

◇ 研究报告 ◇

单矢量水听器的高分辨目标方位跟踪算法研究*

王超[†] 笄良龙 韩梅 孙芹东 王文龙

(海军潜艇学院 青岛 266199)

摘要 根据单矢量水听器自身具有阵列流型的特点,提出了适用于对目标保持连续跟踪的空域预滤波 MUSIC 算法。通过调整滤波器通带中心角使其保持在目标估计方位角附近,可以消除滤波器通带中心角偏离目标真实方位角时传统预滤波 MUSIC 算法产生的目标方位估计误差。仿真结果表明,改进预滤波 MUSIC 算法可以减小甚至消除低信噪比情况下目标方位估计存在的较大误差。海试数据结果表明,阵元域 MUSIC 和改进预滤波 MUSIC 都可实现对单频脉冲信号和线性调频信号的目标方位估计,且估计结果与 GPS 舰位推算结果一致,但改进预滤波 MUSIC 算法主瓣更尖锐。对宽带航船噪声处理结果显示,改进预滤波 MUSIC 算法使单矢量水听器在存在目标干扰时的探测距离从 2 km 提升到了 5 km,验证了改进预滤波 MUSIC 算法可实现弱目标情况下的高分辨目标方位跟踪。

关键词 矢量水听器,空域预滤波,通带中心角,方位跟踪

中图分类号: TN911.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2017)01-0059-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.01.010

High-resolution target azimuth tracking for a single vector hydrophone

WANG Chao DA Lianglong HAN Mei SUN Qindong WANG Wenlong

(Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China)

Abstract Taking into account the characteristic of single acoustic vector sensor, MUSIC algorithm of spatial pre-filtering approach was developed. By adjusting the angle of the filter passband center in the vicinity of the target estimated azimuth, estimation error produced by traditional pre-filtering MUSIC algorithm was removed. Simulation indicates that the improved pre-filtering MUSIC algorithm can reduce or even eliminate the existent greater DOA estimation error in low signal-to-noise ratio(SNR). Finally, the sea-trial data was processed using the conventional MUSIC and improved pre-filtering MUSIC. Results show that both algorithms can achieve DOA estimation for single-frequency pulse signal and chirp signal, and the estimated results are consistent with the GPS ship reckoning. But the main lobe of the improved pre-filtering MUSIC algorithm is sharper. Broadband noise processing results show that detection distance upgrade from 2 km to 5 km in the presence of target interference for a single vector hydrophone, which indicates that the improved pre-filtering MUSIC algorithm can be achieved high-resolution target tracking in low SNR.

Key words Acoustic vector sensor, Spatial pre-filtering, Angle of the filter passband center, Target tracking

2016-03-17 收稿; 2016-05-19 定稿

*国家自然科学基金项目 (61203271)

作者简介: 王超 (1988-), 男, 山东章丘人, 博士研究生, 研究方向: 矢量信号处理和海洋环境噪声。

[†] 通讯作者 E-mail: 120107769@qq.com

1 引言

单矢量水听器水下目标方位估计与跟踪是矢量水听器走向应用的关键技术。与传统声压水听器相比,矢量水听器可以同步共点测量声场中的声压和质点振速,可以提供更加全面的声场信息,因而矢量水听器在弱目标探测领域有着传统声压水听器无法比拟的优势^[1-3]。

高分辨目标方位估计技术是矢量信号处理的重要研究内容,目前国内外有关单矢量水听器和矢量水听器阵列高分辨方位估计的研究方法主要有: MVDR 算法^[4-8]以及 MUSIC(Multiple signal classification)算法为代表的子空间分解类算法^[9-14]。但常规的阵元域 MUSIC 算法存在鲁棒性差、方位分辨信噪比门限较高等缺点^[15]。通过采用空间矩阵滤波器作为预处理器,对阵元域数据进行预滤波处理,有选择性的让空间某一方位的信号无失真地通过滤波器,而滤除非期望方位的信号,可对阵元域数据进行净化,提高信噪比,有利于对远处弱目标的探测,因此获得了较为广泛的应用^[15-19]。

本文研究了基于单矢量水听器的预滤波 MUSIC 方法,研究结果表明,预滤波 MUSIC 算法较阵元域 MUSIC 算法可以得到更小的 -3 dB 主波束宽度,且束宽基本不随信噪比的减小而发生变化,提高了低信噪比情况下的目标方位分辨力,改善了阵元域 MUSIC 算法方位分辨门限高的缺点。但如果滤波器通带范围中心角偏离目标真实方位角,在低信噪比情况下会造成目标方位角估计存在较大误差,且信噪比越低、滤波器通带中心角偏离目标真实方位角越大,则方位角估计误差越大,误差方向与中心角偏离目标真实方位角的方向一致,这对方位变化较大的目标方位探测与跟踪会产生极大的影响。针对空域滤波器通带中心角如偏离目标真实方位角难以实现目标准确定向的情况,本文提出了适用于对目标保持连续跟踪的高分辨算法,试验数据处理结果验证了算法的有效性。

