

# 基于波束域相位稳定性的目标检测方法研究

郑恩明<sup>1</sup>, 田甜<sup>2</sup>, 陈新华<sup>1</sup>, 王萍<sup>3</sup>, 李冰<sup>1</sup>, 王麟煜<sup>1</sup>, 上官经邦<sup>1</sup>, 宋春楠<sup>1</sup>

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 中国电子科技集团第3研究所, 北京 100015;  
3. 北京神州惠普科技股份有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 低信噪比下,为解决常规波束形成等权值累加空间谱各方位谱值,导致目标方位谱值被非目标方位谱值淹没,不能实现对水下辐射噪声信号未知的目标检测问题,本文提出了一种基于波束域相位稳定性的目标检测方法.依据水下目标辐射噪声含有稳定线谱及空间谱各方位对应波束域相位稳定性差异,该方法利用波束域相位方差对各方位谱值进行加权统计,实现了对水下目标方位角的有效估计.数值仿真和实验结果表明:相比常规波束形成,该方法可以进一步增强目标方位能量,抑制非目标方位噪声干扰,改善目标检测信噪比增益.

**关键词:** 阵列信号处理; 水下目标辐射噪声; 波束域相位稳定性; 加权统计; 目标检测

**中图分类号:** TB565 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)09-2033-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.09.001

## Target Detection Method Based on the Stability of Beam Domain Phase

ZHENG En-ming<sup>1</sup>, TIAN Tian<sup>2</sup>, CHEN Xin-hua<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>3</sup>, LI Bing<sup>1</sup>, WANG Lin-yu<sup>1</sup>,  
SHANGGUAN Jing-bang<sup>1</sup>, SONG Chun-nan<sup>1</sup>

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100084, China;  
2. The Third Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China;  
3. Appsoft Technology Co., Ltd, Beijing 100085, China)

**Abstract:** In the conventional beam-forming (CBF) under low signal to noise ratio (SNR), the spectrum values of each azimuth are accumulated by equal weight, and the spectrum values of targets are usually inundated in those of non-targets, so the underwater targets with unknown radiated noise can be hardly detected. In order to detect the effective target signal, a target detection method based on the beam domain phase stability is proposed. According to the feature that the underwater target radiates noise with stable line spectrum and the difference of the beam domain phase stability of each azimuth, this method cumulates spectrum values of each azimuth based on the beam domain phase variance by weighted statistical algorithm. Therefore, the azimuth of the underwater target is effectively estimated. The numerical simulation and experimental results both verify that, compared with the conventional beam-forming, this method can well enhance the energy of the target azimuth, restrain the background noise disturbances of non-target azimuth, and improve the SNR gain of the target detection.

**Key words:** array signal processing; underwater target radiated noise; beam domain phase stability; weighted statistical; target detection

## 1 引言

由于被动声纳不主动对外辐射信号,隐蔽性较强,在阵列信号处理中,波束形成一直是对水下目标进行检测、定位、跟踪、识别重要手段之一.但随着降噪技术的不断提高,被动声纳接收数据的信噪比在不断降低,常规波束形成已不能满足远程目标检测需求.学者通过

理论和实验证明:水下目标辐射噪声中含有丰富的单频分量,特别是在低频段<sup>[1-6]</sup>,线谱谱级通常比连续谱平均谱级高出10~25dB.基于此,探索一种基于线谱特性的波束形成方法,可为被动声纳实现水下目标远程探测提供一种可能.

针对线谱特性及其应用方面的研究,国内外学者

收稿日期:2015-06-29;修回日期:2015-09-22;责任编辑:覃怀银

基金项目:国家自然科学基金(No. 61372180);国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2013YQ140431);中国科学院声学研究所青年人才领域前沿项目资助课题(No. Y454341261)

