

引用格式: 马艳, 罗斌, 邵杨梦. 一种单矢量水听器通道增益一致性分析方法[J]. 声学技术, 2022, 41(4): 624-629. [MA Yan, LUO Bin, SHAO Yangmeng. A channel gain consistency analysis method for single vector hydrophone[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(4): 624-629.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.04.022

一种单矢量水听器通道增益一致性分析方法

马 艳, 罗 斌, 邵杨梦

(杭州应用声学研究所, 浙江杭州 310023)

摘要: 单只矢量水听器通道增益一致性对空间谱估计结果有很大的影响。通过理论推导证明, 当单矢量水听器声压通道增益不同于两路振速通道时, 最小方差无失真响应(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)算法空间谱谱峰变宽, 并且可能产生伪峰; 当一路振速通道增益不同于另外两路通道时, MVDR 算法空间谱估计值与真实值存在偏差, 且可能存在伪峰, 仿真分析验证了理论推导的正确性。根据分析结果, 结合通道增益一致性对多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)算法的影响, 提出了一种判断单矢量水听器各通道增益一致性的分析方法。

关键词: 单矢量水听器; 幅度误差分析; 空间谱估计

中图分类号: TB566

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-04-0624-06

A channel gain consistency analysis method for single vector hydrophone

MA Yan, LUO Bin, SHAO Yangmeng

(Hangzhou Applied acoustics Research Institute, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: The channel gain consistency of a single vector hydrophone has great influence on the spectrum estimation results. In this paper, theoretical derivation and simulation analysis show that when the gain of the sound pressure channel is not consistent with two vibration velocity channels, the peak of space spectrum estimated by the minimum variance distortionless response (MVDR) algorithm becomes wider, and sometimes false peak appears, which seriously affects the performance of target azimuth estimation. When the gain of a vibration velocity channel is inconsistent with other two channels, the space spectrum estimated by the MVDR algorithm deviated from the true spectrum, and there may be false peaks to further reduce the azimuth resolution of the target. According to the analysis results, combined with the influence of channel gain consistency on the multiple signal classification (MUSIC) algorithm, an analysis method is proposed in this paper to judge whether the channel gain of single vector hydrophone is consistent or not.

Key words: single vector hydrophone; amplitude error analysis; spatial spectrum estimation

0 引言

与声压水听器相比, 矢量水听器具有声压 p 通道、振速 v_x 、 v_y 通道, 单只矢量水听器就可以同时测量声场的声压与振速, 实现水下目标的方位估计^[1]。但是, 单只矢量水听器方位估计的性能严重依赖于良好的通道特性和外部环境。当单只矢量水听器的声压和振速通道的幅度和相位特性基本一致时, 单只矢量水听器可以准确输出声压和振速的信息, 进而实现高分辨方位估计; 然而在实际应用中, 由于传感器敏感元件的测量误差、硬件放大电路的增益以及声压和振速信道的不同等原因, 单只

矢量水听器三通道的幅相特性难以做到严格一致。因此研究单只矢量水听器通道的幅相误差对方位估计的影响十分必要。

本文的理论推导证明了单只矢量水听器各通道幅度增益一致性对最小方差无失真响应(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)空间谱估计有很大影响, 仿真分析验证了理论推导结果的有效性。结合通道增益一致性对MUSIC算法的影响, 本文提出一种判断单矢量水听器各通道增益是否一致的分析方法。

1 单矢量水听器误差测量模型

1.1 单矢量水听器测量模型

二维矢量型水听器可以同时共点输出声场的声压 P 和振速 V_x 、 V_y , 在平面波条件下, 其输出可表示成^[2-4]:

收稿日期: 2020-08-05; 修回日期: 2021-09-05

作者简介: 马艳(1990—), 女, 山东临沂人, 硕士, 主要从事水声信号处理等方面的研究工作。

通信作者: 马艳, E-mail: 546080157@qq.com

$$\begin{cases} \mathbf{P}=\mathbf{x}(t) \\ V_x=\mathbf{x}(t)\cos\theta \\ V_y=\mathbf{x}(t)\sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{x}(t)$ 为接收到的声压信号， θ 是声压信号的水平方向方位，取值范围是 $-\pi \leq \theta < \pi$ 。如果有 K 个相互独立的声波信号同时到达二维单矢量水听器，传播介质各向同性，则输出数据模型可表示为

$$\mathbf{X}(t)=\mathbf{A}(\theta)\mathbf{x}(t)+\mathbf{N}(t) \quad (2)$$

式中： $\mathbf{A}(\theta)$ 为矢量水听器的阵列流形； $\mathbf{N}(t)$ 是接收到的环境噪声。 $\mathbf{A}(\theta)$ 的表达式为

$$\mathbf{A}(\theta)=[\mathbf{a}_1(\theta_1) \dots \mathbf{a}_N(\theta_N)] \quad (3)$$

