

◇ 研究报告 ◇

# 基于矢量线阵的目标低频线谱提取方法

李海涛<sup>†</sup> 王易川 孙世林 程玉胜 程健

(海军潜艇学院 青岛 266199)

**摘要:** 针对矢量线阵跟踪目标低频线谱提取问题,提出了一种矢量线阵低频线谱提取方法,其中利用拉平后线谱的均方差乘一比例因子设为门限的方法,可以有效提取线谱成分;并且研究了利用互谱中高信噪比线谱测向剔除干扰线谱方法,准确提取出目标特征线谱,可较有效解决矢量线阵左右舷目标低频线谱特征相互干扰问题。上述矢量线阵低频线谱提取方法,得到了海试数据的初步验证。

**关键词:** 矢量直线阵;低频线谱;线谱提取

**中图法分类号:** TB566      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-310X(2020)02-0253-06

**DOI:** 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.02.012

## Fusion extraction method of target low frequency line spectrum based on vector sensor line array

LI Haitao WANG Yichuan SUN Shilin CHENG Yusheng CHENG Jian

(Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of extracting the low-frequency line spectrum of the target tracked by the vector sensor line array (VLA), and a kind of VLA low frequency line spectrum fusion extraction method is proposed. It is proposed that the mean square error multiplied by a scale factor can be used to set the threshold, which can effectively extract line spectrum components. The use of high-signal-to-noise ratio line-spectrum direction-finding method to eliminate the interference line spectrum to accurately extract the target feature line spectrum is studied, which can effectively solves the problem of mutual interference of low-frequency line spectrum features of VLA port and starboard targets. The above VLA low frequency line spectrum extraction method has been preliminarily validated by sea test data.

**Keywords:** Vector sensor line array; Low frequency line spectrum; Line spectrum extraction

2019-07-01 收稿; 2019-10-23 定稿

作者简介: 李海涛(1988-), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 研究方向: 水声工程。

<sup>†</sup>通信作者 E-mail: lihaitao120110@163.com

## 0 引言

船舶辐射噪声在低频段具有丰富的线谱成分,是一种较稳定的特征信息,此线谱成分的检测对水下目标的定位和识别具有重要意义。而矢量水听器在获取目标信息上具有优势,可以同时获取声压和振速信号,有利于对弱目标的探测。针对矢量信号的低频线谱处理,目前的研究大多集中在单个矢量水听器研究上<sup>[1-3]</sup>,对矢量阵波束形成输出信号的低频线谱提取研究较少。为了有效地将矢量线阵(Vector sensor line array, VLA)获取的船舶辐射噪声特征线谱从宽带背景噪声中分离出来,本文研究了利用VLA波束域信号提取水声目标噪声低频线谱特征的方法。

## 1 VLA跟踪目标低频线谱提取

文献[4]中研究了处理矢量阵信号的矢量矩阵最小方差无畸变响应(Vector array minimum variance distortionless response, VTAMVDR)算法,该算法通过Hilbert变换对时域宽带信号引入复权向量,不需要进行子带分割,且不需要对数据进行分块处理,获得稳定优化权向量估计所需要的数据长度远小于频域MVDR方法,数据长度合适时,

单次快拍即可实现波束形成,VTAMVDR算法相比于频域MVDR算法具有较好的性能,具有更高的分辨率和更窄的波束角。由于VTAMVDR较优的性能且采用单次快拍实现波束形成,使得基于VTAMVDR可以实现对跟踪目标的听测,更好地实现对目标的跟踪波束信号进行分析。本文的研究是在对VTAMVDR波束形成后所得跟踪目标声压和振速信号基础上进行的。处理流程如图1所示。

$M$ 个矢量水听器均匀布放,间距为 $d$ ,输入信号经Hilbert变换 $H(\cdot)$ ,再分别与权系数相乘(权系数的计算见文献[4]),并求和,取逆傅里叶变换实部,可得波束形成后阵列声压和振速信号 $y_p(t)$ 、 $y_{v_x}(t)$ 、 $y_{v_y}(t)$ 。

目标识别关心的问题船舶辐射噪声的连续谱和离散线谱,怎样获得连续谱和离散线谱是低频线谱分析所要解决的问题。提取线谱时需要把连续谱从整个谱中减去,在剩下的谱中提取线谱。图2给出了VLA跟踪目标低频线谱提取框图。

本文提出的VLA跟踪目标低频线谱提取方法具体实现步骤如下:

### (1) 信号预处理

每段 $N$ 个采样点,将每段信号采样样本 $x(n)$ 做中心化处理,中心化处理是为了使样本的均值为零<sup>[5]</sup>。

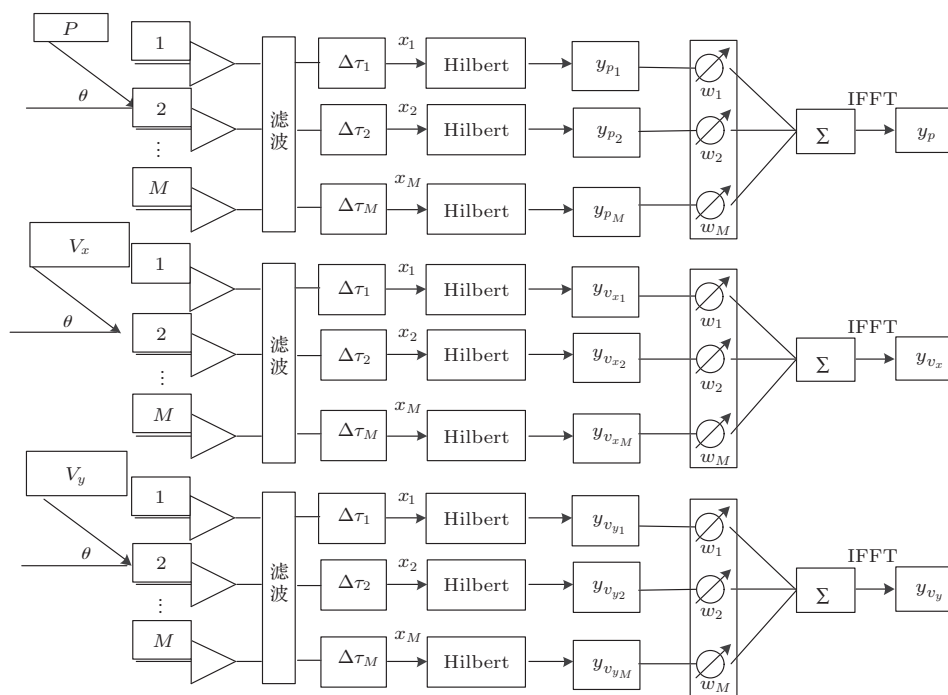


图1 VTAMVDR跟踪方位声压与振速信号提取流程

Fig. 1 Extraction process of VTAMVDR tracking azimuth sound pressure and vibration velocity signals

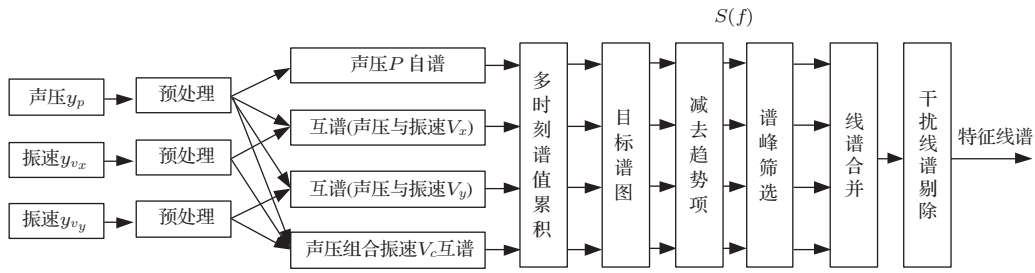


图2 VLA跟踪目标低频线谱提取框图

Fig. 2 Low frequency line spectrum fusion extraction block diagram of VLA tracking target

中心化处理:

$$z(n) = x(n) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(i), \quad n = 0, \dots, N-1. \quad (1)$$

由于低频线谱在频率上和幅度上都存在不稳定性,尤其是幅度上的不稳定性给利用低频线谱进行识别带来很大的影响,线谱的起伏增加了线谱提取的难度,也对某些时刻提取线谱的可靠程度造成影响。通过多个时刻谱值积累平均可以减少偶然因素的影响,抑制随机干扰伪线谱,提高线谱信噪比,增强线谱提取能力,并且利用自适应线谱增强来进一步实现线谱的增强。