2 算法理论

2.1 单矢量水听器数学模型及常规 MUSIC 算法

单矢量水听器可以同步共点输出声压 P 和正交的三维振速 V_x 、 V_y 、 V_z ,因此可以将单矢量水听器看成一个小型的四基元固定阵列,不同于空间分布

阵列,单矢量水听器本身的阵列流型只包含了目标的方位角和俯仰角信息,并没有包含时间延迟信息,因此与目标信号的频率无关,故可对宽带信号直接在时域内进行处理而无需调整阵列流型矢量^[13]。

根据单矢量水听器数学模型,假设水听器所在空间有 K 个远场窄带信号从来波方向 $\{\Omega_k = [\theta_k, \phi_k]^T, k = 1, 2, \dots, K\}$ 入射到单个三维矢量水听器阵元上,其中, $\theta_k \in [0, 2\pi]$ 代表第 k 个到达信号的方位角(与 X 通道正方向的夹角), $\phi_k \in [0, \pi]$ 代表第 k 个到达信号的俯仰角(信号入射方向与其水平投影的夹角)。则第 k 个信号在单矢量水听器上的阵列流型为: $\mathbf{a}(\Omega_k) = [1, \cos \theta_k \cos \phi_k, \sin \theta_k \cos \phi_k, \sin \phi_k]^T$, 则 t 时刻单矢量水听器 4 个通道接收到的数据为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (1)$$

式(1)中, $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\Omega_1), \mathbf{a}(\Omega_2), \dots, \mathbf{a}(\Omega_K)]$ 是 $4 \times K$ 维阵列流型矩阵; $\mathbf{s}(t)$ 是 $K \times 1$ 维到达信号向量; $\mathbf{n}(t)$ 是 4×1 维噪声数据向量; $\mathbf{X}(t)$ 是单矢量水听器的 4×1 维数据向量。

假定噪声与信号互不相关,则数据协方差矩阵可以表示为^[15]

$$\mathbf{R}_x = E(\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)) = \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \mathbf{R}_n, \quad (2)$$

式(2)中, $\mathbf{R}_s$ 为 $K \times K$ 维信号协方差矩阵, $\mathbf{R}_n$ 为 4×4 维噪声协方差矩阵。为使阵列流型矩阵各个列线性独立,需满足 $K < 4$,即探测区域内目标个数小于矢量水听器通道数。根据相关矩阵的性质可知,由 $\mathbf{R}_x$ 形成的矩阵为满秩矩阵且存在 K 个正的特征值。对数据协方差矩阵 $\mathbf{R}_x$ 进行特征值分解,并将特征值从大到小的顺序排列,由较大的 K 个特征值对应的归一化特征向量张成的子空间为信号子空间 $\mathbf{E}_s$, 而由 $4-K$ 个小特征值对应的归一化特征向量张成的子空间为噪声子空间 $\mathbf{E}_n$ 。利用信号子空间与噪声子空间相互正交这一特性可以构造单矢量水听器 MUSIC 空间谱:

$$P_{\text{MUSIC}}(\Omega) = \frac{1}{\mathbf{A}^H(\Omega)\mathbf{E}_n\mathbf{E}_n^H\mathbf{A}(\Omega)}, \quad (3)$$

其中, $\mathbf{A}(\Omega)$ 为通过滤波器通带后的阵列流型,空间谱 $P_{\text{MUSIC}}(\Omega)$ 的峰值方位即反映了信号的入射方位。

2.2 空域预滤波 MUSIC 算法

空间矩阵滤波器是一种阵列波束优化技术中采用的方法^[9-14],基本思想为:合理构建一个

$M \times M$ (M 为阵元数) 维矩阵滤波器 $\mathbf{H}$, 通过将滤波器矩阵与阵元接收数据矩阵相乘对阵元数据进行滤波, 可使阵元域数据得到净化, 提高信噪比。

对于三维的单矢量水听器模型, 空域滤波器可以表示成一个 4×4 维矩阵 $\mathbf{H}$, 阵元接收数据经过空域滤波器处理后输出为

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{H}^H \mathbf{X}(t). \quad (4)$$

空域滤波器可以有选择性的让空间某一方位的信号无失真地通过, 而滤除非期望方位的信号, 这需要滤波器应当满足:

$$\mathbf{H}^H \mathbf{A}(\Omega) = \begin{cases} \mathbf{A}(\Omega), & \theta \in \theta_p, \phi \in \phi_p, \\ 0, & \theta \in \theta_s, \phi \in \phi_s, \end{cases} \quad (5)$$