式中： $\mathbf{a}_k(\theta_k)$ 是第 $k(k \leq 2)$ 个信号对应的方向矢量，定义为

$$\mathbf{a}_k(\theta_k)=[1 \cos\theta_k \sin\theta_k]^T \quad (4)$$

其中，“T”表示取转置。 $\mathbf{a}_k(\theta_k)$ 中的第1个数代表的是声压 P 通道输出；第2个数“ $\cos\theta_k$ ”，表示的是振速通道 V_x 的输出；最后一个分量“ $\sin\theta_k$ ”，表示的是振速通道 V_y 的输出。

1.2 单矢量水听器误差测量模型

为深入研究通道幅度增益一致性对单矢量水听器空间谱估计的影响，建立如下误差测量模型^[5]：

$$\mathbf{X}'(t)=\mathbf{\Gamma}[\mathbf{A}(\theta)\mathbf{x}(t)+\mathbf{N}(t)] \quad (5)$$

式中： $\mathbf{\Gamma}$ 是通道幅度增益对角阵，定义为

$$\mathbf{\Gamma}=\text{diag}[\eta_p \eta_x \eta_y] \quad (6)$$

式中： η_p ， η_x ， η_y 分别是3个通道的幅度增益系数，为实数。

$$\mathbf{X}_1(t)=\mathbf{\Gamma} \cdot \mathbf{X}(t) \quad (7)$$

$\mathbf{X}_1(t)$ 的协方差矩阵 $\mathbf{R}_1$ 为

$$\mathbf{R}_1=\mathbf{E}\{\mathbf{X}\mathbf{X}^H\}=\mathbf{\Gamma}\mathbf{R}\mathbf{\Gamma}^H \quad (8)$$

式中： $\mathbf{R}$ 是理想接收模型式(2)的协方差矩阵，且 $\mathbf{R}_1$ 与 $\mathbf{R}$ 是酉相似矩阵，因此 $\mathbf{R}_1$ 的逆矩阵为

$$\mathbf{R}_1'=(\mathbf{\Gamma}\mathbf{R}\mathbf{\Gamma}^H)'=(\mathbf{\Gamma}^H)'\mathbf{R}'\mathbf{\Gamma}' \quad (9)$$

$\mathbf{R}'$ 是理想接收数据模型协方差矩阵的逆矩阵，由于 $\mathbf{R}$ 为对称矩阵，所以 $\mathbf{R}'$ 也为对称矩阵，可设为

$$\mathbf{R}'=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

则有：

$$\mathbf{R}_1'=(\mathbf{\Gamma}\mathbf{R}\mathbf{\Gamma}^H)'=(\mathbf{\Gamma}^H)'\mathbf{R}'\mathbf{\Gamma}'= \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\eta_p^2} & \frac{a_{12}}{\eta_p\eta_x} & \frac{a_{13}}{\eta_p\eta_y} \\ \frac{a_{12}}{\eta_p\eta_x} & \frac{a_{22}}{\eta_x^2} & \frac{a_{23}}{\eta_x\eta_y} \\ \frac{a_{13}}{\eta_p\eta_y} & \frac{a_{23}}{\eta_x\eta_y} & \frac{a_{33}}{\eta_y^2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

由此可得到此时的MVDR谱为

$$P_{\text{MVDR}}(\theta)=\frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{R}_1'\mathbf{a}(\theta)} \quad (12)$$

设：

$$g(\theta)=\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{R}_1'\mathbf{a}(\theta)= \frac{a_{11}}{\eta_p^2} + \frac{2a_{12}}{\eta_p\eta_x}\cos\theta + \frac{2a_{13}}{\eta_p\eta_y}\sin\theta + \frac{2a_{23}}{\eta_x\eta_y}\cos\theta\sin\theta + \frac{a_{22}}{\eta_x^2}\cos^2\theta + \frac{a_{33}}{\eta_y^2}\sin^2\theta \quad (13)$$