(2) 提取趋势项

对信号进行功率谱分析得到功率谱  $S$ , 由于线谱叠加在连续谱之上,为了分解出线谱信息,需要通过谱平滑减去连续谱,得到拉直后的线谱图,只保留线谱。连续谱平滑的方法有很多种,本文采用  $m$  次多项式实现连续谱的最优拟合。得到连续谱的变化趋势,从原频谱中减去这一变化趋势,并且将小于零的点置为零,就得到拉平的线谱图。

$$Z(n) = \begin{cases} S(n) - \hat{X}(n), & S(n) - \hat{X}(n) > 0, \\ 0, & S(n) - \hat{X}(n) \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中,  $S(n)$  为功率谱,  $\hat{X}(n)$  为最优拟合连续谱。

(3) 谱峰提取

进一步按照以下步骤进行谱线提取:

(a) 对拉平的线谱图进行归一化得到

$$Z_1(n) = \frac{Z(n) - \min[Z(n)]}{\max[Z(n)] - \min[Z(n)]}. \quad (3)$$

(b) 对每一点设置标志  $\text{Flag}(n) = 1, n = 0, \dots, N-1$ , 对  $Z_1$  求平均值, 舍去小于等于平

均值的点,

$$\text{Flag}(n) = \begin{cases} 1, & Z_1(n) > \bar{Z}_1(n), \\ -1, & Z_1(n) \leq \bar{Z}_1(n), \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中:  $\bar{Z}_1(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} Z_1(n)$ 。

(c) 剔除连续上升或连续下降中间点,只留下转折点,谱峰所在点在局部地区为最大点,不可能出现在中间点上。

记

$$Z_2(n) = Z_1(n+1) - Z_1(n), \quad (5)$$

$$Z_3(n) = Z_1(n) - Z_1(n-1), \quad (6)$$

可得

$$\text{Flag}(n) = \begin{cases} 1, & Z_2(n) \cdot Z_3(n) \geq 0, \\ -1, & Z_2(n) \cdot Z_3(n) < 0. \end{cases} \quad (7)$$

(d) 剔除极小值点,

$$\text{Flag}(n) = \begin{cases} 1, & \text{其他}, \\ -1, & Z_1(n) < Z_1(n+1) \text{ 和} \\ & Z_1(n) < Z_1(n-1). \end{cases} \quad (8)$$

(e) 将剔除的点所在位置的值置为零,得到  $Z_4(n)$ ,

$$Z_4(n) = \begin{cases} Z_1(n), & \text{Flag} = 1, \\ 0, & \text{Flag} = -1. \end{cases} \quad (9)$$

(f) 谱峰合并,设置频率范围门限  $\Delta_{\text{gate}}$ ,将频率范围  $\Delta_{\text{gate}}$  内的线谱看作一个线谱,取局部最大值点,

$$Z_5(n) = \begin{cases} Z_4(n), & \max[Z_4(n)]_{\Delta_{\text{gate}}}, \\ 0, & 0. \end{cases} \quad (10)$$

(g) 对剩下的局部最大点进行卡门限处理, 在对门限进行选择的时候, 由于不同的目标线谱信噪比不同, 门限的选择要适应不同信噪比的情况, 本文提出利用拉平后线谱  $Z_1(n)$  的均方差乘一比例因子  $\kappa$  设为门限,

$$Z_6(n) = \begin{cases} Z_5(n), & Z_5(n) \geq \kappa \cdot \text{std}[Z_1(n)], \\ 0, & Z_5(n) < \kappa \cdot \text{std}[Z_1(n)], \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中:

$$\text{std}[Z_1(n)] = \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} [Z_1(n) - \bar{Z}_1(n)]^2}. \quad (12)$$

比例因子  $\kappa$  的设置, 是依据大量数据统计得到的, 可据历程图的人工观测结果和自动提取出来的线谱结果进行对比分析, 最后选定一个比例因子。

#### (4) 利用互谱测向剔除干扰线谱

下面介绍利用 VLA 跟踪目标声压振速互谱线谱测向方法剔除干扰线谱的原理。目标信号可表示为  $s(t)$ , 那么 VLA 跟踪后得到的声压和振速信号分别为  $y_p(t)$ 、 $y_{v_x}(t)$ 、 $y_{v_y}(t)$ , 对  $y_p(t)$ 、 $y_{v_x}(t)$  和  $y_{v_y}(t)$  做傅里叶变换, 得到相应谱为  $Y_p(f)$ 、 $Y_{v_x}(f)$  与  $Y_{v_y}(f)$ , 则声压振速互谱为