做了不少努力,并取得了一定的研究成果<sup>[7-21]</sup>.文献[7]利用线谱信号与背景噪声间的时间相关半径与相位起伏均匀性差异,提出了一种基于信号起伏相位差分对齐的相干检测方法,抑制了背景噪声能量干扰.文献[8,9]利用相位起伏特性,改善了对目标的监测性能和线谱信号与背景噪声的时间相关半径.文献[10]提出了一种差分二次平均修正的频域相位补偿线谱检测方法,该方法与文献[7]相似.同样,文献[11]给出了正弦信号的直接 FFT 参数估计与相位差分法对比研究结果.这些方法基于相位差分一阶矩信息进行相位对齐或补偿来提高 FFT 参数估计效果.同时,文献[12]依据单频信号与背景噪声的相位差分前后的相位方差二阶矩信息,进一步增强单频信号能量、抑制噪声、提高信噪比.文献[15,16]依据不同方位对应频率单元稳定性方面的差异,提出了一种基于瞬时频率方差加权的宽带波束形成方法,文献[17]依据不同频率单元对应方位稳定性的差异,提出了一种基于瞬时方位方差加权的宽带波束形成方法,文献[18]依据不同频率单元的波束形成最大值幅值的差异,提出了一种基于幅值加权的宽带波束形成方法,它们均克服了传统多频带波束形成四维显示难点,改善了宽带波束形成法在远程目标检测方面的性能.文献[19]依据不同时延对应频率单元稳定性方面的差异,提出了一种基于瞬时频率方差加权的时延估计方法,文献[20,21]依据不同频率单元对应时延稳定性的差异,提出了一种基于瞬时时延方差加权的时延估计方法,它们均提高了互相关法在远程目标定位方面的性能.

在较低信噪比情况下,受背景噪声影响,常规波束形成空间谱的各个方位的谱值起伏很大,等权值累加各次所得空间谱后,会存在目标方位被淹没在其他非目标方位中情况,不便于目标检测和方位估计.受文献[12,15~21]所提出的加权思想启发,针对水下辐射噪声信号未知的目标检测问题,依据水下目标辐射噪声含有稳定线谱及空间谱各方位对应波束域相位稳定性差异,本文提出了一种基于波束域相位稳定性的目标检测方法.该方法利用波束域相位方差对空间谱的各个方位进行不等权值加权,可进一步增强目标方位能量,抑制非目标方位噪声干扰,改善目标检测信噪比增益,进一步提高常规波束形成对未知目标的检测性能.

## 2 基于波束域相位稳定性的目标检测算法

### 2.1 线阵接收信号模型

假设,水平拖线阵各阵元接收拾取数据  $x_i(t)$  为:

$$x_i(t) = s(t + \Delta\tau_i) + n_i(t), \quad 1 \leq i \leq I \quad (1)$$

式中,  $\Delta\tau_i = d \cdot (i-1) \cdot \cos(\theta_0)/c$  为目标辐射信号到第  $i$  阵元相比到参考阵元的时延差,  $i$  为阵元号,  $I$  为阵

元数,  $d$  为阵间距,  $c$  为参考声速,  $\theta_0$  为目标相对水平拖线阵辐射信号方向,  $n_i(t)$  为第  $i$  阵元在  $t$  时刻接收的背景噪声.  $s(t)$  水下目标辐射信号简化形式可表示为<sup>[5]</sup>:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot \cos(2\pi f_n t + \varphi_n) \quad (2)$$

式中,  $A_n$  为线谱信号幅度,  $f_n$  为线谱信号频率,  $\varphi_n$  为线谱信号初始相位,  $t$  为目标辐射信号时刻,  $N$  为假定的独立分量数,  $\varphi_n$  服从  $[0 \sim 2\pi]$  均匀分布.

### 2.2 本文算法基本原理

在阵列信号理中,由于波束形成具有很好的空间增益,在检测目标时,常被采用.在低信噪比情况下,受背景噪声影响,空间谱各个方位对应的谱值起伏很大,常规波束形成所得空间谱等权值累加后会存在目标方位被淹没在其他方位中情况,不便于目标检测和方位估计.对此,本文对常规波束形成做了进一步改进,采用不等权值累加每次常规波束形成所得空间谱,可抑制非目标方位噪声干扰,增强目标检测信噪比增益,实现对水下辐射噪声信号未知的目标检测.改进算法原理如下:

假设目标辐射信号具有稳定线谱,统计时间内目标方位变化缓慢,可以采用下述方法实现对目标检测.

首先对各阵元采集数据分块做快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 分析,所得频谱记为  $X_i(m, f_k)$ , ( $i = 1, 2, \dots, I; m = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, K$ ). 其中,  $I$  为阵元数,  $M$  为采集数据分块数,  $K$  为每块 FFT 分析所得频率单元数.

令目标线谱所对应频率单元为  $f_l$ , 对每块 FFT 分析结果中  $f_l$  频率单元各阵元数据  $X_i(m, f_l)$  进行相位补偿、累加、求和完成频域窄带波束形成,记为  $P(m, \theta)$ ,  $\theta = 0, 1, \dots, \Theta$ ,  $\Theta$  为多波束形成时预成波束个数.