式(13)中，当 $g(\theta)$ 取极小值时，MVDR谱取极大值，对应的 θ 即为目标方位。

2 通道幅度增益一致性对MVDR方位谱估计的影响

根据第1节建立的单矢量水听器误差模型，深入分析通道幅度增益一致性对MVDR空间谱估计的影响^[6-7]。

理想情况下， $\eta_p=\eta_x=\eta_y$ ，没有通道幅度误差，MVDR算法可以准确地对目标方位进行估计。此时有：

$$\begin{cases} g_0(\theta)=a_{11}+2a_{12}\cos\theta+2a_{13}\sin\theta+ \\ \quad 2a_{23}\cos\theta\sin\theta+a_{22}\cos^2\theta+a_{33}\sin^2\theta \\ g_0'(\theta)=-2a_{12}\sin\theta+2a_{13}\cos\theta+ \\ \quad 2a_{23}(\cos^2\theta-\sin^2\theta)- \\ \quad 2a_{22}\cos\theta\sin\theta+2a_{33}\cos\theta\sin\theta \end{cases} \quad (14)$$

2.1 声压通道增益不同于振速通道增益对MVDR算法的影响

当 $\eta_p=\xi \neq 1$ 、 $\eta_x=\eta_y=1$ 时(ξ 为声压通道增益值)，声压通道增益与两个振速通道增益不同，则：

$$g(\theta)=\frac{a_{11}}{\xi^2} + \frac{2a_{12}}{\xi}\cos\theta + \frac{2a_{13}}{\xi}\sin\theta + 2a_{23}\cos\theta\sin\theta + a_{22}\cos^2\theta + a_{33}\sin^2\theta \quad (15)$$

$$g'(\theta)=-\frac{2a_{12}}{\xi}\sin\theta + \frac{2a_{13}}{\xi}\cos\theta + 2a_{23}(\cos^2\theta-\sin^2\theta)-2a_{22}\cos\theta\sin\theta + 2a_{33}\cos\theta\sin\theta \quad (16)$$

理想状态下，即 $\eta_p=\eta_x=\eta_y=1$ 时， $g'_0(\theta)$ 为

$$g_0'(\theta) = -2a_{12} \sin \theta + 2a_{13} \cos \theta + 2a_{23} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) - 2a_{22} \cos \theta \sin \theta + 2a_{33} \cos \theta \sin \theta \quad (17)$$

由式(17)可知, 在 $g_0(\theta)$ 的极值点 $(\theta_0, g_0(\theta_0))$ 处有 $g_0'(\theta_0) = 0$, 即有:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\xi^2} g_0'(\theta_0) = & -\frac{2a_{12}}{\xi^2} \sin \theta_0 + \frac{2a_{13}}{\xi^2} \cos \theta_0 + \\ & \frac{2a_{23}}{\xi^2} (\cos^2 \theta_0 - \sin^2 \theta_0) - \\ & \frac{2a_{22}}{\xi^2} \cos \theta_0 \sin \theta_0 + \\ & \frac{2a_{33}}{\xi^2} \cos \theta_0 \sin \theta_0 = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

设 $\cos \theta_0 = \xi \cos \hat{\theta}$; $\sin \theta_0 = \xi \sin \hat{\theta}$, 则 $\hat{\theta} = \theta_0$, 且

$$\begin{aligned} \frac{1}{\xi^2} g_0'(\theta_0) = & -\frac{2a_{12}}{\xi} \sin \hat{\theta} + \frac{2a_{13}}{\xi} \cos \hat{\theta} + \\ & 2a_{23} (\cos^2 \hat{\theta} - \sin^2 \hat{\theta}) - \\ & 2a_{22} \cos \hat{\theta} \sin \hat{\theta} + \\ & 2a_{33} \cos \hat{\theta} \sin \hat{\theta} = g'(\hat{\theta}) = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

即有 $g'(\theta_0) = 0$, $g(\theta)$ 的极值点也在 θ_0 处, 估计结果无误。

但当 $\xi \gg 1$ 时:

$$\begin{aligned} g'(\theta_0) = & -\frac{2a_{12}}{\xi} \sin \theta_0 + \frac{2a_{13}}{\xi} \cos \theta_0 + \\ & 2a_{23} (\cos^2 \theta_0 - \sin^2 \theta_0) - \\ & 2a_{22} \cos \theta_0 \sin \theta_0 + 2a_{33} \cos \theta_0 \sin \theta_0 \approx \\ & 2a_{23} (\cos^2 \theta_0 - \sin^2 \theta_0) - \\ & 2a_{22} \cos \theta_0 \sin \theta_0 + 2a_{33} \cos \theta_0 \sin \theta_0 = \\ & 2a_{23} [\cos^2 (\theta_0 + \pi) - \sin^2 (\theta_0 + \pi)] - \\ & 2a_{22} \cos (\theta_0 + \pi) \sin (\theta_0 + \pi) + \\ & 2a_{33} \cos (\theta_0 + \pi) \sin (\theta_0 + \pi) \approx g'(\theta_0 + \pi) \end{aligned} \quad (20)$$

