

引用格式: 姚琳, 刘晓东. 一种频分 MIMO 声呐的波达方向估计算法[J]. 声学技术, 2021, 40(5): 710-716. [YAO Lin, LIU Xiaodong. DOA estimation algorithm based on frequency diverse MIMO sonar[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(5): 710-716.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.05.018

一种频分 MIMO 声呐的波达方向估计算法

姚琳^{1,2}, 刘晓东^{1,3,4}

(1. 中国科学院声学研究所海洋声学技术中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 北京市海洋声学装备工程技术研究中心, 北京 100190; 4. 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)

摘要: 为了使声呐阵列在有限的载体空间内获得较高的角度分辨率, 设计了基于频率分集的多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)声呐。该 MIMO 声呐采用 N 发 M 收的布阵方式, 接收阵为 M 元均匀线阵, 发射阵由 N 个阵元组成, 且各发射阵元发射中心频率不同、包络相同的窄带信号。建立密集式频分 MIMO 声呐的回波模型, 并以此模型为基础提出了波达方向估计算法方向-相位域多重信号分类(Direction and Phase Domain-Multiple Signal Classification, DPD-MUSIC)算法。仿真实验中以双频 MIMO 声呐为例, 将频分 MIMO 声呐的 DPD-MUSIC 算法的估计性能与单输入多输出(Single-Input Multiple-Output, SIMO)声呐 MUSIC 算法的估计性能进行了对比。仿真结果表明, 频分 MIMO 声呐利用 DPD-MUSIC 算法可以获得优于等接收阵元数 SIMO 声呐的角度分辨率和角度估计精度。

关键词: 多输入多输出声呐(MIMO); 频率分集; 高分辨率; 波达方向(DOA)估计

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-05-0710-07

DOA estimation algorithm based on frequency diverse MIMO sonar

YAO Lin^{1,2}, LIU Xiaodong^{1,3,4}

(1. Ocean Acoustic Technology Center, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Engineering Technology Research Center of Ocean Acoustic Equipment, Beijing 100190, China; 4. State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: To improve the angular resolution of sonar in limited carrier space, the frequency diversity based multiple-input multiple-output (MIMO) sonar is proposed. The MIMO sonar is composed of a receiving uniform linear array (ULA) of M -elements and a transmitting ULA of N -elements, which transmit narrowband signals with different center frequencies and the same envelope. In this paper, the signal model of dense frequency division MIMO sonar is established, also the direction and phase domain multiple signal classification (DPD-MUSIC) method, for direction of arrival (DOA) estimation is proposed. Taking dual-frequency MIMO sonar as an example, the performance of DPD-MUSIC algorithm for frequency division MIMO sonar is compared with that of the MUSIC algorithm for single-input multiple-output (SIMO) sonar. Numerical simulation results show that the frequency division MIMO sonar can obtain better angle resolution and DOA estimation accuracy than the SIMO sonar with equal number of receiving elements.

Key words: multiple-input multiple-output (MIMO) sonar; frequency diversity; high resolution; direction of arrival (DOA) estimation

0 引言

借鉴多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术在无线通信领域应用时获得的优势和成果, Fishler 等在 2004 年将 MIMO 思想引

入雷达领域^[1], Bekkerman 等在 2006 年首次将 MIMO 思想引入声呐领域^[2]。根据收发阵列的空间布阵位置, 可以将 MIMO 声呐成分布式 MIMO 声呐和密集式 MIMO 声呐^[3]。分布式 MIMO 声呐的发射和接收天线分布式布阵^[4], 能够从不同角度照射目标, 减小目标的闪烁效应, 获得更好的估计性能。密集式 MIMO 声呐的收发天线空间上紧凑分布^[5], 利用发射信号的正交性获得较大孔径的虚拟阵列。与传统相控阵声呐相比, 密集式 MIMO 声呐具有更优的目标参数估计能力、更高的角度分辨能力和自由度^[6-7]。

将 MIMO 技术应用于声呐成像或目标波达方

收稿日期: 2020-07-27; 修回日期: 2020-11-23

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0300300、2016YFC0300802)资助项目。

作者简介: 姚琳(1994—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 研究方向为声呐信号处理。

通信作者: 刘晓东, E-mail: liuxd@mail.ioa.ac.cn

向(Direction of Arrival, DOA)估计时,通常是以假设各发射信号完全正交或忽略各发射信号间较低水平的互相关函数为前提提出的。然而对于同频的正、负线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号或正交编码信号,尽管其互相关函数水平较低,但是匹配滤波后信号互相关分量仍会导致成像结果距离旁瓣较高或 DOA 估计精度下降^[8-10]。为了避免这种情况,本文建立了 N 发 M 收的频分 MIMO 声呐阵列模型,令 MIMO 声呐的各发射阵元发射不同频带的窄带信号,各接收阵元的接收信号通过多组中心频率不同的解调器和滤波器,使各发射信号的目标回波分量分离,利用各虚拟阵元的输出进行 DOA 估计。之后本文提出了一种频分 MIMO 声呐的波达方向估计算法方向-相位域多重信号分类(Direction and Phase Domain-Multiple Signal Classification, DPD-MUSIC)算法。此外针对多目标相干信号回波同时到达的情况,给出了解相干解决方案。仿真试验验证了频分 MIMO 声呐 DPD-MUSIC 算法的有效性,与等接收阵元数 SIMO 声呐相比,频分 MIMO 声呐具有更高的角度分辨率和估计精度。