如果采用常规波束形成进行目标检测和方位估计,  $f_l$  频率单元的最终空间谱可按式(3)表示<sup>[22-24]</sup>:

$$P(\theta) = \sum_{m=1}^M P(m, \theta), \theta = 0, 1, \dots, \Theta \quad (3)$$

在波束形成所预设的方位角内,当目标方位只占据某一个或某几个方位角时,如果采用式(3)求取最终空间谱,则会将所有方位角对应的谱值等价地加权到最终空间谱中.在低信噪比情况下,受背景噪声影响,空间谱的各个方位对应的谱值起伏较大,不便于最后目标检测和方位估计.对此,利用目标方位与非目标方位对应的波束域相位在二阶矩上的差别,对各方位对应的谱值进行不等权值加权求和,削弱噪声对最终空间谱的影响,增强目标检测信噪比增益,抑制非目标方位噪声干扰、提高信噪比,可将式(3)变换为:

$$P(\theta) = \sum_{m=1}^M W \cdot P(m, \theta), \theta = 0, 1, \dots, \Theta \quad (4)$$

式中,  $W$  为不同方位角所需权值.

### 2.3 本文算法实现过程

本文方法实现过程可分为以下 5 个步骤:

**步骤 1** 对各阵元拾取数据进行滤波放大, 然后通过 A/D 电路采样, 采样率为  $f_s$ , 得到离散信号  $x_i(n'T_s)$ , 其中,  $i = 1, 2, \dots, I; T_s = \frac{1}{f_s}; n' = 1, 2, \dots, N', N'$  为数据长度.

**步骤 2** 对各阵元采集数据做 FFT 分析, 所得频谱记为  $X_i(m, k \times w_s)$ , ( $i = 1, 2, \dots, I; m = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, K$ ), 其中,  $I$  为阵元数,  $M$  为统计次数,  $K$  为 FFT 分析所得频率单元数,  $w_s = \frac{2\pi}{(K \times T_s)}$  是 FFT 分析中的频率采样间隔.

假设目标线谱所对应频率单元为第  $l$  个, 按式(5)对各阵元数据  $X_i(m, l \times w_s)$  进行相位补偿、累加、求和完成频域窄带波束形成, 记为  $P(m, \theta), \theta = 0, 1, \dots, \Theta, \Theta$  为多波束形成时预成波束个数.

$$P(m, \theta) = \sum_{i=1}^I X_i(m, l \times w_s) e^{j2\pi l w_s \tau_i}, i = 1, 2, \dots, I \quad (5)$$

$\tau_i$  如式(6)所示:

$$\tau_i = \frac{(i-1) \cdot d \cdot \cos\left(\frac{\theta \cdot \pi}{180}\right)}{c}, \quad i = 1, 2, \dots, I, \theta = 1, 2, \dots, \Theta \quad (6)$$

式中,  $d$  为阵间距,  $c$  为有效声速,  $X_i(m, l \times w_s)$  为式(7)所示:

$$X_i(m, l \times w_s) = A e^{j(2\pi l w_s \tau_i + \varphi_0)} + N_i e^{j\varphi_i(m)}, i = 1, 2, \dots, I \quad (7)$$

$\tau_i, \theta_0$  如式(8)所示:

$$\tau_i, \theta_0 = \frac{(i-1) \cdot d \cdot \cos\left(\frac{\theta_0 \cdot \pi}{180}\right)}{c}, i = 1, 2, \dots, I \quad (8)$$

式中,  $\theta_0$  为目标方位角,  $\tau_i, \theta_0$  为第  $i$  阵元相对参考阵元 1 接收信号时延差,  $\varphi_0$  为目标辐射信号初始相位,  $\varphi_i(m)$  为第  $i$  阵元第  $m$  次接收背景噪声产生的相位误差,  $A$  为各阵元接收某一线谱信号幅度,  $N_i$  为各阵元接收背景噪声幅度.

求取各方位相位, 记为  $\varphi(m, \theta)$ .

$$\varphi(m, \theta) = \operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(P(m, \theta))}{\operatorname{Re}(P(m, \theta))}\right) \quad (9)$$

**步骤 3** 更新接收信号, 重复进行步骤 1、步骤 2, 直到重复次数达到预先设定值  $M$ , 则各频率单元均得到  $M$  个波束域相位值, 记为  $\varphi(m, \theta), m = 1, 2, \dots, M, \theta = 0, 1, \dots, \Theta$ .