此时 $(\theta_0 + \pi)$ 处也是 $g(\theta)$ 的极值点, 在 MVDR 空间谱输出结果中与目标方位相隔 180° 处会出现一个“伪峰”, ξ 越大, “伪峰”越强。

图1为单只矢量水听器声压通道增益不同于振速通道增益的情况下MVDR算法谱估计的结果。仿真条件如下: 目标声源频率为 $f=1\ 000\ \text{Hz}$, 方位角是 $\theta_0=120^\circ$, 采样频率设为 $f_s=30\ 000\ \text{Hz}$, 信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 为 $20\ \text{dB}$ 。由图1可看出, 当 ξ 越接近于1, MVDR 算法谱峰越尖锐, 谱估计效果越好; 当 $\xi < 1$ 时, MVDR 算法谱峰变宽, 谱估计效果变差, 且 ξ 越小, 谱峰越宽, 估计效果越差; 当 $\xi > 1$ 时, MVDR 谱峰变宽, 且 ξ 越大, 谱峰越宽, 估计效果越差。当 $\xi \gg 1$ 时, MVDR 谱估计中与信号源真实方位相隔 180° 的地方会出现一个伪峰, ξ 越大, 伪峰越强, 如图1中蓝色线和粉红色线

所示。仿真与理论推导结果一致, 可以证明, 单矢量水听器声压通道存在的幅度误差不会引起方位估计的偏差, 却会严重影响MVDR算法方位估计的性能。

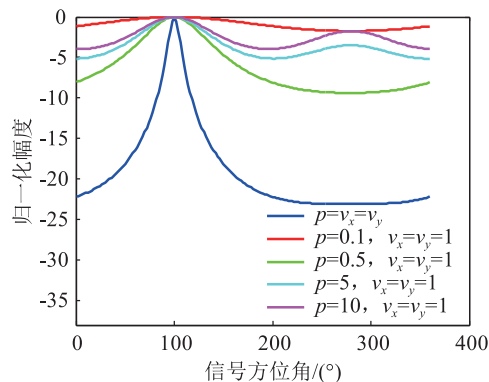


图1 声压通道增益不同于振速通道增益对MVDR算法的影响
Fig.1 Influence of inconsistent gain between sound pressure and vibration velocity channels on MVDR algorithm

2.2 振速通道幅度增益不一致对MVDR算法的影响

由2.1分析结论可知, 声压通道幅度增益是否与振速通道幅度增益一致不会对最后的估计结果产生偏差, 只是有可能在相隔 180° 处会出现伪峰。为了便于分析两个振速通道之间的幅度增益不一致对MVDR算法的影响, 暂时不考虑声压通道, 只考虑当 $\eta_y = \xi \neq 1$, $\eta_x = 1$ 的特殊情况, 此时有:

$$g(\theta) \approx \frac{2a_{23}}{\xi} \cos \theta \sin \theta + a_{22} \cos^2 \theta + \frac{a_{33}}{\xi^2} \sin^2 \theta \quad (21)$$

$$\begin{aligned} g'(\theta) \approx & \frac{2a_{23}}{\xi} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + \\ & 2\left(\frac{a_{33}}{\xi^2} - a_{22}\right) \cos \theta \sin \theta \end{aligned} \quad (22)$$

理想状态下, 即 $\eta_y = \eta_x = 1$ 时, 有:

$$g_0(\theta) \approx 2a_{23} \cos \theta \sin \theta + a_{22} \cos^2 \theta + a_{33} \sin^2 \theta \quad (23)$$

$$\begin{aligned} g_0'(\theta) \approx & 2a_{23} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + \\ & 2(a_{33} - a_{22}) \cos \theta \sin \theta \end{aligned} \quad (24)$$

由式(24)可知, 在 $g_0(\theta)$ 的极值点 $(\theta_0, g_0(\theta_0))$ 处存在 $g_0'(\theta_0) = 0$, 即有:

$$\begin{aligned} g_0'(\theta_0) \approx & 2a_{23} (\cos^2 \theta_0 - \sin^2 \theta_0) + \\ & 2(a_{33} - a_{22}) \cos \theta_0 \sin \theta_0 = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

由式(25)可知, θ_0 满足:

$$2a_{23} (\cos^2 \theta_0 - \sin^2 \theta_0) = -2(a_{33} - a_{22}) \cos \theta_0 \sin \theta_0 \quad (26)$$