1 频分 MIMO 声呐信号模型

考虑密集式频分 MIMO 声呐阵列模型,其接收阵为 M 个阵元的均匀线阵,阵元间距为 d_r ,发射阵由 N 个发射阵元构成,间距为 d_t 。各发射阵元发射中心频率不同、包络相同的窄带信号,发射端第 n 个阵元对应的发射信号形式为

$$s_n(t) = \varphi(t) \exp\{j2\pi f_{cn}t\} \quad (1)$$

其中: $\varphi(t)$ 为发射信号的窄带包络。 f_{cn} 为第 n 个发射信号的载波频率, f_{cn} 可表示如下:

$$f_{cn} = f_{c0} + (n-1)\Delta f \quad (2)$$

其中: f_{c0} 为参考频率, Δf 为频率间隔。

假设远场有 K 个点目标,目标到声呐的参考距

离为 $L_k, k=1, \dots, K$, 目标信号到达角为 θ_k , 第 n 个发射阵元到第 k 个目标的距离为

$$R_n^k = L_k - (n-1)d_t \sin \theta_k \quad (3)$$

第 k 个目标到第 m 个接收阵元的距离为

$$R_m^k = L_k - (m-1)d_r \sin \theta_k \quad (4)$$

由发射端第 n 个阵元发射的信号经第 k 个目标反射后被第 m 个接收阵元接收,对应的时延为

$$\tau_{n,m}^k = \tau_n^k + \tau_m^k = \frac{R_n^k + R_m^k}{c} = \frac{2L_k - (n-1)d_t \sin \theta_k - (m-1)d_r \sin \theta_k}{c} \quad (5)$$

其中: c 为水中声速。第 m 个接收阵元的接收信号可表示为

$$y_m(t) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \sum_{n=1}^N \varphi(t - \tau_{n,m}^k) \exp\{j2\pi f_{cn}(t - \tau_{n,m}^k)\} \quad (6)$$

其中: σ_k 为第 k 个目标的复散射系数。

令接收端各接收通道均与 N 组中心频率分别为 f_{dn} 、工作带宽相同的接收模块连接,其中各接收模块的解调频率均满足 $f_b = f_{cn} - f_{dn}$, f_b 为各发射信号的回波经相对应解调模块解调到基带后的信号频率。经过带通滤波、解调、低通滤波处理,各接收通道中各发射信号 $s_n(t)$ 的回波分量分离并解调到相同基频带上。各接收通道信号经各接收模块解调、滤波处理后,最终可以得到 NM 路输出,其中将第 m 个接收阵元的接收信号中 $s_n(t)$ 的回波信号分量分离出来,得到虚拟阵列第 $[m+(n-1)M]$ 个虚拟阵元的输出信号形式为

$$x_{m+(n-1)M}(t) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \varphi(t - \tau_{n,m}^k) \exp\{j2\pi f_{cn}(t - \tau_{n,m}^k)\} \cdot \exp\{-j2\pi f_{dn}t\} = \sum_{k=1}^K \sigma_k \varphi(t - \tau_{n,m}^k) \exp\{j2\pi f_b t\} \exp\{-j2\pi f_{cn} \tau_{n,m}^k\} \quad (7)$$

在窄带远场目标的条件下,信号的复包络有 $\varphi(t - \tau_{n,m}^k) \approx \varphi(t)$, 则式(7)又可写为式(8):

$$x_{m+(n-1)M}(t) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \varphi(t) \exp\{j2\pi f_b t\} \exp\{-j2\pi f_{cn} \tau_{n,m}^k\} = \sum_{k=1}^K \sigma_k \varphi(t) \exp\{j2\pi f_b t\} \cdot \exp\left\{-j2\pi f_{cn} \left[\frac{2L_k - (n-1)d_t \sin \theta_k - (m-1)d_r \sin \theta_k}{c} \right]\right\} = \sum_{k=1}^K \sigma_k \varphi(t) \exp\{j2\pi f_b t\} \cdot \exp\left\{-j4\pi f_0 \frac{L_k}{c}\right\} \exp\left\{-j4\pi(n-1)\Delta f \frac{L_k}{c}\right\} \exp\left\{j2\pi f_{cn} \frac{(n-1)d_t \sin \theta_k}{c}\right\} \exp\left\{j2\pi f_{cn} \frac{(m-1)d_r \sin \theta_k}{c}\right\} \quad (8)$$

记 $\xi_k(t) = \sigma_k \alpha(t) \exp\{j2\pi f_b t\} \exp\left\{-j4\pi f_{c0} \frac{L_k}{c}\right\}$, 则有:

$$x_{m+(n-1)M}(t) = \sum_{k=1}^K \xi_k(t) \exp\left\{-j4\pi(n-1)\Delta f \frac{L_k}{c}\right\} \exp\left\{j \frac{2\pi(n-1)d_t \sin \theta_k}{\lambda_n}\right\} \exp\left\{j \frac{2\pi(m-1)d_r \sin \theta_k}{\lambda_n}\right\} \quad (9)$$