**步骤 4** 对所有方位角的波束域相位值按式(10)

进行方差计算, 记为  $\delta_\varphi(\theta), \theta = 0, 1, \dots, \Theta$ .

$$\delta_\varphi(\theta) = \frac{1}{M} \sqrt{\sum_{m=1}^M (\varphi(m, \theta) - \varphi(\theta))^2}, \quad (10)$$

$$\theta = 1, 2, \dots, \Theta$$

$\varphi(\theta)$  如式(11)所示:

$$\varphi(\theta) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \varphi(m, \theta), \theta = 1, 2, \dots, \Theta \quad (11)$$

**步骤 5** 利用求得的波束域相位方差对所有方位进行不等权值加权统计, 得到最终空间谱和方位估计值. 如式(12)所示

$$P(\theta) = \sum_{m=1}^M \frac{P(m, \theta)}{\delta_\varphi(\theta)}, \theta = 1, 2, \dots, \Theta \quad (12)$$

当  $\delta_\varphi(\theta)$  较小时, 其对应的谱值在  $P(\theta)$  中数值较大, 便于检测和估计.

### 2.4 本文算法性能分析

在波束形成所预设的方位角内, 当目标方位只占据某一个或某几个方位角时. 非目标方位的最小和最大预成波束域相位值为  $\varphi_1, \varphi_L$ , 目标方位的波束域相位值的最小值和最大值分别为  $\varphi_{\min}, \varphi_{\max}$ . 进行  $M$  帧统计, 假设所有方位角的波束域相位值均服从均匀分布, 非目标方位和目标方位的波束域相位方差分别为  $\delta_n, \delta_s$ .

$$\delta_s = \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{\sqrt{12}} \quad (13)$$

$$\delta_n = \frac{\varphi_L - \varphi_1}{\sqrt{12}} \quad (14)$$

由式(7)可知, 当  $\theta = \theta_0$  时, 对各阵元数据  $X_i(m, l \times w_s)$  进行相位补偿后的累加所得结果、谱值及相位分别如式(15)、(16)和(17)所示:

$$\begin{aligned} P(m, \theta_0) &= \sum_{i=1}^I (A e^{j(2\pi l w_s \tau_i + \varphi_0)} + N_i e^{j\varphi_i(m)}) e^{j2\pi l w_s \tau_i, \theta_0} \\ &= \sum_{i=1}^I (A e^{j\varphi_0} + N_i e^{j\varphi_i(m) - j2\pi l w_s \tau_i, \theta_0}), m = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} |P(m, \theta_0)| &= \sqrt{\left( \sum_{i=1}^I (A \sin(\varphi_0) + N_i \sin(\varphi_i(m) - 2\pi l w_s \tau_i, \theta_0)) \right)^2} \\ &\quad + \left( \sum_{i=1}^I (A \cos(\varphi_0) + N_i \cos(\varphi_i(m) - 2\pi l w_s \tau_i, \theta_0)) \right)^2, \\ m &= 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (16)$$

$$\varphi(\theta_0) = \operatorname{atan}\left( \frac{\sum_{i=1}^I (A \sin(\varphi_0) + N_i \sin(\varphi_i(m) - 2\pi l w_s \tau_i, \theta_0))}{\sum_{i=1}^I (A \cos(\varphi_0) + N_i \cos(\varphi_i(m) - 2\pi l w_s \tau_i, \theta_0))} \right), \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (17)$$

当  $\theta \neq \theta_0$  时, 对各阵元数据  $X_i(m, l w_s)$  进行相位补

偿后的累加所得结果、谱值及相位分别如式(18)、(19)和(20)所示:

$$P(m, \theta_0) = \sum_{i=1}^I (Ae^{j(2\pi l w_s \tau_i + \varphi_0)} + N_i e^{j\varphi_i(m)}) e^{-j2\pi l w_s \tau_i},$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$
(18)

$$|P(m, \theta)| = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^I (A \sin(2\pi l w_s \tau_i + \varphi_0 - 2\pi l w_s \tau_i, \theta)) + N_i \sin(\varphi_i(m) - 2\pi l w_s \tau_i, \theta) \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^I (A \cos(2\pi l w_s \tau_i + \varphi_0 - 2\pi l w_s \tau_i, \theta)) + N_i \cos(\varphi_i(m) - 2\pi l w_s \tau_i, \theta) \right)^2}$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$
(19)