其中, θ_p 和 ϕ_p 对应滤波器的通带扇面, θ_s 和 ϕ_s 对应滤波器的阻带扇面。文献[15]给出了空域滤波器的4种设计准则, 本文利用最小均方准则设计滤波器, 经过预滤波后的数据协方差矩阵可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_y &= \mathbf{E}(\mathbf{Y}(t)\mathbf{Y}^H(t)) \\ &= \mathbf{H}^H \mathbf{A} \mathbf{R}_s \mathbf{A}^H \mathbf{H} + \mathbf{H}^H \mathbf{R}_n \mathbf{H}. \end{aligned} \quad (6)$$

将协方差矩阵 $\mathbf{R}_y$ 进行特征值分解, 就可以得到预滤波之后的信号子空间 $\mathbf{E}_{ys}$ 和噪声子空间 $\mathbf{E}_{yn}$, 为消除通带响应向量畸变的影响, 需对 MUSIC 空间谱表达式做适当改进, 改进后的 MUSIC 空间谱表达式为

$$P_{\text{MUSIC}}(\Omega) = \frac{\mathbf{C}^H(\Omega)\mathbf{C}(\Omega)}{\mathbf{C}^H(\Omega)\mathbf{E}_{yn}\mathbf{E}_{yn}^H\mathbf{C}(\Omega)}, \quad (7)$$

式(7)中, $\mathbf{C}(\Omega) = \mathbf{H}^H \mathbf{A}(\Omega)$ 为经过预滤波之后的阵列流型向量。

3 仿真分析及算法改进

3.1 仿真分析

对单矢量水听器预滤波 MUSIC 算法进行仿真验证, 并与常规阵元域 MUSIC 算法进行了对比。为方便起见, 本文仅对目标从水平方向入射进行分析, 即到达信号的俯仰角 ϕ 设定为 0° 。仿真中信号与噪声均为宽带的零均值高斯白噪声, 信噪比为 0 dB , 信号长度为 4096, 目标方位角 $\theta = 100^\circ$, 搜索步长 $\Delta\theta = 1^\circ$, 空域滤波器通带范围为 $[50^\circ \ 1^\circ: 150^\circ]$, 阻带范围为 $[0^\circ: 1^\circ: 45^\circ] \cup [155^\circ: 1^\circ: 360^\circ]$, 此滤波器的通带中心角 f_c 为 100° , 与目标方位角一致, 如无特

别说明上述仿真条件不变。图1为 3×3 维空间矩阵滤波器的幅度响应, 图2为阵元域 MUSIC 与预滤波 MUSIC 的目标方位估计结果, 图2中目标方位估计结果为 50 次独立实验的平均值, 图3给出了两种算法的 -3 dB 主波束宽度随信噪比变化的对比图。