而 $g(\theta)$ 在 θ_0 处满足:

$$\begin{aligned} g'(\theta_0) \approx & \frac{2a_{23}}{\xi} (\cos^2 \theta_0 - \sin^2 \theta_0) + \\ & 2\left(\frac{a_{33}}{\xi^2} - a_{22}\right) \cos \theta_0 \sin \theta_0 \end{aligned} \quad (27)$$

将式(26)代入式(27)可知:

$$\begin{aligned}
 g'(\theta_0) &\approx \frac{2a_{23}}{\xi} (\cos^2 \theta_0 - \sin^2 \theta_0) \\
 &+ 2\left(\frac{a_{33}}{\xi^2} - a_{22}\right) \cos \theta_0 \sin \theta_0 \\
 &= \left(\frac{1}{\xi} - 1\right) \left(\frac{a_{33}}{\xi} + a_{22}\right) \cdot 2 \cos \theta_0 \sin \theta_0 \quad (28)
 \end{aligned}$$

式(28)右侧中间项显然大于0, 因此 $g'(\theta_0)$ 的取值取决于等式右侧第一、三项。表1给出了当 $0 < \xi < 1$ 时, $g'(\theta_0)$ 、 $g(\theta)$ 在 θ_0 处的单调性、 $P(\theta)$ 在 θ_0 处的单调性以及 $\hat{\theta}$ 与 θ_0 的关系。表2给出了当 $1 < \xi$ 时 $g'(\theta_0)$ 、 $g(\theta)$ 在 θ_0 处的单调性、 $P(\theta)$ 在 θ_0 处的单调性以及 $\hat{\theta}$ 与 θ_0 的关系。

表1 当 $0 < \xi < 1$ 时MVDR谱估计参数

方位角	$g'(\theta_0)$	$P(\theta)$ 在 θ_0 处单调性	$\hat{\theta}$
$\theta_0 \in (0, \pi/2]$	>0	单调减	$\hat{\theta} < \theta_0$
$\theta_0 \in (\pi/2, \pi]$	<0	单调增	$\hat{\theta} > \theta_0$
$\theta_0 \in (\pi, 3\pi/2]$	>0	单调减	$\hat{\theta} < \theta_0$
$\theta_0 \in (3\pi/2, 2\pi]$	<0	单调增	$\hat{\theta} > \theta_0$

表2 当 $\xi > 1$ 时MVDR谱估计参数

方位角	$g'(\theta_0)$	$P(\theta)$ 在 θ_0 处单调性	$\hat{\theta}$
$\theta_0 \in (0, \pi/2]$	<0	单调增	$\hat{\theta} > \theta_0$
$\theta_0 \in (\pi/2, \pi]$	>0	单调减	$\hat{\theta} < \theta_0$
$\theta_0 \in (\pi, 3\pi/2]$	<0	单调增	$\hat{\theta} > \theta_0$
$\theta_0 \in (3\pi/2, 2\pi]$	>0	单调减	$\hat{\theta} < \theta_0$

由表1和表2可知, 当两个振速通道幅度增益不一致时, MVDR算法对目标方位的估计值与真实值存在偏差。

单只矢量水听器两个振速通道幅度增益不一致时, MVDR算法空间谱估计仿真结果如图2所示。仿真条件: 目标声源频率为 $f=3\ 000\ \text{Hz}$, 方位为 $\theta_0=100^\circ$; 采样频率设为 $f_s=30\ 000\ \text{Hz}$; 信噪比SNR为20 dB。由图2可知, 当 $\xi < 1$ 时, MVDR估计结果 $\hat{\theta}$ 大于真实值 θ_0 , 此外还可以看出 ξ 越小, 目标方位估计值与真实值偏差越大, 谱估计效果越差。当 $\xi > 1$ 时, MVDR估计结果 $\hat{\theta}$ 小于真实值 θ_0 , 与理论推导一致, 并且有时会出现伪峰, 如图2中蓝色线和粉红色线所示, 目标方位估计效果更差。