其中: $\lambda_n = c/f_{cn}$ 表示信号 $s_n(t)$ 的波长。

记相位差 $\phi_k = -4\pi\Delta f \frac{L_k}{c}$, 最终 NM 个阵元虚拟阵列的接收信号导向矢量可表示为

$$\mathbf{b}(\theta_k, \phi_k) = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1(\theta_k) e^{j\left(\frac{2\pi d_1 \sin \theta_k}{\lambda_2} + \phi_k\right)} \mathbf{a}_2(\theta_k) \cdots \\ e^{j\left[\frac{2\pi(N-1)d_1 \sin \theta_k}{\lambda_N} + (N-1)\phi_k\right]} \mathbf{a}_N(\theta_k) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\text{其中: } \mathbf{a}_n(\theta_k) = \left[1, e^{-j\frac{2\pi d_n \sin \theta_k}{\lambda_n}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi(M-1)d_n \sin \theta_k}{\lambda_n}} \right]^T.$$

所以频分 MIMO 声呐的虚拟 SIMO 声呐阵列接收信号可以表示为

$$\mathbf{X}(t) = \sum_{k=1}^K \mathbf{b}(\theta_k, \phi_k) \xi(t) + \tilde{\mathbf{N}}(t) \quad (11)$$

其中: $\tilde{\mathbf{N}}(t) \in \mathbb{C}^{NM \times 1}$ 为滤波、匹配滤波后的噪声矢量。

以两发 M 收的频分 MIMO 声呐为例描述其虚拟 SIMO 声呐的结构特点。图 1(a) 为 MIMO 声呐模型的示意图。MIMO 声呐的接收阵为 M 元均匀线阵, 阵元间距为 d , 发射阵由两发射阵元构成, 间距为 $(M+1)d$, 两个发射阵元分别发射中心频率为 f_{c1} 和 f_{c2} 、包络相同的窄带信号。图 1(b) 为 MIMO 声呐的虚拟 SIMO 声呐的示意图。虚拟子阵 1 为由阵元 $R_1 \sim R_M$ 组成的均匀线阵, 虚拟子阵 2 为由阵元 $R_{M+1} \sim R_{2M}$ 组成的均匀线阵。以中心频率 f_{c1} 为基准, 子阵 1 的阵元间距为 d , 子阵 2 的阵元间距为 $\frac{f_{c2}}{f_{c1}} d$,

且两子阵的阵中心间距为 $(M+1)\frac{f_{c2}}{f_{c1}} d$ 。

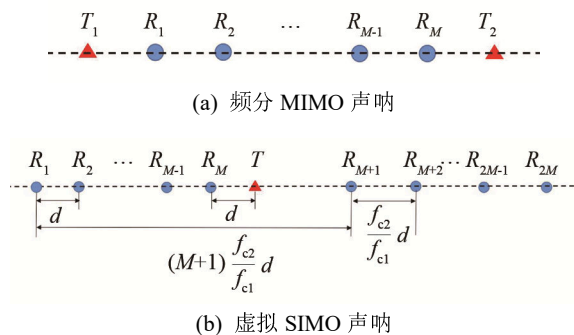


图 1 频分 MIMO 声呐及其虚拟 SIMO 声呐示意图

Fig.1 Schematic diagram of frequency division MIMO sonar and its virtual SIMO sonar

2 DPD-MUSIC 波达方向估计算法

2.1 DPD-MUSIC 算法

MUSIC 算法是一种被广泛应用的基于信号特征子空间的 DOA 估计算法, 该算法利用信号导向

矢量与噪声子空间正交的特性, 构造谱函数进行角度搜索, 具有估计精度高、分辨能力强等优点, 且适用于任意阵型^[11]。

对于频分 MIMO 声呐的 DOA 估计, 本文对常规 MUSIC 算法进行改进, 提出了频分 MIMO 声呐的 DPD-MUSIC 算法。DPD-MUSIC 算法同样利用了信号导向矢量与噪声子空间的正交特性, 但与常规 MUSIC 算法不同的是, 频分 MIMO 声呐的虚拟 SIMO 阵列接收信号导向矢量除了与信号到达方向 θ 有关外, 还与因信号频率不同产生的相位差项有关, 信号导向矢量中存在方向 θ 和相位差 ϕ 两个未知量, 所以 DPD-MUSIC 算法需要构造方位谱进行到达角 θ 和相位 ϕ 域两个维度的搜索, 从而实现目标的方位估计。

基于以上思路, 本文提出的 DPD-MUSIC 算法处理步骤总结如下:

(1) 取 NM 路等效阵元输出的目标回波数据 $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{NM \times P}$, P 为信号快拍数, 估计数据 $\mathbf{X}$ 的协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{X}\mathbf{X}^H / P$;

(2) 利用 $\hat{\mathbf{R}}$ 对目标数目 K 进行估计^[12-13];

(3) 对 $\hat{\mathbf{R}}$ 进行特征分解, 估计其噪声子空间 $\hat{\mathbf{U}}_N$;

(4) 利用导向矢量

$$\mathbf{b}(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1(\theta) e^{j\left(\frac{2\pi d_1 \sin \theta}{\lambda_2} + \phi\right)} \mathbf{a}_2(\theta) \cdots e^{j\left[\frac{2\pi(N-1)d_1 \sin \theta}{\lambda_N} + (N-1)\phi\right]} \mathbf{a}_N(\theta) \end{bmatrix}$$

构造二维空间谱搜索函数:

$$P(\theta, \phi) = \frac{1}{\mathbf{b}(\theta, \phi) \hat{\mathbf{U}}_N \hat{\mathbf{U}}_N^H \mathbf{b}^H(\theta, \phi)} \quad (14)$$