$$S_{pv_x}(f) = Y_p(f) \cdot Y_{v_x}^*(f), \quad (13)$$

$$S_{pv_y}(f) = Y_p(f) \cdot Y_{v_y}^*(f). \quad (14)$$

声压、组合振速互谱为<sup>[6]</sup>

$$S_{pv_c}(f) = Y_p(f) \cdot Y_{v_c}^*(f), \quad (15)$$

$$S_{pv_s}(f) = Y_p(f) \cdot Y_{v_s}^*(f). \quad (16)$$

其中: \* 表示共轭。

对于声压振速互谱来说, 由于声压振速是同相位的, 根据傅里叶变换的基本特性, 两个同相位输入的能量集中在互谱的实部, 所以目标信号的能量集中在复声强器互谱输出的实部, 虚部中主要为干扰能量。

令

$$I_{R_x}(f) = \text{Re}[Y_p(f) \cdot Y_{v_x}^*(f)], \quad (17)$$

$$I_{R_y}(f) = \text{Re}[Y_p(f) \cdot Y_{v_y}^*(f)], \quad (18)$$

根据式(17)和式(18)可以求出每个频率点对应的方位,

$$\theta(f) = \tan^{-1} \frac{I_{R_y}(f)}{I_{R_x}(f)} = \tan^{-1} \frac{\text{Re}[Y_p(f) \cdot Y_{v_y}^*(f)]}{\text{Re}[Y_p(f) \cdot Y_{v_x}^*(f)]}. \quad (19)$$

因此可以对筛选之后的线谱  $Z_6(n)$  进行处理, 分别得到每根线谱对应的方位, 与目标跟踪方位进行对比, 误差较大的不认为是目标线谱, 从而将干扰线谱剔除, 实现线谱净化。为了保证利用线谱测定方位的正确性, 可以采用多个时刻的结果平均的方法。如果测得方位与听测方位不同, 误差较大, 那么认为不是目标线谱, 剔除出去。这种方法可以有效解决左右舷对称方位同时存在目标时特征线谱难以分辨的问题。

## 2 VLA 跟踪目标低频线谱提取海上试验数据验证

选用 VLA 实测海试数据, VLA 为 32 阵元矢量水听器阵列, 间距 2 m, 长 62 m, 采用 VTAMVDR 算法对阵元域信号处理, 处理频段 50 ~ 600 Hz。选取其中一段信号, 在左右舷对称方位同时存在目标时刻检验本文线谱提取方法效果, 图 3 给出了 VLA 波束输出图, 目标位于 104° 方位, 左右舷对称方位 256° 也有一目标。

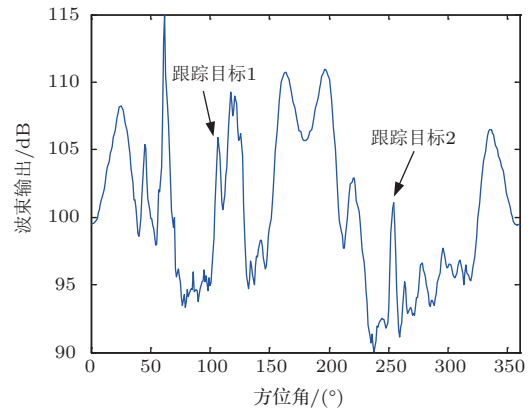


图 3 波束输出图

Fig. 3 Beam output char

采用上文所述过程, 对选取目标进行线谱提取, 经过声压自谱、声压振速互谱以及声压组合振速互谱计算, 归一化, 提取趋势项, 谱线拉平, 卡门限谱峰搜索, 干扰线谱剔除等处理过程, 最终得到目标的真实线谱。在卡门限谱峰搜索中, 经过大量数据测试, 对于该阵列, 比例因子的值为 6 时线谱提取效果较好。图 4 给出了 106° 方位目标低频线谱的提取流程及结果, 图 5 给出了 256° 方位目标低频线谱提取结果。

表 1、表 2 给出了两个左右舷对称方位目标的线谱提取过程及线谱提取结果,对于  $106^\circ$  方位目标线谱频率分别为 98 Hz、215 Hz、285 Hz 和 356 Hz,  $256^\circ$  方位目标线谱频率分别为 186 Hz 和 275 Hz,