3 通道幅度增益一致性对MUSIC算法的影响

根据文献[5-6]中的分析可知, 当单只矢量水听器声压通道增益与两个振速通道增益不一致时,

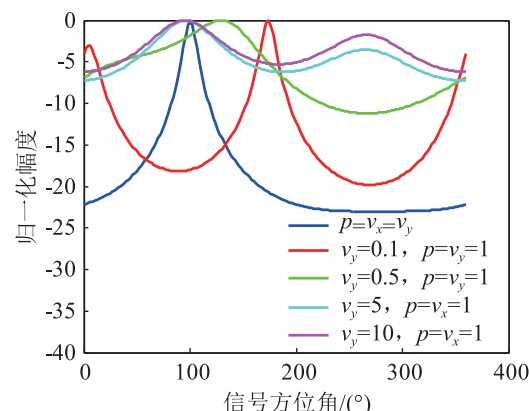


图2 一个振速通道增益不一致对MVDR谱估计的影响

Fig.2 Influence of a vibration velocity channel gain inconsistency on MVDR algorithm

对单个信号源的方位估计不会存在偏差, 但当声压通道增益远小于振速通道时, 在多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)谱中与目标信号源方位相隔 180° 的地方会出现一个“伪峰”。如图3所示。当单只矢量水听器振速通道幅度增益不一致时, MUSIC谱估计结果将会产生偏差, 如图4所示。其估计值与真实值之间满足 $\tan \hat{\theta} = \xi \tan \theta_0$ 。且当 $0 < \xi < 1$, $\theta_0 \in (0, \pi/2) \cup (\pi, 3\pi/2)$ 时, 有 $\hat{\theta} < \theta_0$, $\theta_0 \in (\pi/2, \pi) \cup (3\pi/2, 2\pi)$ 时, 有 $\hat{\theta} > \theta_0$; 当 $\xi > 1$, $\theta_0 \in (0, \pi/2) \cup (\pi, 3\pi/2)$ 时, 有 $\hat{\theta} > \theta_0$, $\theta_0 \in (\pi/2, \pi) \cup (3\pi/2, 2\pi)$ 时, 有 $\hat{\theta} < \theta_0$ 。

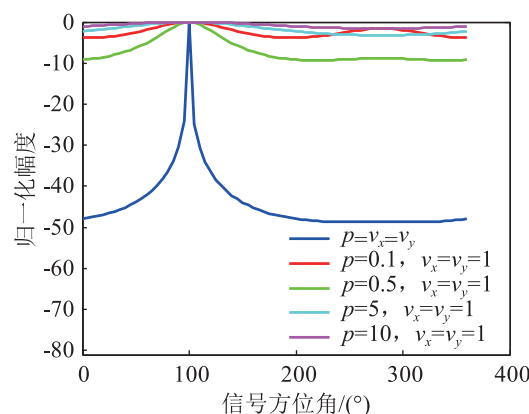


图3 声压通道与振速通道增益不一致对MUSIC算法的影响

Fig.3 Influence of inconsistent gain between sound pressure and vibration velocity channels on MUSIC algorithm

4 通道增益一致性判断方法

第2、3节中的理论分析及仿真结果表明, 单矢量水听器通道增益的不一致性将导致MVDR空间谱估计即MUSIC空间谱估计结果的异常, 本文采用逆向思维, 提出一种根据MVDR、MUSIC算法空间谱估计结果初步判断通道增益一致性的推理

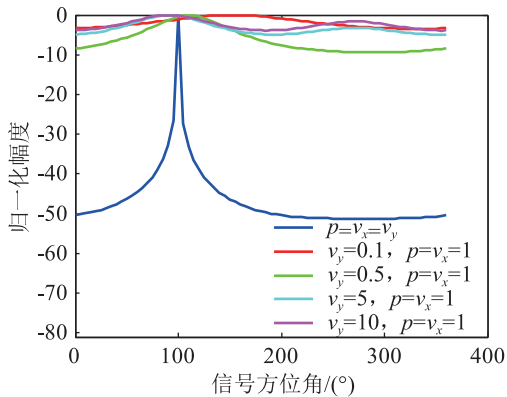


图4 一个振速通道增益不一致对MUSIC算法的影响
Fig.4 Influence of a vibration velocity channel gain inconsistency on MUSIC algorithm