利用式(14)进行二维谱估计。此外为了减小运算量, 可以取某条虚拟子阵的 M 路输出, 预先利用旋转不变子空间算法(Estimating Signal Parameter via Rotational Invariance Techniques, ESPRIT)粗略估计回波信号到达角 θ_r , 之后在角度区间 $\theta \in [\theta_r - \Delta\theta, \theta_r + \Delta\theta]$ 和相位差 $\phi \in [-\pi, \pi]$ 区间内进行二维谱搜索。

2.2 对多目标相干信号回波估计的处理

2.1 节提出的 DPD-MUSIC 算法实现了对非相干信号的估计。然而声呐在水下进行目标探测时, 常会遇到多目标回波信号同时到达的情况, 并且各方向的回波信号通常是相干的。对于频分 MIMO 声呐, 其虚拟 SIMO 声呐阵列是由多条阵元间距不同的均匀虚拟线阵构成的非均匀线阵, 无法直接利用空间平滑类算法进行解相干^[14]。因此本文以包含两发射阵元的双频 MIMO 声呐为例, 提出了

DPD-MUSIC 算法对多目标相干回波 DOA 估计的解决方案。

为了能够估计同一距离向上多个方向目标的方位信息,双频 MIMO 声呐两个发射信号的中心频率需满足一定关系。以中心频率为 f_{c1} 的信号为基准,双频 MIMO 声呐的虚拟 SIMO 声呐两子阵的阵内阵元间距分别为 d 和 $f_{c2}/f_{c1} \cdot d$, 所以如果 f_{c2} 与 f_{c1} 满足一定的比例关系, 分别在两个虚拟子阵中选取一些阵元, 构成具有关于中心对称结构的阵列, 则可利用空间平滑类算法进行解相干处理。

假定 MIMO 声呐接收阵元数 $M=16$, 信号频率 $f_{c2}/f_{c1}=1.5$, MIMO 声呐及其虚拟 SIMO 声呐如图 2 所示, 虚拟 SIMO 声呐的子阵 2 的阵元间距为子阵 1 的 1.5 倍。为了尽可能多地选取阵元, 分别在子阵 1 和子阵 2 中以间距 $3d$ 为间隔选取阵元, 即选取子阵 1 中的 $R_1, R_4, R_7, R_{10}, R_{13}, R_{16}$ 和子阵 2 中的 $R_{22}, R_{24}, R_{26}, R_{28}, R_{30}, R_{32}$ 可以构成 $\tilde{M}=12$ 的线阵, 该阵列两子阵的阵内阵元间距均为 $3d$, 子阵间间距为 $1.5(M+6)d$ 。

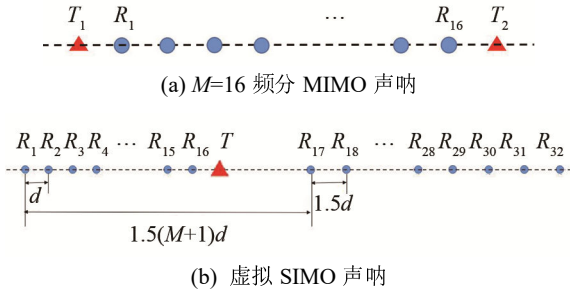


图2 接收阵元 $M=16$ 的频分 MIMO 声呐及其虚拟 SIMO 声呐
Fig.2 The frequency division MIMO sonar array and its virtual array of 16 receiving elements

利用被选取的虚拟阵元的目标回波信号 $\tilde{X} \in \mathbb{C}^{\tilde{M} \times P}$, 构造经平滑处理的数据协方差矩阵:

$$\tilde{R} = \frac{1}{2L} [\tilde{X}\tilde{X}^H + J(\tilde{X}\tilde{X}^H)^* J] \quad (15)$$

其中:

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 1 \\ \vdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

利用协方差矩阵 $\tilde{R}$ 估计其噪声子空间 $\tilde{U}_N$. 构造导向矢量:

$$\tilde{b}(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} \tilde{a}_1(\theta) & e^{-j\frac{2\pi(M+6)d \sin \theta}{\lambda_2} \phi} \tilde{a}_2(\theta) \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

其中:

$$\tilde{a}_1(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & e^{-j\frac{6\pi d \sin(\theta)}{\lambda_1}} & \cdots & e^{-j\frac{6\pi(\tilde{M}/2-1)d \sin(\theta)}{\lambda_1}} \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

$$\tilde{a}_2(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & e^{-j\frac{4\pi d \sin(\theta)}{\lambda_2}} & \cdots & e^{-j\frac{4\pi(\tilde{M}/2-1)d \sin(\theta)}{\lambda_2}} \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

然后参考式(14)利用 DPD-MUSIC 算法进行谱搜索估计目标方向。

值得说明的是, 上文仅以两个信号频率满足 $f_{c1}:f_{c2}=2:3$ 的关系为例, 实际上只要两信号中心频率满足一定的比例关系, 其虚拟 SIMO 声呐两个子阵的阵内阵元间距就会满足同样的比例关系。在不损失阵列孔径的前提下, 分别在两个子阵中选取一些阵元构成新的具有对称结构的阵列, 之后对新阵列的输出进行空间平滑处理, 实现回波信号的解相干。