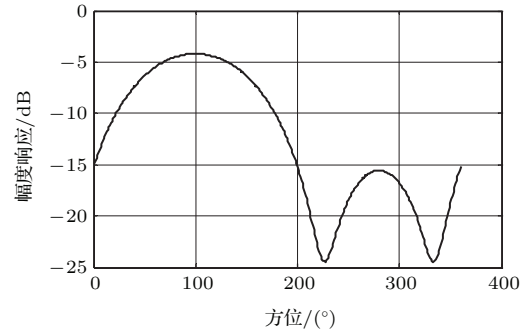


图1 空间矩阵滤波器的幅度响应

Fig. 1 Amplitude response of spatial matrix filtering

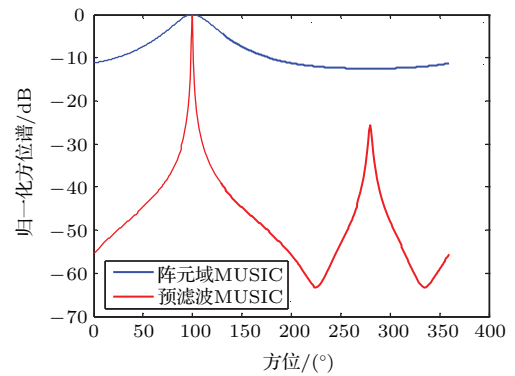


图2 阵元域与预滤波 MUSIC 方位谱对比图

Fig. 2 Comparison of conventional MUSIC and pre-filtering MUSIC azimuth spectrum

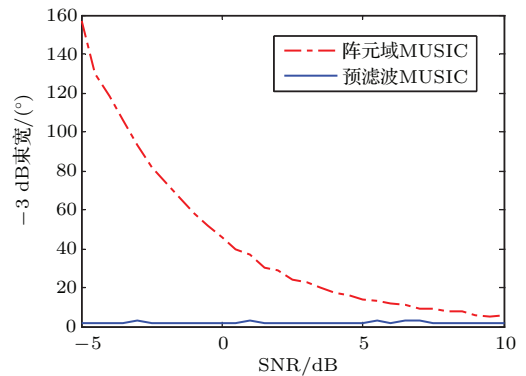


图3 -3 dB 主波束宽度随信噪比变化图

Fig. 3 Beam width of -3 dB vary with SNR

由图2可以看出,单矢量水听器阵元域MUSIC算法和预滤波MUSIC算法都能正确估计出目标的方位,但预滤波MUSIC具有更好的方位分辨能力。从图3可知,预滤波MUSIC算法 -3 dB束宽基本不随信噪比发生变化,在低信噪比情况下也具有很尖锐的谱峰。可以看出在信噪比为 0 dB时,预滤波MUSIC算法较阵元域MUSIC算法 -3 dB束宽减小了 40° ,这是由于阵元数据通过滤波器后抑制了阻带内的噪声干扰,使MUSIC算法中噪声子空间与信号子空间的区分更明显,提高了目标方位的分辨能力。

以上仿真结果都是基于滤波器通带中心角与目标方位角一致的情况下得到的,此时,预滤波MUSIC算法能正确估计目标方位,且大大提高了低信噪比情况下的目标方位分辨力。但如果通带中心角与目标方位角不一致,甚至偏差较大时,预滤波MUSIC算法是否能正确估计目标方位,基于以上考虑,本文研究了在 -5 dB、 0 dB和 10 dB三种信噪比情况下通带中心角分别为 60° 、 100° 和 140° 时预滤波MUSIC算法对目标方位角的估计(三个滤波器的通带范围均为 100°)。图4~6给出了三种信噪比情况下,滤波器在不同中心角下的预滤波MUSIC目标方位估计结果。

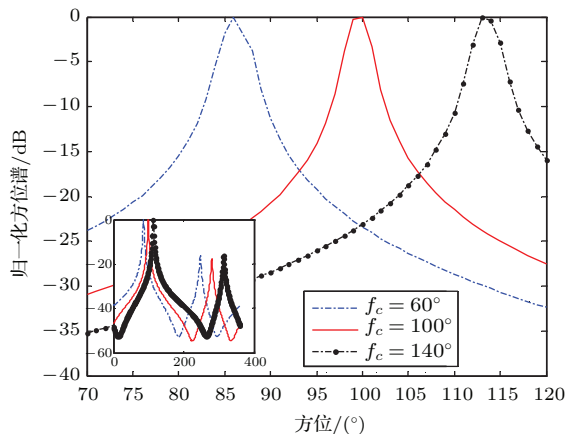


图4 信噪比为 -5 dB时目标方位谱估计

Fig. 4 Target azimuth estimation at SNR = -5 dB

由图4~6可以看出,如果滤波器通带中心角偏离目标真实方位角,则会导致预滤波MUSIC目标方位估计值与目标方位真实值存在一定误差,且信噪比越低,误差越大。当滤波器通带中心角小于目标真实方位角时($f_c = 60^\circ$),则目标方位估计值小

于目标方位真实值,如果滤波器通带中心角大于目标真实方位角($f_c = 140^\circ$),则目标方位估计值大于目标方位真实值,即方位估计误差方向与滤波器通带中心角偏离目标真实方位角的方向一致。