方法，为通道增益校正提供一定参考，流程图如图5所示。

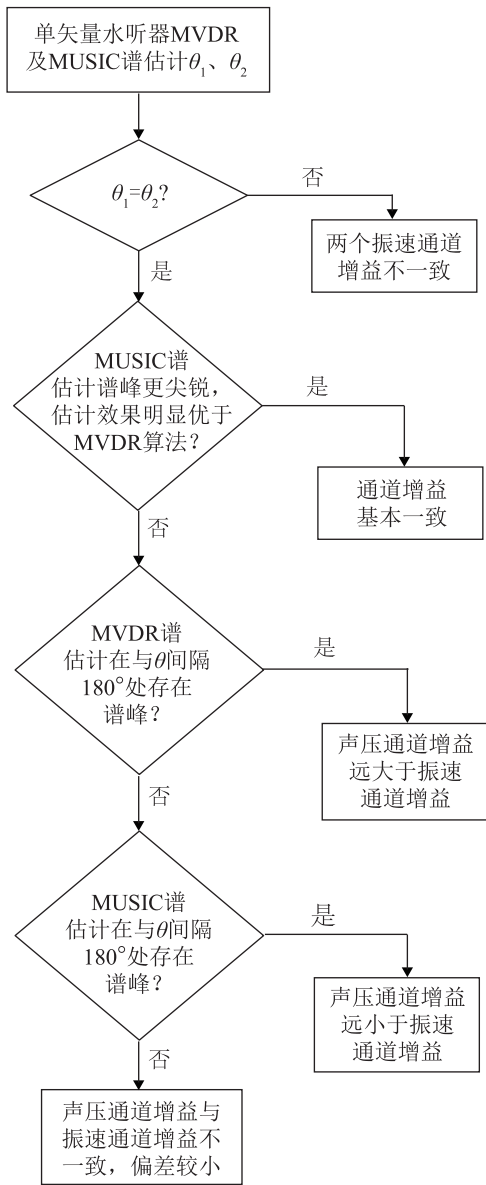


图5 判断流程图
Fig.5 Flow chart of channel gain consistency judgment

通道增益一致性具体判断方法如下：

(1) MUSIC算法与MVDR算法方位估计值一致，且MUSIC算法较MVDR算法谱峰更尖锐，估计效果更好，则各通道增益基本一致。

(2) MUSIC算法与MVDR算法方位估计值一致为 θ_0 ，且MUSIC算法估计结果在与 θ_0 间隔 180° 处存在谱峰，MVDR算法估计结果仅在 θ_0 处存在谱峰，则说明声压通道增益可能远小于两个振速通道增益，如图6所示。

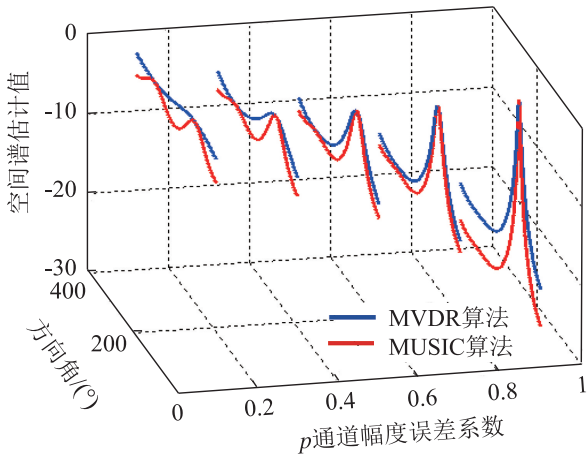


图6 声压通道增益小于振速通道增益空间谱估计结果
Fig.6 Spatial spectrum estimation results when the gain of sound pressure channel is less than those of two vibration velocity channels

(3) MUSIC算法与MVDR算法方位估计值一致为 θ_0 ，且MVDR算法估计结果在与 θ_0 间隔 180° 处存在谱峰，MUSIC算法估计结果仅在 θ_0 处存在谱峰，则说明声压通道增益可能远大于两个振速通道增益，如图7所示。

(4) MUSIC算法与MVDR算法的方位估计值不一致，则两个振速通道增益可能不一致，如图8、9所示。

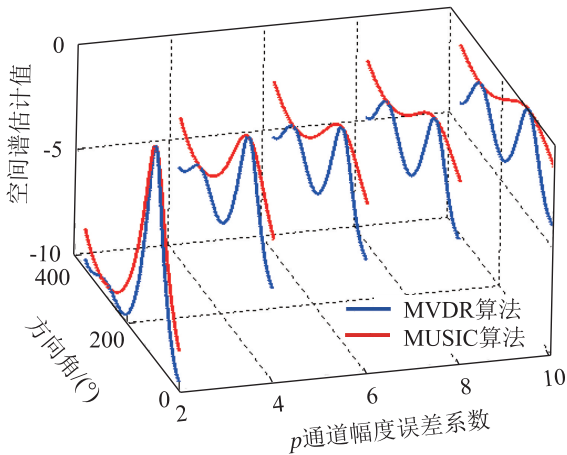


图7 声压通道增益大于振速通道增益空间谱估计结果
Fig.7 Spatial spectrum estimation results when the gain of sound pressure channel is greater than those of two vibration velocity channels