3 数值仿真与分析

下面进行仿真试验, 以双频 MIMO 声呐为例, 评估频分 MIMO 声呐的 DPD-MUSIC 算法 DOA 估计性能。

3.1 单目标情况

分别仿真了同频带 MIMO 声呐、双频 MIMO 声呐以及 SIMO 声呐对单点目标的方位估计。同频带 MIMO 声呐的两个发射阵元分别发射中心频率 $f_{c1}=100$ kHz、带宽 $B=10$ kHz、脉宽 $T=20$ ms 的正调频信号 $s_1(t)$ 和负调频信号 $s_2(t)$ 。采样率 $F_s=100$ kHz。接收阵为 $M_1=16$ 的均匀线阵, 阵元间距为 $d_{t1}=c/f_{c1}$, 水中声速 $c=1500$ m·s⁻¹, 两发射阵元间距为 $d_{t1}=M_1 d_{t1}$ 。假设目标为远场点目标, 目标相对于声呐的参考距离 $L=75$ m, 目标方位 $\theta_0=20^\circ$ 。图 3 展示了同频带 MIMO 声呐发射信号 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 的自相关函数和互相关函数, 两信号具有相同的自相关函数和较低水平的互相关函数, 因此可以利用匹配滤波将两信号的回波分量进行分离。将各通道接收信号通过解调频率 $f_{d1}=95$ kHz 的接收模块后, 分别与信号 $s_1(t)$ 或 $s_2(t)$ 进行匹配滤波, 最终得到 $2M$ 通道的虚拟 SIMO 阵列。频分 MIMO 声呐的阵型与同频带 MIMO 声呐相同, 两发射阵元分别发射中心频率 $f_{c1}=100$ kHz 和 $f_{c2}=150$ kHz、带宽 $B=10$ kHz、脉宽 $T=20$ ms 的正调频信号 $s_1(t)$ 和 $s_3(t)$ 。各通道接收信号分别通过解调频率 $f_{d1}=95$ kHz 和 $f_{d2}=145$ kHz 的两组接收模块后, 两信号的回波分量分离, 之后分别与相应的发射信号 $s_1(t)$ 或 $s_3(t)$ 进行匹配滤波, 得到频分 MIMO 声呐的 $2M$ 个阵元的虚拟 SIMO 阵列的输出。此外还对 $M_1=16$ 和 $M_2=32$ 的 SIMO 声呐进行仿真。两个 SIMO 声呐的发射阵元均发射信号 $s_1(t)$, 接收阵与同频带 MIMO 声呐的接收阵相同, 各接收通道的接

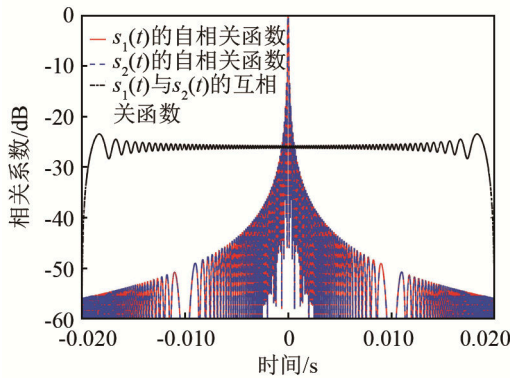


图3 同频带正、负调频信号的相关函数
Fig.3 Correlation functions of positive and negative LFM signals in the sample frequency band

收信号通过解调频率 $f_{di}=95\text{ kHz}$ 的接收模块并与信号 $s_1(t)$ 进行匹配滤波后得到最终的输出信号。四种声呐阵列的接收信号在匹配滤波前信噪比均为 10 dB 。在下面的仿真中进行 DOA 估计时,均选取回波匹配滤波的输出信号峰值附近的 72 个采样点数据作为待处理信号数据,此外, SIMO 声呐及同频带 MIMO 声呐均利用 MUSIC 算法进行 DOA 估计,双频 MIMO 声呐利用 DPD-MUSIC 算法进行 DOA 估计。此外,为了降低运算量,利用 ESPRIT 算法对频分 MIMO 声呐的虚拟 SIMO 声呐子阵 1 的输出进行 DOA 估计,得到粗估计结果 θ_r ,之后在 $\phi \in [\pi, \pi]$ 、 $\theta \in [\theta_r - \Delta\theta, \theta_r + \Delta\theta]$ 、 $\Delta\theta = 10^\circ$ 范围内进行谱搜索。

图4为频分 MIMO 声呐的 DPD-MUSIC 算法的二维谱估计结果。图5中实线表示 DPD-MUSIC 谱在峰值处垂直于 ϕ 轴方向上的切面,即谱峰对应 ϕ 轴坐标值 ϕ_0 时的角度向搜索结果。另外三条线分别表示阵元数 $M_1=16$ 、 $M_2=32$ 的 SIMO 声呐以及同频带 MIMO 声呐的 MUSIC 算法谱估计结果。可以看出同频带 MIMO 声呐的 MUSIC 谱峰较其他三种声呐的 MUSIC 谱峰会有一些偏移,频分 MIMO 声呐的谱峰处角度向 MUSIC 谱比 32 阵元时的 MUSIC

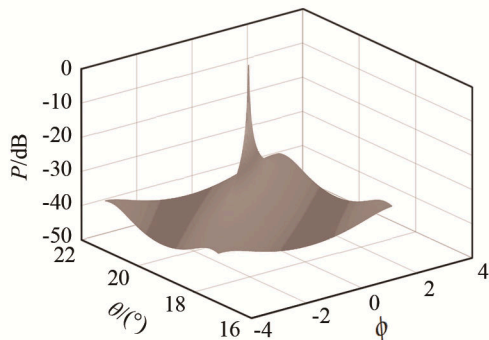


图4 频分 MIMO 声呐的 DPD-MUSIC 谱
Fig.4 DPD-MUSIC spectrum of frequency division MIMO sonar