$$\varphi(\theta) = \text{atan} \left( \frac{\sum_{i=1}^I (A \sin(2\pi l w_s \tau_i + \varphi_0 - 2\pi l w_s \tau_i, \theta)) + N_i \sin(\varphi_i(m) - 2\pi l w_s \tau_i, \theta)}{\sum_{i=1}^I (A \cos(2\pi l w_s \tau_i + \varphi_0 - 2\pi l w_s \tau_i, \theta)) + N_i \cos(\varphi_i(m) - 2\pi l w_s \tau_i, \theta)} \right)$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$
(20)

对比式(16)和式(19)可知:受噪声影响,当A与 $N_i$ 存在一定比值时,会导致目标方位对应的谱值 $|P(m, \theta_0)|$ 小于某一个非目标方位对应的谱值 $|P(m, \theta)|$ ,使常规波束形成不能正确检测到目标及估计出其方位.但当 $\sum_{i=1}^I A \sin(\varphi_0) > \sum_{i=1}^I N_i \sin(\varphi_i(m) - 2\pi l w_s \tau_i, \theta_0)$ 时,目标方位对应的波束域相位主要由信号合成所得,受噪声影响较少,每次波束形成所得目标方位对应的相位相对于 $\varphi(\theta_0)$ 变化较小,而非目标方位对应的波束域相位主要由噪声合成

所得,受噪声影响较大,每次波束形成所得非目标方位对应的相位都不一样,变化较大.由此,可得目标方位角波束域相位波动 $\varphi(\theta_0) \in (\varphi_{\min}, \varphi_{\max})$ 小于 $\varphi(\theta) |_{\theta \neq \theta_0} \in (\varphi_l, \varphi_r)$ ,可利用该特性,实现对目标的检测,提高波束形成对信噪比的鲁棒性.

所以,当目标方位变化缓慢,A与 $N_i$ 存在一定比值时,通过排序、提取中间部分值可使相位方差值 $\delta_s \ll \delta_n$ ;当目标方位对应波束域相位受水声信道影响产生波动时,可对各方位波束域相位先进行差分对齐,然后再求取相位差分对齐后的相位方差值.此时由理论分析可知:目标方位波束域相位主要由信号合成所得,受噪声影响较少,每次波束形成所得目标方位对应的相位相对于初始方位变化较小,而非目标方位对应的波束域相位主要由噪声合成所得,受噪声影响较大,每次波束形成所得非目标方位对应的相位都不一样,变化较大,进而可得相位差分对齐后的相位方差值 $\delta_s \ll \delta_n$ ,由式(12)可知:在波束形成空间谱输出值中,目标方位对应的谱值将远大于其它位置对应的谱值.

依据水下目标辐射噪声的线谱幅值明显高出连续谱幅值.现假定目标1、2辐射信号只有线谱分量,线谱频率分别为 $f_1 = 60\text{Hz}$ 和 $f_2 = 70\text{Hz}$ ,目标1、2相对线阵方位角分别为 $\theta_1 = 60^\circ$ 和 $\theta_2 = 70^\circ$ ,干扰为带限噪声,带宽为 $10 \sim 200\text{Hz}$ .每次采集长度为 $T = 10\text{s}$ ,对采集数据分10段进行频域波束形成.线阵间距为 $d = \frac{c}{2f_2}$ ,有效声速为 $c = 1500\text{m/s}$ .图1是输入平均谱级比(Spectrum Level Ratio, SLR)从 $-30\text{dB}$ 到 $20\text{dB}$ ,每个平均谱级比下做200次独立统计所得目标方位与非目标方位波束域相位标准差,图2依据式(3)和式(12)所得最终空间谱,所得目标检测正确概率.图3为输入平均谱级比为 $-10\text{dB}$ 和 $-15\text{dB}$ 时,由常规波束形成和本文方法所得空间谱.

