathbf{B}^H)^{-1} \quad (14)$$

可见, 利用上式还可以很方便地得到海底回波的强度估计。

高分辨算法中, 目标个数的判定一直都是个难点。MSB-RMU 算法可以利用常规波束形成输出的结果对目标个数进行较为准确的预判, 并利用求根 MUSIC 算法解算出的方位值对解进行进一步的筛选^[10]。

3.2 MSB-RMU 算法与阵元域求根 MUSIC 算法性能对比分析

(1)运算量减小 如果采用全部阵元进行求根 MUSIC 算法运算, 特征分解的计算量为 $O(M^3)$, 而对于 MSB-RMU 算法, 特征分解的计算量大大下降为 $O(N^3)$ 。

(2)解相干特性 从式(9)可以看出, 信号向量 $\mathbf{s}(t)$ 变换为 $\mathbf{s}'(t)$, 是一个解相干过程, 能够保证矩阵 $E\{\mathbf{s}'(t)\mathbf{s}'^H(t)\}$ 满秩, 效果类似于空间平滑; 此变换处理提高了波束方向附近信号的信噪比, 同时抑制了其它方位的信号。

(3)阵列误差的鲁棒性 由于变换后的等效基元输出为原阵列多个基元输出的平均, 阵列通道的幅度不一致性和相位不一致性对算法的不利影响被削弱, 因而减小了模型失配导致的方位估计误差, 提高了算法的方位估计性能。

4 试验数据处理

4.1 水池动态测量

试验系统采用“T”型组合声学基阵, 发射基阵为多元弧阵, 接收阵为由 80 个阵元组成的均匀线阵。将整个接收阵划分为 9 个子阵, 每个子阵包括 72 个阵元^[11]。

此试验主要测试接收阵的束控性能, 声源位于基阵前方 11 m, 接收阵正对声源水平放置, 利用自动旋转装置使接收阵从 -80° 转到 80° , 转动速度为

每秒 0.5° , 声源发射脉冲长度 0.5 ms , 采样率 40 kHz 。对多通道信号进行波束形成以检验接收阵各通道的幅度相位一致性。

图 2 为测量结果, 图 2(a) 为利用中间 32 通道原始数据的常规 FT 波束形成输出, 图 2(b) 为利用全部 80 通道原始数据的常规 FT 波束形成输出, 图 2(c) 为利用中间 32 通道原始数据的 MSB-RMU 算法处理的结果。测试结果证明了接收基阵可靠的束控性能以及 MSB-RMU 算法的有效性。对比图 2(a), 2(b), 2(c) 可以看出, 由于常规 FT 波束形成的分辨率取决于接收阵有效孔径的长度, 对于外侧波束方向的回波, 接收阵有效孔径减小, 导致波束变宽, 分辨性能下降; 随着接收通道数的增加, 内、外侧波束都会变窄; 而 MSB-RMU 算法的分辨性能依赖于实际声场及信号特征与算法模型的相符程度, 在信噪比得到保证的条件下, 只采用 32 路接收信号进行处理的 MSB-RMU 算法, 在中央波束方向和外侧波束方向便能同时获得高分辨特性, 相比于传统 FT 波束形成算法优势明显。