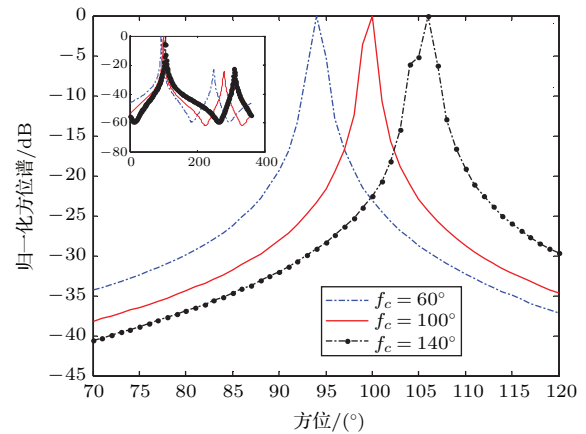


图5 信噪比为 0 dB时目标方位谱估计

Fig. 5 Target azimuth estimation at SNR = 0 dB

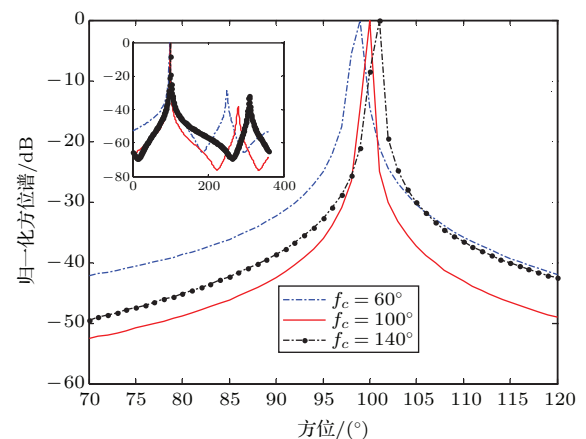


图6 信噪比为 10 dB时目标方位谱估计

Fig. 6 Target azimuth estimation at SNR = 10 dB

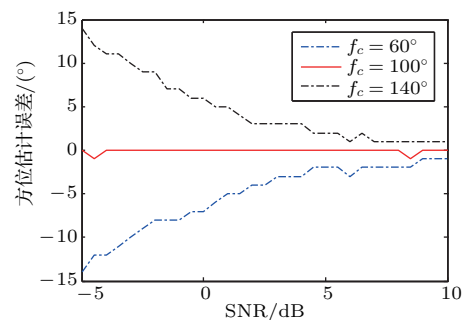


图7 滤波器在三种通带中心角下的目标方位估计误差随信噪比变化图

Fig. 7 DOA estimation error vary with SNR at three passband center

为进一步研究通带中心角偏离目标真实方位角对预滤波 MUSIC 目标方位估计产生的影响, 图7和图8分别给出了预滤波 MUSIC 目标方位估计误差随信噪比和随目标真实方位角的变化。

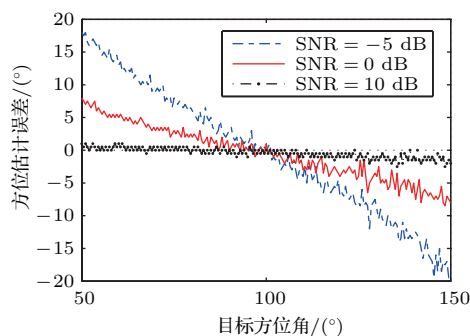


图8 三种信噪比条件下目标方位估计误差随目标真实方位角变化图 ($f_c = 100^\circ$)

Fig. 8 DOA estimation error vary with target azimuth at three SNR ($f_c = 100^\circ$)

3.2 改进预滤波 MUSIC 算法

如图8所示, 在信噪比为 -5 dB 情况下, 如果滤波器通带中心角偏离目标真实方位角 40° , 则预滤波 MUSIC 方位估计误差将达到 15° , 这对方位变化较大的弱目标方位探测与跟踪会产生极大的影响, 容易造成目标丢失。考虑到这种情况, 本文提出了适用于弱目标方位探测与跟踪的预滤波 MUSIC 算法。算法步骤如下:

(1) 首先采用阵元域 MUSIC 算法对目标方位进行估计, 搜索步长可以取值较大来减小计算量, 得到目标的大致方位角; (2) 调整空域滤波器通带中心角为目标估计方位角, 采用预滤波 MUSIC 算法对目标方位角进行估计; (3) 重复步骤(2), 通过连续两次调整滤波器通带中心角进行预滤波 MUSIC 估计, 可得到误差很小的目标方位估计值 (可根据滤波器通带范围及目标强度、距离等实际情况确定重复步骤(2)的次数); (4) 把步骤(3)估计的目标方位角作为滤波器通带中心角进行目标方位跟踪; (5) 如预滤波 MUSIC 估计的目标方位角偏离滤波器通带中心角 15° (可根据实际情况而定), 则调整滤波器通带中心角为目标估计方位角再进行目标方位跟踪; (6) 重复步骤(5)。通过以上6个步骤即可实现对弱目标的方位探测与跟踪。

4 试验数据处理

为了验证改进算法的有效性, 于2014年9月,

在青岛外海某海域进行了为期3天的单矢量水听器目标方位估计海上试验。试验采用双船作业方式, 矢量水听器柔性悬挂在接收船舷侧10 m水深, 吊放现场如图9所示, 试验时海况1级, 附近有渔船干扰。试验过程中, 接收船在某个固定点接收信号, 发射船沿着试验方案中的固定航迹行驶, GPS设备记录两船位置。



图9 矢量水听器吊放现场

Fig. 9 Vector hydrophone dipping scene

图10~13分别给出了阵元域 MUSIC 算法和改进预滤波 MUSIC 算法对 750 Hz 单频脉冲信号 (CW 信号) 和频段为 $600\sim 900$ Hz 线性调频信号 (LFM 信号) 处理得到的方位历程图, 改进预滤波 MUSIC 算法对 CW 信号和 LFM 信号估计方位与 GPS 方位对比如图14~15所示。由以上结果可知两种算法均能实现对 CW 信号和 LFM 信号的目标探测, 但改进预滤波 MUSIC 算法方位分辨力更好。