由图1可知,在输入平均谱级比高于 $-25\text{dB}$ 时,目标方位波束域相位标准差小于非目标方位波束域相位标准差.且随着信噪比变高,则第 $m$ 次接收背景噪声产生的相位误差 $\varphi_i(m)$ 波动会变的更小,由式(17)和

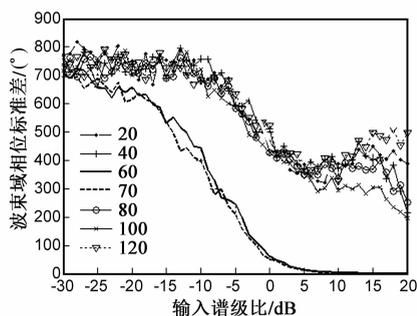


图1 波束域相位标准差

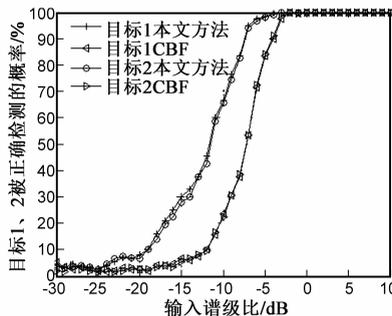


图2 目标1、2被正确检测概率

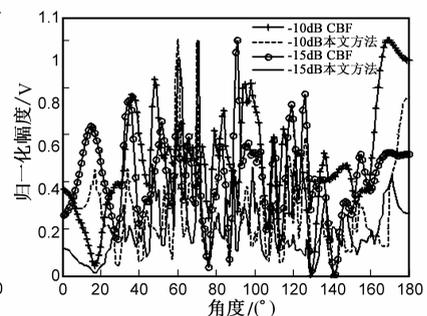


图3 两种方法所得空间谱

式(20)可知,目标方位波束域相位主要由信号合成所得,受噪声影响较少,每次波束形成所得目标方位对应的相位相对于 $\varphi(\theta_0)$ 变化较小,而非目标方位波束域相位主要由噪声合成所得,受噪声影响较大,每次波束形成所得非目标方位对应的相位都不一样,变化较大.由此,可得目标方位角波束域相位波动 $\varphi(\theta_0) \in (\varphi_{\min}, \varphi_{\max})$ 小于 $\varphi(\theta) |_{\theta \neq \theta_0} \in (\varphi_l, \varphi_L)$ .

由图2可知,在输入平均谱级比为 $-25\text{dB} \sim -3\text{dB}$ 时,本文方法所得目标检测正确概率高于常规波束形成所得目标检测正确概率.原因在于,在输入平均谱级为 $-25\text{dB} \sim -3\text{dB}$ 时,由于第 $i$ 阵元接收噪声产生的相位差,可能会导致波束形成结果中会出现目标方位对应的谱值 $|P(m, \theta_0)|$ 小于某一个非目标方位对应的谱值 $|P(m, \theta)|$ 情况,不能正确检测到目标及估计出其方位.而目标方位波束域相位主要由信号合成所得,受噪声影响较少,每次波束形成所得目标方位对应的相位相对于 $\varphi(\theta_0)$ 变化较小,而非目标方位波束域相位主要由噪声合成所得,受噪声影响较大,每次波束形成所得非目标方位对应的相位都不一样,变化较大.由此,可得目标方位角波束域相位波动 $\varphi(\theta_0) \in (\varphi_{\min}, \varphi_{\max})$ 小于 $\varphi(\theta) |_{\theta \neq \theta_0} \in$

$(\varphi_l, \varphi_L)$ ,即 $\delta_i \ll \delta_n$ .由此,可得本文方法所得目标检测正确概率高于常规波束形成所得检测目标正确概率.

同样,由图3所示方位历程图可知,在该仿真的情况下,常规波束形成在 $-10\text{dB}$ 已不能实现对目标检测,而本文方法在 $-15\text{dB}$ 还能实现对目标检测.数值仿真结果表明,本文方法可进一步提高常规波束形成对目标的检测性能.

### 3 实验结果与分析

本次海上试验数据为2012年4月在南海进行目标检测试验所得.实验采用32元8m等间隔水平拖曳线列阵接收信号,水平拖曳线列阵的端向方位设为 $0^\circ$ ,试验中存在多个目标相对线阵在运动.

本次理实验数据长度为1500s,所用采样率为 $f_s = 20\text{kHz}$ .一次采集长度为 $T = 5\text{s}$ ,对采集数据分5段进行波束形成.然后再分别按式(3)和式(12)进行后续理,得到所需空间谱.

图4~7为频率单元为 $f_c = 77\text{Hz}$ 的方位历程图和、某一时刻空间谱、以及统计次数内的不同方位波束域相位标准差倒数.