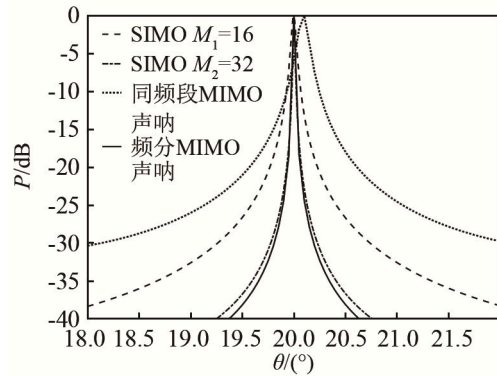


图5 单 DOA 估计时,峰值处 θ 方向上的 DPD-MUSIC 谱搜索结果

Fig.5 Searching results of DPD-MUSIC spectrum in the θ direction for single target DOA estimation

谱的谱峰宽度略窄,明显窄于 16 阵元 SIMO 声呐的 MUSIC 谱峰。说明频分 MIMO 声呐获得了比等接收阵元 SIMO 声呐更大孔径的虚拟阵列和更高的角度分辨率。

频分 MIMO 声呐利用 DPD-MUSIC 算法、SIMO 声呐及同频带 MIMO 声呐利用 MUSIC 算法,分别在信号匹配滤波前信噪比(Signal to Noise Ration, SNR)为 $-25 \sim 10\text{ dB}$ 的条件下进行 $Q=200$ 次蒙特卡罗(Monte Carlo)试验,并统计到达角估计值的均方根误差(Root-Mean-Square Error, RMSE),表达式为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{Q \times K} \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K (\hat{\theta}_k^q - \theta_k)^2} \quad (17)$$

式中: $\hat{\theta}_k^q$ 为第 k 个目标回波的第 q 次独立试验的到达角估计值, θ_k 为第 k 个目标回波的真实到达角度,以 $^\circ$ 为单位。

图6表示四种声呐利用算法进行 DOA 估计时,角度估计的均方根误差随信噪比变化的曲线。随着信噪比的增加,可以看出同频带 MIMO 声呐的 MUSIC 算法 DOA 估计是有偏的。这说明尽管同频带正、负调频信号的互相关函数很低,可以近似看作正交信号,但发射信号的互相关分量对 DOA 估计仍会造成干扰,尤其在 SNR 较高时干扰造成的影响更明显。此外在低信噪比时,频分 MIMO 声呐 DPD-MUSIC 算法的角度估计精度高于阵元数 $M_1=16$ 的 SIMO 声呐 MUSIC 算法,但略低于 $M_2=32$ 的 SIMO 声呐 MUSIC 算法。分析原因,尽管频分 MIMO 声呐的等效虚拟线阵孔径比 $M_2=32$ 的 SIMO 声呐阵列孔径长,但由于 DPD-MUSIC 算法需要进行相位差 ϕ -到达角 θ 两个维度上的搜索,相位差估计精度也会影响角度的估计精度,所以对于单点目标的 DOA 估计,频分 MIMO 声呐 DPD-MUSIC 算法的 DOA 估计精度要比等虚拟阵元数的 SIMO 声呐的 MUSIC 算法精度略低。

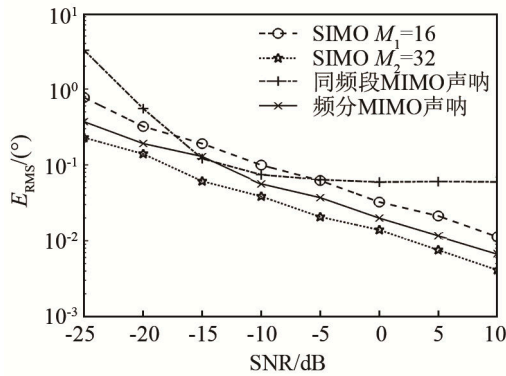


图6 单目标角度估计均方根误差随信噪比变化曲线
Fig.6 RMSE of single target DOA estimation versus SNR

3.2 多目标相干回波情况

频分 MIMO 声呐的阵型及发射信号形式与 3.1 节相同。在参考距离 $L=75\text{ m}$ 处有两个点目标，方位分别为 20° 和 26° 。对 $M_1=16$ 和 $M_2=32$ 的 SIMO 声呐进行仿真，两阵列的发射信号均为 $s_1(t)$ ，阵元间距均 d_n 。因为两目标的回波信号是相干信号，在利用空间平滑的 DPD-MUSIC 算法对频分 MIMO 声呐进行 DOA 估计时，参考 2.2 节中图 2(b)选取参与运算的虚拟阵元通道，按照式(15)进行解相干。对于 SIMO 声呐的 DOA 估计，也依据式(15)进行解相干预处理，然后再进行 MUSIC 谱估计。图 7 为信号匹配滤波前 SNR 为 10 dB 时，双频 MIMO 声呐的 DPD-MUSIC 算法二维谱估计结果，其中 P 表示 DPD-Music 谱。图 8 中实线表示 DPD-MUSIC 谱在峰值处垂直于 ϕ 轴方向上的切面，另两条线分别表示 SIMO 声呐 $M_1=16$ 和 $M_2=32$ 在 SNR 为 10 dB 时的 MUSIC 谱。由于频分 MIMO 声呐的虚拟阵列基线长度大于仿真中 $M_2=32$ 的 SIMO 声呐，所以从图 8 可以看出，MIMO 声呐的 DPD-MUSIC 谱峰更尖锐、分辨力更高。此外，由于频分 MIMO 声呐用于 DOA 估计的虚拟阵元子阵间的间距大于半波长，所以在 DPD-MUSIC 谱的角度向上会出现伪