最后处理了一段发射船通过接收船正横位置时单矢量水听器接收的数据, 此过程发射船航速 10 kn, 距接收船最近距离约 600 m。图16和图17分别给出了阵元域 MUSIC 算法和改进预滤波 MUSIC 算法处理得到的方位历程图, 图18给出了改进预滤波 MUSIC 方位估计结果与 GPS 方位推算结果对比图以及发射船距离历程图。由图16可以看出, 阵元域 MUSIC 算法在目标距离较近时能对运动目标进行方位探测, 在发射船通过接收船正横位置之前, 阵元域 MUSIC 算法能正确估计出距离 3 km 的目标船方位, 但通过正横位置之后, 该算法对目标船的最远探测距离减小为 2 km, 这可能是由于在 14 min 之后, 在接收船方位 120° 附近有个信噪比较大的干扰源, 或在方位小于 120° 范围内有与目标船强度相当的干扰存在。图17和图18验证了弱目标情况下改进预滤波 MUSIC 算法对运动目标的高分辨方位跟踪能力, 处理得到的目标船方位历程图更

加清晰。通过预滤波处理抑制了阻带扇面内的干扰与噪声,提高了目标的探测距离。可以看出,预滤波 MUSIC 算法对目标船的最远探测距离提高到了

5 km,此次试验充分验证了基于单矢量水体器的改进预滤波 MUSIC 算法具有高分辨目标方位跟踪的能力,具有较好的工程应用前景。

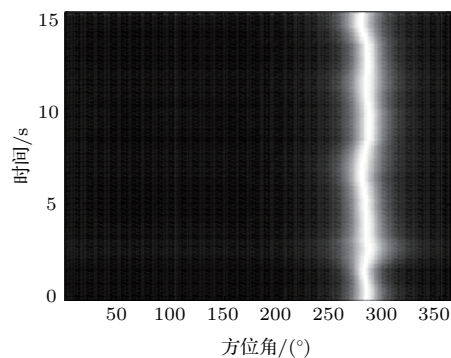


图 10 阵元域 MUSIC 得到的 CW 信号方位历程图

Fig. 10 Orientation course of CW signal obtained by conventional MUSIC

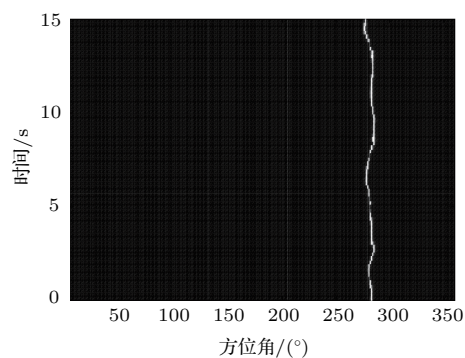


图 11 改进预滤波 MUSIC 得到的 CW 信号方位历程图

Fig. 11 Orientation course of CW signal obtained by improved pre-filtering MUSIC

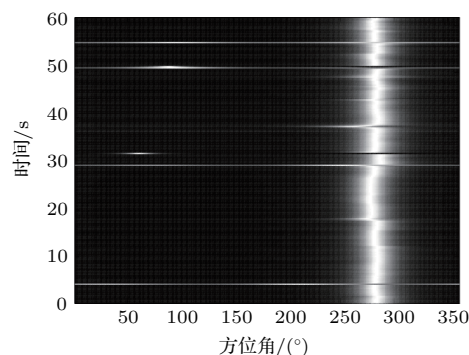


图 12 阵元域 MUSIC 得到的 LFM 信号方位历程图

Fig. 12 Orientation course of LFM signal obtained by conventional MUSIC

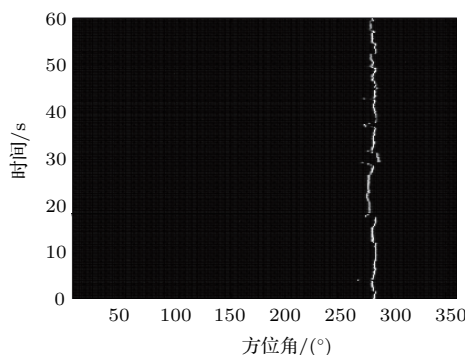


图 13 改进预滤波 MUSIC 得到的 LFM 信号方位历程图

Fig. 13 Orientation course of LFM signal obtained by improved pre-filtering MUSIC

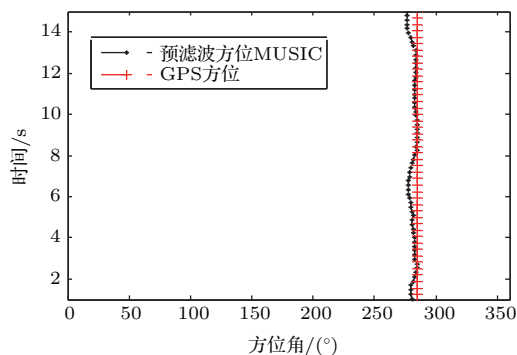


图 14 改进预滤波 MUSIC 对 CW 信号估计方位与 GPS 方位对比

Fig. 14 Improved pre-filtering MUSIC DOA estimation result of CW signal compared with GPS azimuth