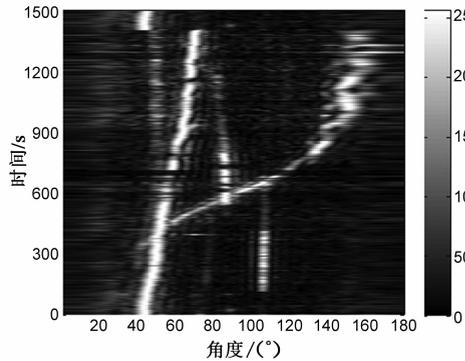


图4 CBF所得方位历程图

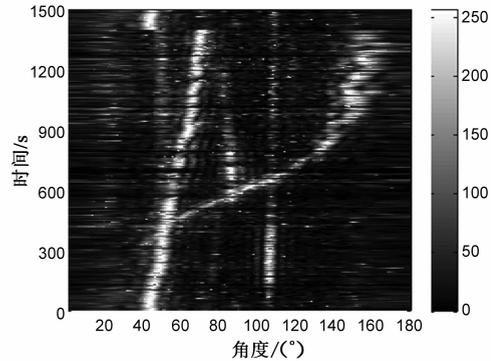


图5 本文方法所得方位历程图

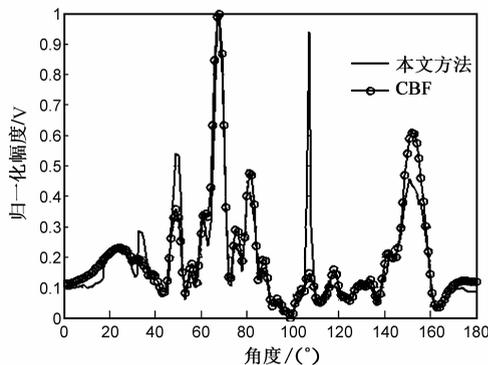


图6 空间谱( $t=1000\text{s}$ )

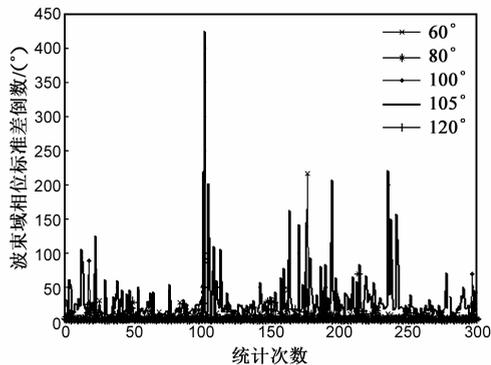


图7 波束域相位标准差倒数

由图4~6结果可知,相比常规波束形成,本文方法可有效检测到600s以后 $105^\circ$ 附近的的目标,而常规波束形成则不能很好地检测到600s以后 $105^\circ$ 附近的的目标;

且在 $t = 1000\text{s}$ 的数据段中,也很好显示出本文方法可有效检测到 $105^\circ$ 附近的的目标,常规波束形成则不能检测到 $105^\circ$ 附近的的目标.

图4~6所示结果可由图7解释,在大部分时间段内,105°对应的波束域相位标准差倒数大于其他方位对应的波束域相位标准差倒数,经式(12)理后,在所得空间谱中,105°对应的谱值相比其他方位对应的谱值被有效扩大.所以,可得在其他时间数据段中,本文方法相比常规波束形成可有效检测到105°目标.

海试数据理结果表明,本文方法可进一步提高常规波束形成对目标的检测性能.

#### 4 结论

理论推导了目标方位波束域相位主要由信号合成所得,受噪声影响较少,每次波束形成所得目标方位对应的相位相对于初始方位变化较小,波束域相位方差较小;非目标方位波束域相位主要由噪声合成所得,受噪声影响较大,每次波束形成所得非目标方位对应的相位都不一样,变化较大,波束域相位方差较大.依据理论推导结果,本文提出了一种基于波束域相位稳定性的目标检测方法,该方法利用波束域相位方差的倒数对空间谱的各个方位进行不等权值加权.相比常规波束形成,在无其他先验信息情况下,本文方法进一步增强了目标方位能量,抑制了非目标方位噪声干扰,改善了目标检测信噪比增益.低信噪比下,实现了对水下辐射噪声信号未知的目标检测.

同时,在本文仿真条件下,当输入平均谱级比为-20dB~-3dB时,本文方法所得目标检测正确概率高于常规波束形成所得目标检测正确概率.在该段海试数据处理结果中,本文方法相比常规波束形成,可实现对105°附近未知目标的有效检测.数值仿真和海试数据处理结果进一步验证了本文方法在水下辐射噪声信号未知的目标检测方面的有效性.