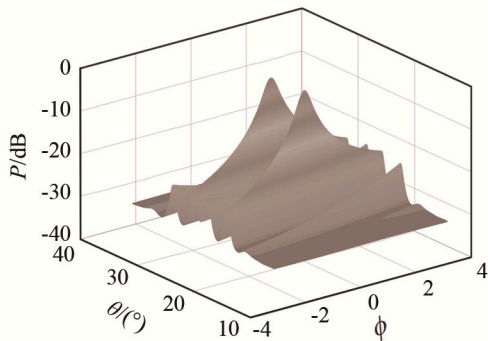


图7 频分 MIMO 声呐的 DPD-MUSIC 谱
Fig.7 DPD-MUSIC spectrum of frequency diverse MIMO sonar

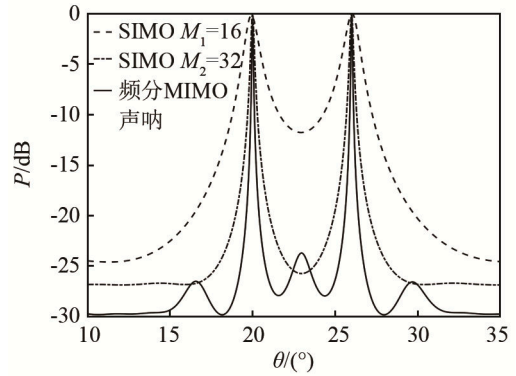


图8 双目标 DOA 估计时，峰值处 θ 方向上的 DPD-MUSIC 谱搜索结果
Fig.8 Searching results of DPD-MUSIC spectrum in the θ direction for double targets DOA estimation

峰，但是伪峰高度较低，可以通过设置门限或根据 ESPRIT 算法粗估计结果最终确定 DOA 估计结果。

在每种信噪比条件下均进行 200 次的 Monte Carlo 仿真试验。图 9 表示三种声呐进行 DOA 估计时测角均方根误差随信噪比变化的曲线。可以看出，低信噪比时 MIMO 声呐利用 DPD-MUSIC 算法的角度估计精度明显优于等接收阵元数 SIMO 声呐 MUSIC 算法的估计精度，但仍略低于 $M_2=32$ 的 SIMO 声呐的 MUSIC 算法的角度估计精度。

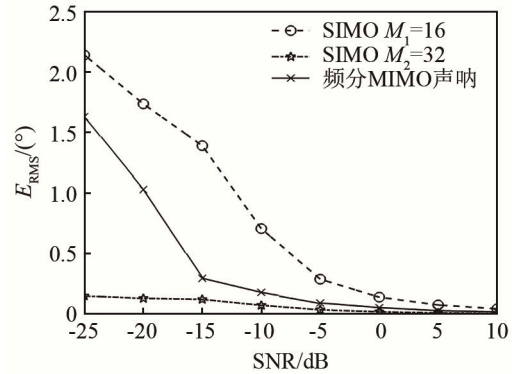


图9 两目标角度估计均方根误差随信噪比变化曲线
Fig.9 RMSE of DOA estimation for double targets versus SNR

仍在两目标条件下，其中一目标固定在 20° 方向上，另一目标在 $21^\circ \sim 30^\circ$ 方向上变化，即令两目标方向夹角在 $1^\circ \sim 10^\circ$ 之间变化。在接收信号匹配滤波前信噪比为 5 dB 的条件下，对每种夹角情况均进行 200 次 Monte Carlo 仿真试验，统计这三种声呐 DOA 估计的成功概率及角度估计均方根误差随目标夹角的变化，若估计得到的 MUSIC 谱角度向出现两个峰值，即认为算法可以将两目标分辨出来，记作一次成功事件，统计结果如图 10 所示。从图 10(a)的成功概率曲线可以看出， $M_1=16$ 的频分 MIMO 声呐的角度分辨率略高于 $M_2=32$ 的

SIMO 声呐,但从图 10(b)角度均方根误差统计结果来看,MIMO 声呐 DPD-MUSIC 算法的角度估计精度仍比 $M_2=32$ 的 SIMO 声呐 MUSIC 算法略低。尽管在两信号夹角较小的情况下,频分 MIMO 声呐 DPD-MUSIC 算法的 DOA 估计精度略有波动,但从整体趋势上看,频分 MIMO 声呐 DPD-MUSIC 算法的角度分辨率和估计精度均明显优于等接收阵元数 $M_1=16$ 的 SIMO 声呐的 MUSIC 算法。