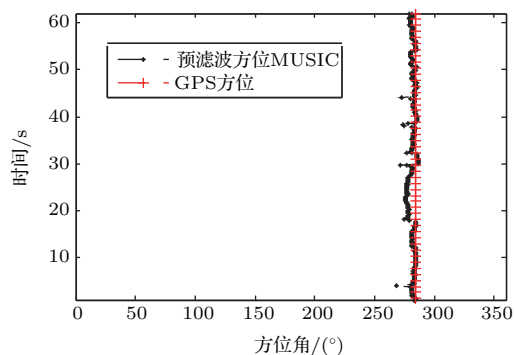


图 15 改进预滤波 MUSIC 对 LFM 信号估计方位与 GPS 方位对比

Fig. 15 Improved pre-filtering MUSIC DOA estimation result of LFM signal compared with GPS azimuth

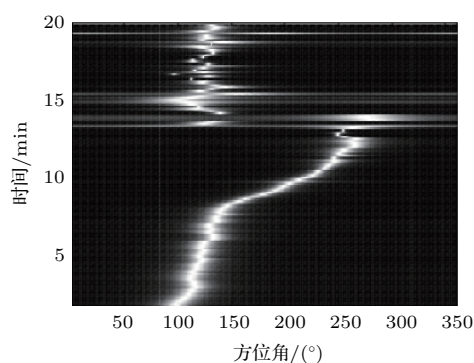


图16 阵元域 MUSIC 算法方位历程图

Fig. 16 Orientation course figure obtained by conventional MUSIC

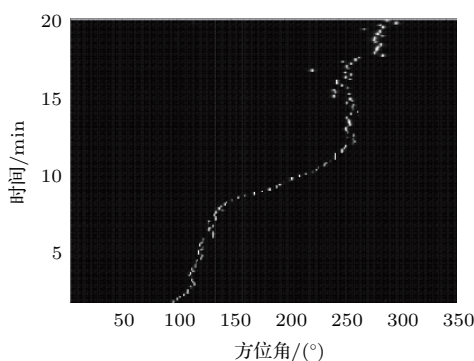


图17 改进预滤波 MUSIC 算法方位历程图

Fig. 17 Orientation course figure obtained by improved pre-filtering MUSIC

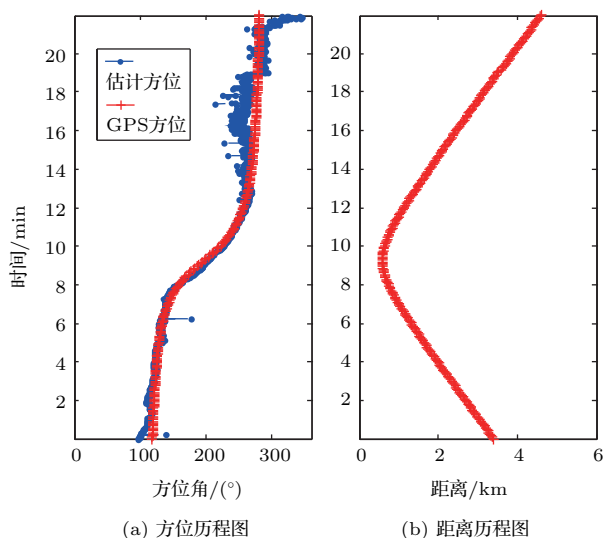


图18 估计方位历程与GPS方位历程对比图及距离历程图

Fig. 18 DOA estimation result compared with GPS azimuth figure and distance course figure

5 结论

本文在已有矩阵空域预滤波 MUSIC 算法基础之上,结合矢量水听器自身具有阵列流型矢量的特点,提出了基于单矢量水听器的改进预滤波 MUSIC 算法。改进预滤波 MUSIC 算法通过调整滤波器通带中心角使其保持在目标估计方位角附近,可以消除滤波器通带中心角偏离目标真实方位角时预滤波 MUSIC 算法产生的目标方位估计误差。

试验数据处理结果表明通过预滤波处理可抑制阻带扇面内的干扰与噪声,降低方位估计信噪比门限,提高目标的探测距离,使单矢量水听器在存在目标干扰时的探测距离从 2 km 提升到了 5 km,验证了改进预滤波 MUSIC 算法可实现弱目标情况下的高分辨目标方位跟踪,具有较好的工程应用前景。