对比表 1 和表 2, 不经干扰线谱剔除时, 两目标线谱互相干扰, 利用线谱测向可分别提取出各自的线谱特征, 表明本文方法能良好区分左右舷目标特征线谱。

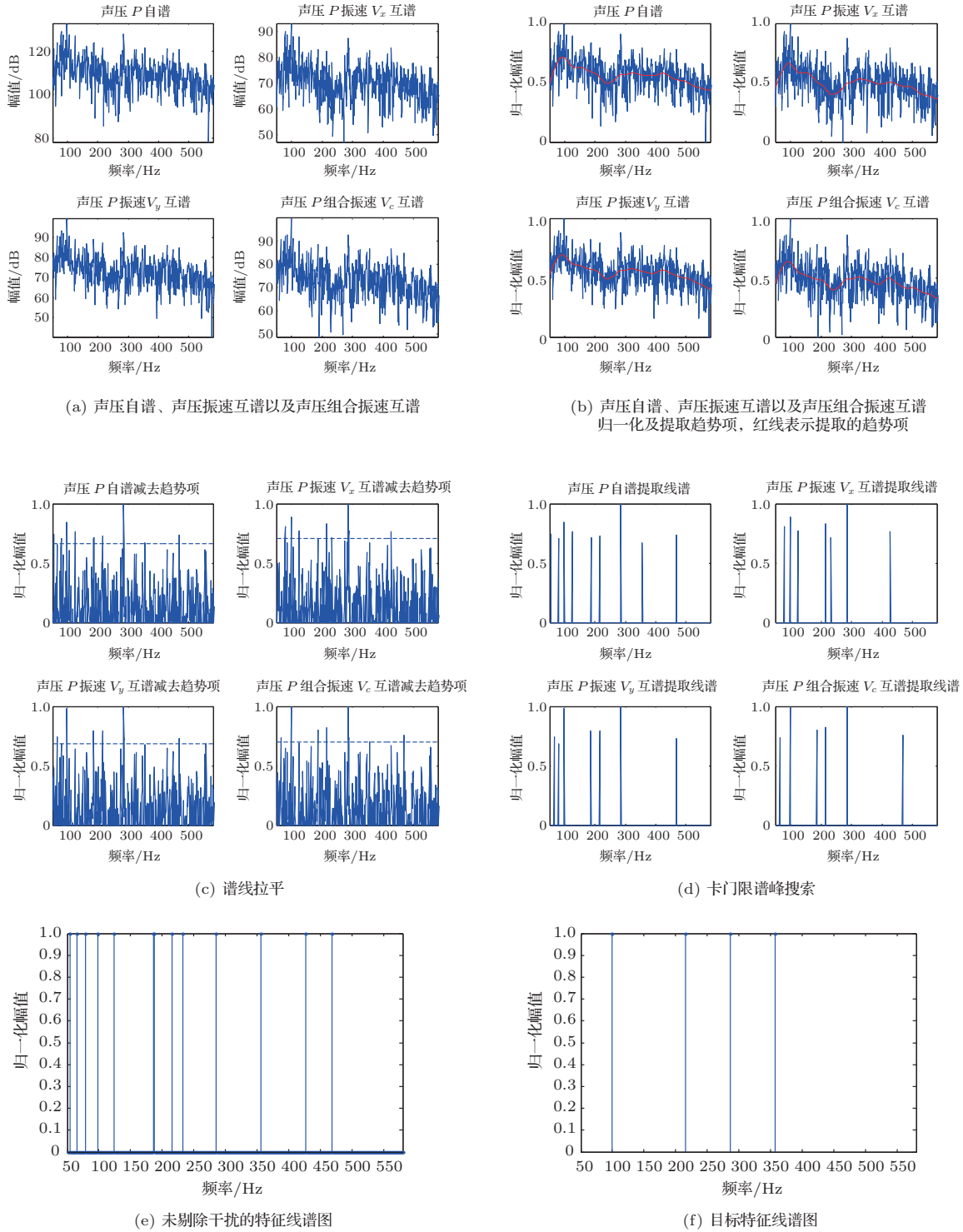


图 4 跟踪目标低频线谱提取 ( $106^\circ$ )

Fig. 4 Low frequency line spectrum extraction of tracking target ( $106^\circ$ )