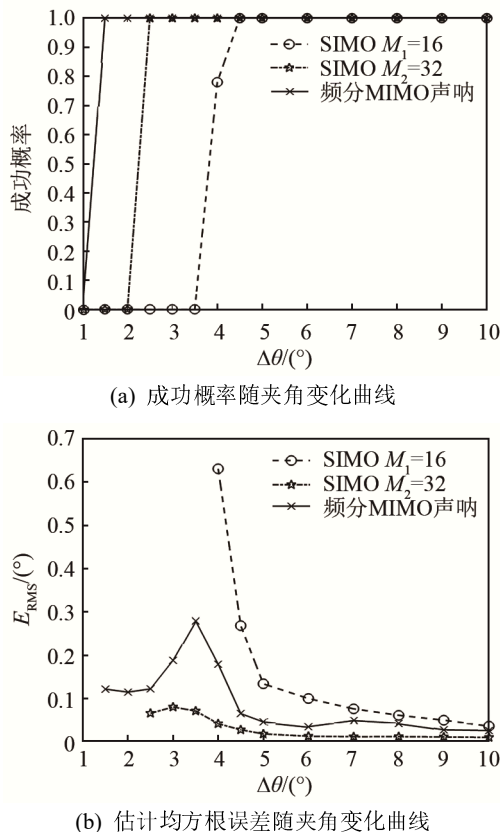


图 10 DOA 估计的成功率和均方根误差随两目标夹角的变化
Fig.10 Variations of successful rate and RMSE of DOA estimation with the angle between two targets

4 结 论

本文建立了 N 发 M 收的频分 MIMO 声呐信号模型,提出了基于频分 MIMO 声呐的 DPD-MUSIC 波达方向估计算法,并且对多目标相干回波进行了 DOA 估计,在不损失虚拟阵列孔径的前提下提出了解决方案。与发射信号为同频带信号的 MIMO 声呐相比,频分 MIMO 声呐可以有效避免发射信号间互相关分量对 DOA 估计带来的精度下降问题。仿真试验验证了频分 MIMO 声呐利用 DPD-MUSIC 算法进行 DOA 估计的有效性,且可以获得优于等接收阵元数 SIMO 声呐利用 MUSIC 算法进行 DOA 估计

时的角度分辨率和估计精度。

参 考 文 献

- [1] FISHLER E, HAIMOVICH A, BLUM R, et al. MIMO radar: an idea whose time has come[C]//Proceedings of the 2004 IEEE Radar Conference (IEEE Cat. No.04CH37509). Philadelphia, PA, USA. IEEE, 2004: 71-78.
- [2] BEKKERMAN I, TABRIKIAN J. Target detection and localization using MIMO radars and sonars[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, **54**(10): 3873-3883.
- [3] 刘雄厚, 孙超, 唐政, 等. MIMO 声纳波束图及其目标探测能力研究[J]. 声学技术, 2011, **30**(3): 289-291.
- [4] LIU Xionghou, SUN Chao, TANG Zheng, et al. Research on MIMO sonar beam pattern and object probing ability [J]. Technical Acoustics, 2011, **30**(3): 289-291.
- [5] HAIMOVICH A M, BLUM R S, CIMINI L J. MIMO radar with widely separated antennas[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, **25**(1): 116-129.
- [6] LI J, STOICA P. MIMO radar with colocated antennas[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, **24**(5): 106-114.
- [7] 刘雄厚, 孙超, 杨益新, 等. 小尺度超指向性 MIMO 声纳高分辨水下声成像[J]. 声学技术, 2015, **34**(2): 97-99.
- [8] LIU Xionghou, SUN Chao, YANG Yixin, et al. On high-resolution underwater acoustic imaging using small-size superdirectivity MIMO sonar [J]. Technical Acoustics, 2015, **34**(2): 97-99.
- [9] 刘雄厚, 孙超, 杨益新, 等. 密布式 MIMO 声纳的自由度和阵增益[J]. 声学技术, 2015, **34**(6): 193-196.
- [10] LIU Xionghou, Sun Chao, Yang Yixin, et al. On degree of freedom and array gain of co-located MIMO sonar[J]. Technical Acoustics, 2015, **34**(6): 193-196.
- [11] ZHENG G M. DOA estimation in MIMO radar with non-perfectly orthogonal waveforms[J]. IEEE Communications Letters, 2017, **21**(2): 414-417.
- [12] WEN F Q. Computationally efficient DOA estimation algorithm for MIMO radar with imperfect waveforms[J]. IEEE Communications Letters, 2019, **23**(6): 1037-1040.
- [13] 刘雄厚, 孙超, 卓颀, 等. 基于凸优化方法的 MIMO 成像声纳的失配滤波处理[J]. 西北工业大学学报, 2013, **31**(3): 367-372.
- [14] LIU Xionghou, SUN Chao, ZHUO Jie, et al. Proposing a "mismatched" Filtering method for obtaining better sidelobe suppression effect for MIMO sonar imaging based on convex optimization[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, **31**(3): 367-372.
- [15] BORKAR A N. Performance of MUSIC algorithms for DOA estimation for coherent and non coherent detection[C]//2019 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). Coimbatore, India. IEEE, 2019: 1355-1359.
- [16] NADLER B. Nonparametric detection of signals by information theoretic criteria: performance analysis and an improved estimator[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, **58**(5): 2746-2756.
- [17] FISHLER E, GROSMANN M, MESSER H. Detection of signals by information theoretic criteria: general asymptotic performance analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, **50**(5): 1027-1036.
- [18] ONG L T. Experimental study on spatial smoothing direction of arrival estimation for coherent signals[C]//2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). Singapore. IEEE, 2016: 1411-1414.