4.2 湖底地形测量

试验系统及多子阵结构同上, 试验湖区水深约 18 m , 起始记录时刻为第 $n_0 = 960$ 个采样时刻。MSB-RMU 算法处理结果如图 3 所示。

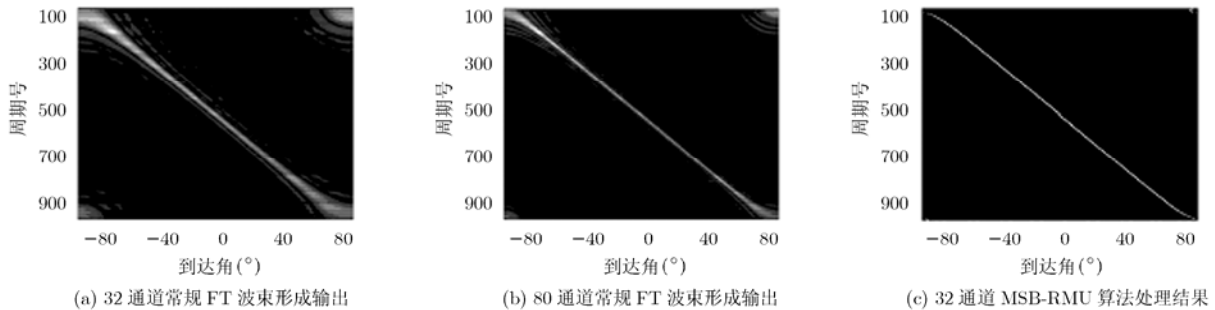


图 2 水池动态测量结果

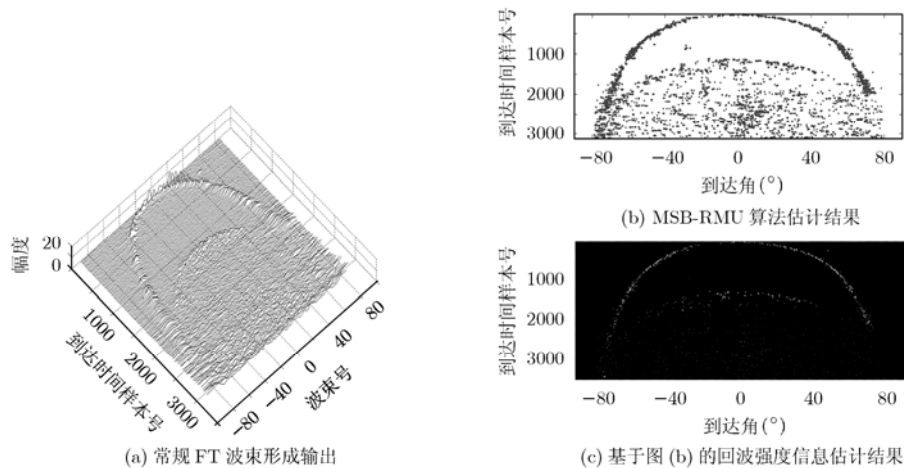


图 3 MSB-RMU 算法测试数据处理结果

图 3 中, 图 3(a) 为常规 FT 波束形成输出, 可以看到, 在外侧波束方向波束变宽, 导致分辨率变差。图 3(b) 横坐标为 DOA, 纵坐标为 TOA, 可以看到由于采用了 MSB-RMU 算法, 不仅在中央波束方向而且在外侧波束方向都能够得到高分辨率的回波方位估计结果, 反映水下地形的 TOA-DOA 关系曲线清晰可见, 在 210 个样本左右探测到了另外一个单位的水下吊放基阵; 图 3(c) 为在图 3(b) 的基础上进一步体现了回波的强度信息, 可借此强度信息剔除部分噪声干扰的影响。

多波束测深系统外观及湖试现场安装如图 4 所示。

图 5 给出了分别利用传统的基于 FT 波束形成的 WMT 深度检测算法和 MSB-RMU 算法处理某条测线回波数据所得到的湖底 3 维地形图。测线两侧的水深值分布在 $10\text{ m} \sim 40\text{ m}$ 范围内。

图 5(a) 是利用传统的 WMT 算法解算得到的地形图, 其两侧最外侧的波束角度分别为 $\pm 65.53^\circ$, 对应着双侧 4.4 倍的覆盖宽度; 图 5(b) 是利用 MSB-RMU 算法解算得到的地形图, 其可以有效检测两侧 $\pm 72^\circ$ 扇面(甚至更大)内的回波, 达到了 6 倍以上覆盖宽度。对比图 5(a) 和 5(b) 可见, 利用两种算法分别解算得到的地形图整体上大致相同, 但可以看到