参 考 文 献

- [1] 孙贵青. 矢量水听器检测技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2001.
- [2] 姚直象. 单矢量水听器信号处理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- [3] 朱良明. 基于矢量水听器的浅海矢量声场特性及其应用研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [4] HAWKES M, NEHORAI A. Acoustic vector-sensor processing in the presence of a reflecting boundary[J]. IEEE Trans. Sign. Process., 2000, 48(11): 2981-2993.
- [5] CHEN H W, ZHAO J W. Wideband MVDR beamforming for acoustic vector sensor linear array[J]. Radar, Sonar and Navigation, IEEE Proceedings, 2004, 151(3): 158-162.
- [6] 田坦, 齐娜, 孙大军. 矢量水听器阵列波束域 MVDR 方法研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(3): 295-298.
TIAN Tan, QI Na, SUN Dajun. A study of beam domain MVDR algorithm based on acoustic vector sensor array[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25(3): 295-298.
- [7] 杨秀庭, 孙贵青, 陈新华, 等. 矢量水听器阵列 MVDR 波束形成器的性能研究 [J]. 应用声学, 2007, 26(1): 8-15.
YANG Xiuting, SUN Guiqing, CHEN Xinhua, et al. Performance of MVDR in vector hydrophone array[J]. Journal of Applied Acoustics, 2007, 26(1): 8-15.
- [8] 杨希盈, 程锦房, 邓大新, 等. 单矢量水听器的 MVDR 波束形成性能研究 [J]. 兵工自动化, 2009, 28(11): 59-61.
YANG Xiying, CHENG Jinfang, DENG Daxin, et al. Research of MVDR beam forming equipment performance in single vector hydrophone[J]. Ordnance Industry Automation, 2009, 28(11): 59-61.
- [9] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Trans. Antenna and Propagation, 1986, 34(3): 276-280.

- [10] 王绪虎, 田坦. MUSIC 算法在矢量水听器阵中的应用研究 [J]. 海洋技术, 2006, 25(3): 82–85.
WANG Xuhu, TIAN Tan. Study on MUSIC algorithm used in vector hydrophone array[J]. Ocean Technology, 2006, 25(3): 82–85.
- [11] 王绪虎, 陈万平, 田坦. 矢量水听器阵波束域 MUSIC 算法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(15): 147–149.
WANG Xuhu, CHEN Wanping, TIAN Tan. Study of beam domain MUSIC algorithm based on acoustic vector array[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(15): 147–149.
- [12] 顾晓东, 邱志明, 袁志勇. 基于改进 MUSIC 算法的矢量水听器阵列波达方向估计 [J]. 武汉理工大学学报, 2009, 33(3): 487–489.
GU Xiaodong, QIU Zhiming, YUAN Zhiyong. DOA estimation by linear array of acoustic vector sensors based on modified MUSIC[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 33(3): 487–489.
- [13] 梁国龙, 张铠, 付进, 等. 单矢量水听器的高分辨方位估计应用研究 [J]. 兵工学报, 2011, 32(8), 986–990.
LIANG Guolong, ZHANG Kai, FU Jin, et al. Research on high resolution direction of arrival estimation based on an acoustic vector hydrophone[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(8): 986–990.
- [14] 刘凯, 王鹏. 基于 MUSIC 算法的单矢量水听器方位估计 [J]. 水雷战与舰船防护, 2011, 19(1): 26–29.
LIU Kai, WANG Peng. MUSIC algorithm based for DOA estimation using a single vector hydrophone[J]. Mine Warfare and Ship Self-Defence, 2011, 19(1): 26–29.
- [15] 尹天宫. 运动小平台近场干扰抑制技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [16] 鄢社锋, 侯朝焕, 马晓川. 矩阵空域预滤波目标方位估计 [J]. 声学学报, 2007, 32(2): 151–157.
YAN Shefeng, HOU Chaohuan, MA Xiaochuan. Matrix spatial prefiltering approach for direction of arrival estimation[J]. Acta Acustica, 2007, 32(2): 151–157.
- [17] 何希盈, 程锦房, 姚直象, 等. 矢量水听器阵列矩阵空域预滤波 MUSIC 算法研究 [J]. 华中科技大学学报, 2011, 39(3): 71–74.
HE Xiyang, CHENG Jinfang, YAO Zhixiang, et al. MUSIC algorithm of spatial prefiltering for vector hydrophones in an array matrix[J]. Journal Huazhong University of Technology, 2011, 39(3): 71–74.
- [18] 陈羽, 王伟, 王建飞, 等. 噪声环境下单矢量水听器高分辨定向技术研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(1): 65–70.
CHEN Yu, WANG Wei, WANG Jianfei, et al. Research on high resolution direction of arrival estimation of a single vector hydrophone with noise[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(1): 65–70.
- [19] 彭博琛, 陈羽, 马树青, 等. 基于矢量水听器阵列空域预滤波处理的多重信号分类算法研究 [J]. 应用声学, 2014, 33(3): 189–195.
PENG Bochen, CHEN Yu, MA Shuqing, et al. Spatial prefiltering multiple signal classification algorithm based on vector hydrophone array[J]. Journal of Applied Acoustics, 2014, 33(3): 189–195.