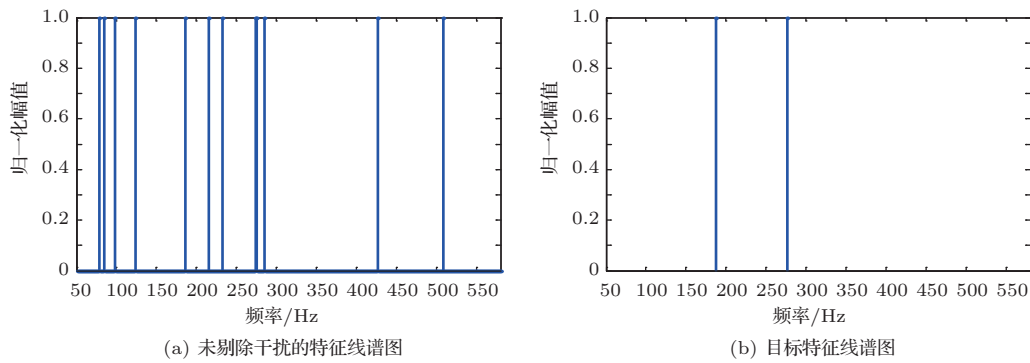


图5 跟踪目标低频线谱提取 (256°)

Fig. 5 Low frequency line spectrum extraction of tracking target (256°)

表1 提取线谱频率及估计方位 (106°)

Table 1 Extraction of line spectrum frequency and estimation of orientation (106°)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
频率/Hz	54	65	79	<b>98</b>	124	186	187	<b>215</b>	233	<b>285</b>	<b>356</b>	427	468
估计方位/(°)	248.13	89.83	244.17	<b>102.81</b>	127.82	256.92	208.03	<b>107.98</b>	193.95	<b>107.59</b>	<b>115.55</b>	120.47	97.10
与跟踪方位误差	140.13	18.17	136.17	<b>5.19</b>	19.82	148.92	100.03	<b>0.02</b>	85.95	<b>0.41</b>	<b>7.55</b>	12.47	10.90
是否目标特征线谱	否	否	否	是	否	否	否	是	否	是	是	否	否

表2 提取线谱频率及估计方位 (256°)

Table 2 Extraction of line spectrum frequency and estimation of orientation (256°)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
频率/Hz	79	85	98	124	<b>186</b>	215	233	274	<b>275</b>	285	427	509
估计方位/(°)	244.02	112.31	102.63	134.23	<b>250.34</b>	114.41	186.88	115.55	<b>260.19</b>	117.86	95.58	44.94
与跟踪方位误差	10.98	142.69	152.37	120.77	<b>4.66</b>	140.59	68.12	139.45	<b>5.19</b>	137.14	159.42	210.06
是否目标特征线谱	否	否	否	否	是	否	否	否	是	否	否	否

### 3 结论

本文研究了VLA跟踪目标低频线谱的提取问题,提出了一种低频线谱提取方法,分别求得声压自谱、声压振速互谱以及声压组合振速互谱,然后经过提取得到未剔除干扰的特征线谱,提出了将拉平后线谱均方差与一比例因子乘积设为门限,可以有效提取线谱成分,利用互谱中高信噪比线谱测向方法剔除干扰线谱,能准确提取出目标特征线谱,较好解决了左右舷目标低频线谱特征相互干扰问题,可供具体应用借鉴。

### 参考文献

- [1] 陈韶华, 陈川, 郑伟. 单矢量水听器线谱多目标分辨研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1253-1256.  
Chen Shaohua, Chen Chuan, Zheng Wei. Multi-sources distinguishing by exploring line spectra with single acoustic vector sensor[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1253-1256.
- [2] 肖大为, 程锦房, 张景卓. 单矢量水听器多目标方位的盲估计研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014, 38(4): 775-778.  
Xiao Dawei, Cheng Jinfang, Zhang Jingzhuo. Blind azimuth estimate for multi-source based on single vector hydrophone[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2014, 38(4): 775-778.
- [3] 李楠松, 朴胜春. 单矢量水听器被动测距方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2273-2282.  
Li Nansong, Piao Shengchun. Research on passive ranging method with single vector hydrophone[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10): 2273-2282.
- [4] 李海涛, 李智忠, 宋志杰, 等. 一种新的矢量传感器线阵波束形成算法[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(10): 144-146, 150.  
Li Haitao, Li Zhizhong, Song Zhijie, et al. A new algorithm for vector sensor line array beamforming[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(10): 144-146, 150.
- [5] 李思纯. 基于矢量水听器的目标特征提取与识别技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [6] 惠俊英. 矢量声信号处理基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.