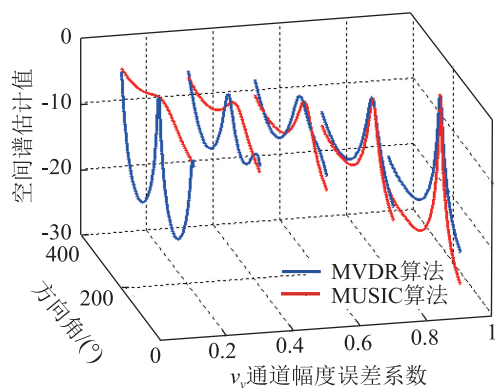


图8 v_y 通道增益小于 p 、 v_x 通道增益空间谱估计结果
Fig.8 Spatial spectrum estimation results when the v_y channel gain is less than the gain of p and v_x channels

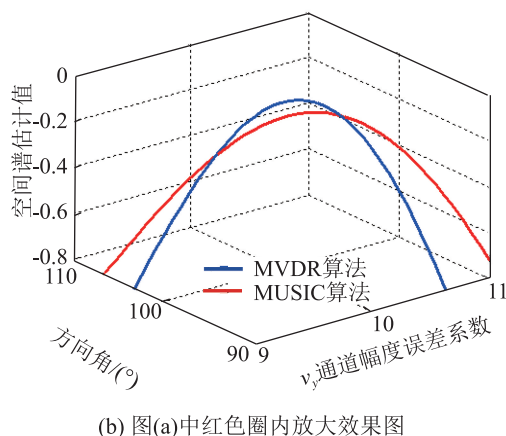
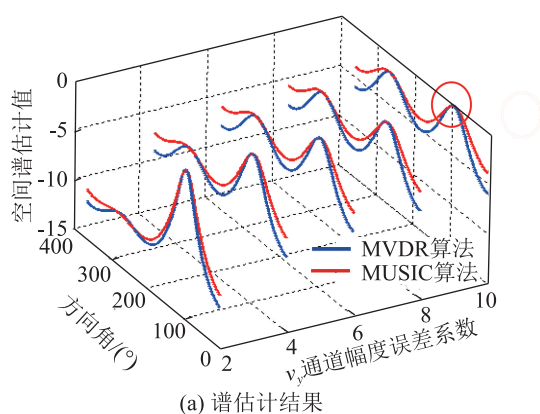


图9 v_y 通道增益大于 p 、 v_x 通道增益空间谱估计结果
Fig.9 Spatial spectrum estimation results when the v_y channel gain is greater than the gain of p and v_x channels

5 结论

本文根据单矢量水听器各通道增益不一致对MVDR、MUSIC算法空间谱估计的影响,提出一种根据空间谱估计结果判断单矢量水听器各通道增益一致性的方法。该方法可快速判定单矢量水听器声压通道与振速通道增益是否一致及相对的大小关系,可初步判断两振速通道增益是否一致,为单矢量水听器声通道增益校正提供一定理论基础。

参考文献

- [1] 惠俊英, 惠娟. 矢量声信号处理基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [2] 姚直象, 惠俊英, 殷敬伟, 等. 基于单矢量水听器四种方位估计方法[J]. 海洋工程, 2006, 24(1): 122-127, 131.
YAO Zhixiang, HUI Junying, YIN Jingwei, et al. Four approaches to DOA estimation based on a single vector hydrophone[J]. The Ocean Engineering, 2006, 24(1): 122-127, 131.
- [3] 杨士莪. 单矢量传感器多目标分辨的一种方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(6): 591-595.
YANG Shie. Method of multi-sources distinguishing by single vector transducer[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2003, 24(6): 591-595.
- [4] 孟春霞, 李秀坤, 杨士莪. 单矢量水听器多目标方位估计的算法研究[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(2): 123-126.
MENG Chunxia, LI Xiukun, YANG Shie. Direction estimation of multi-sources received by a single vector sensor[J]. Ship Science and Technology, 2007, 29(2): 123-126.
- [6] 马艳. 基于单矢量水听器空间谱增强的改进MUSIC算法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
MA Yan. A modified MUSIC algorithm based on enhancement in spatial spectrum of A single vector hydrophone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [7] 马艳, 王晓林, 李秀坤, 等. 基于单矢量水听器空间谱增强的MUSIC算法[J]. 声学技术, 2017, 36(6): 589-595.
MA Yan, WANG Xiaolin, LI Xiukun, et al. A modified MUSIC algorithm based on spatial spectrum enhancement of a single vector hydrophone[J]. Technical Acoustics, 2017, 36(6): 589-595.