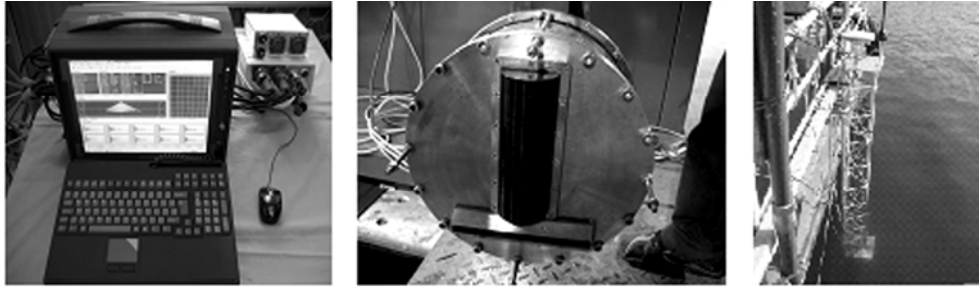


图 4 多波束测深系统外观及现场安装图

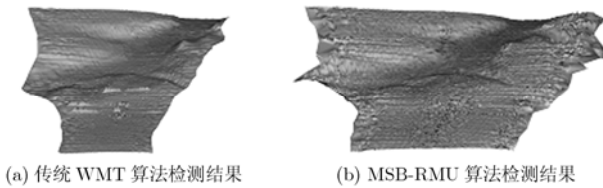


图 5 分别采用传统的 WMT 算法和 MSB-RMU 算法得到的水下 3 维地形图

WMT 算法得到的地形图中存在粗差, MSB-RMU 算法不仅可以保证更宽的覆盖扇面, 而且利用它的解算结果所成的地形图更为细腻, 体现了 MSB-RMU 算法在整个覆盖扇面内的高分辨特性。

5 结束语

多波束测深系统作为当前海底探测的主要设备, 对海底成像的要求是“既见森林, 又见树木”, 这正好与 MSB-MUSIC 算法的实现原理相符。从算法的实现过程可以看到, 粗略的海底图像由 FT 的波束形成输出便可获取, 而精细的海底图像或感兴趣区域的图像则可借助求根 MUSIC 算法对感兴趣方向的波束输出进一步“细看”得到; MSB-RMU 算法结合了 FT 和求根 MUSIC 两种方法的优势, 在整个宽覆盖的海底测量区域内都保持了高精度高分辨率的 DOA 估计性能。

试验数据处理结果表明, MSB-RMU 算法能够实际应用于常规多波束测深系统, 并能有效提高系统的宽覆盖和高分辨性能。

参考文献

- [1] 谭良, 全小龙, 张黎明. 多波束测深系统及其在水下工程监测中的应用[J]. 全球定位系统, 2009, 33(1): 38-42.
Tan Liang, Quan Xiao-long, and Zhang Li-ming. Application of multi-beam sounding system in under water surveying[J]. *GNSS World of China*, 2009, 33(1): 38-42.
- [2] 周天. 超宽覆盖海底地形地貌高分辨探测技术研究[D]. [博士学位论文], 哈尔滨工程大学, 2005.
Zhou Tian. A study on high resolution detection techniques for super wide seafloor bathymetry and physiognomy[D]. [Ph.D. dissertation], Harbin Engineering University, 2005.
- [3] 李成刚, 王伟伟, 阎军. 传统多波束系统与具有相干特点的多波束系统的研究[J]. 海洋测绘, 2007, 27(2): 77-80.
Li Cheng-gang, Wang Wei-wei, and Yan Jun. The study on traditional multibeam and interferometric multibeam. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2007, 27(2): 77-80.
- [4] Yang L and Tuxt T. Multibeam sonar bottom detection using multiple subarrays [C]. OCEANS'97, Halifax, Canada, 1997, 10: 932-938.
- [5] Llorc-Pujol G, Sintès C, and Gueriot D. Analysis of vernier interferometers for sonar bathymetry[C]. OCEANS'08, Quebec, 2008. 9.
- [6] 王永良, 陈辉, 彭应宁, 万群. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 132-138.
- [7] Silverstein S D and Zoltowski M D. The mathematical basis for element and Fourier beam space MUSIC and Root-MUSIC algorithms[J]. *Digital Signal Processing*, 1991, 1(4): 1-15.
- [8] Cui Wei-wei, Wei Jian-qiang, Cao Zhi-gang, and Lü Qi. Fast and robust DOA estimation method using searching space pre-estimation[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2008, 17(1): 136-140.
- [9] 谢纪岭, 司锡才. 基于协方差矩阵对角加载的信源数估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(1): 46-49.
Xie Ji-ling and Si Xi-cai. Determining the number of sources based on diagonal loading to the covariance matrix [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(1): 46-49.
- [10] Krautner P H and Charbonneau B. Multi-angle swath bathymetry sidescan quantitative performance analysis[C]. IEEE. OCEANS'02, California, 2002, 10: 2253-2263.
- [11] 么彬. 多子阵波束域高分辨水声成像技术研究[D]. [博士学位论文], 哈尔滨工程大学, 2009.
Yao Bin. Study on multiple sub-array beam-space high resolution underwater acoustic imaging technology[D]. [Ph.D. dissertation], Harbin Engineering University, 2009.

周 天: 男, 1980 年生, 副教授, 研究方向为水下目标探测与识别。

李海森: 男, 1962 年生, 教授, 研究方向为水声信号处理。

么 彬: 男, 1980 年生, 讲师, 研究方向为并行处理。