另外,当目标方位对应波束域相位受水声信道影响产生波动时,可对各方位波束域相位先进行差分对齐,然后求取相位差分对齐后的相位方差值,再采用式(12)实现对水下辐射噪声信号未知的目标检测.

**致谢** 感谢实验室课题组提供的宝贵试验数据,对参与2012年4月份试验的所有人员表示感谢.

#### 参考文献

- [1] Urick R J. Principles of Underwater Sound [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1983. 61-79.
- [2] Ross D. Mechanics of Underwater Noise [M]. New York: Pergamin Press, 1976. 83-89.
- [3] Crocker S E, Nieleesen P L, Miller J H, et al. Geoacoustic inversion of ship radiated noise in shallow water using data from a single hydrophone [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 136 (5): 362-368.
- [4] Megan F, Donald R, Sean M. Underwater radiated noise from modern commercial ships [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 131 (1): 92-103.
- [5] 李启虎,李敏,杨秀庭. 被动目标辐射噪声中单频信号分量的检测:理论分析 [J]. 声学学报, 2008, 33 (3): 193-196.  
Li Qi-hu, Li Min, Yang Xiu-ting. The detection of single frequency component of underwater radiated noise of target: theoretical analysis [J]. Aata Acustica, 2008, 33 (3): 193-196. (in Chinese)
- [6] 李启虎,李敏,杨秀庭. 被动目标辐射噪声中单频信号分量的检测:数值仿真 [J]. 声学学报, 2008, 33 (4): 289-293.  
Li Qi-hu, Li Min, Yang Xiu-ting. The detection of single frequency component of underwater radiated noise of target: digital simulation [J]. Aata Acustica, 2008, 33 (4): 289-293. (in Chinese)
- [7] 解恺,丁雪洁,孙贵青,等. 基于目标辐射噪声的信号起伏检测算法研究 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35(4): 844-851.  
Xie Kai, Ding Xue-jie, Sun Gui-qing, et al. The signal fluctuating detection algorithm based on the target radiated noise [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(4): 844-851. (in Chinese)
- [8] Venugopal S, Wagstaff R A, Sharma J P. Exploiting phase fluctuations to improve machine performance monitoring [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2007, 4(2): 153-166.
- [9] Wagstaff R A. Exploiting phase fluctuations to improve temporal coherence [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(2): 498-510.
- [10] 戴文舒,陈亚,陈新华,等. 差分二次平均修正的频域相位补偿线谱检测方法 [J]. 兵工学报, 2014, 35 (10): 1630-1637.  
Dai Wen-shu, Chen Ya, Chen Xin-hua, et al. An algorithm of line-spectrum detection using frequency domain phase compensation with difference and TPM technique [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(10): 1630-1637. (in Chinese)
- [11] 李辉,王岩飞. 正弦信号的直接FFT参数估计与相位差分法对比研究 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 544-547.  
Li Hui, Wang Yan-fei. The contrastive study between direct FFT and phase difference in parameter estimation of sinusoidal signal [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(3): 544-547. (in Chinese)
- [12] 郑恩明,余华兵,陈新华,等. 一种基于瞬时相位方差加权的线谱检测器 [J]. 电子与信息学报, 2015, 36 (7): 1763-1768.  
Zheng En-ming, Yu Hua-bing, Chen Xin-hua, et al. A weighted line spectrum detector based on instantaneous phase variance [J]. Journal of Electronics & Information

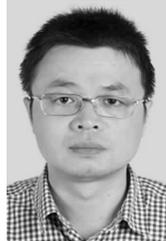
- Technology, 2015, 36(7): 1763 – 1768. (in Chinese)
- [13] Tucker J D, Azimi-Sadjadi M R. Coherence-based underwater target detection from multiple disparate sonar platforms[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011, 36(1): 37 – 51.
- [14] 吴国清, 王美刚, 陈耀明. 水声波导中包络线谱强度数值预报[J]. 声学学报, 2013, 37(4): 432 – 439.  
Wu Guo-qing, Wang Mei-gang, Chen Yao-ming. Numerical prediction of envelope line spectrum intensity in underwater acoustic waveguide[J]. Aata Acustica, 2013, 37(4): 432 – 439. (in Chinese)
- [15] 陈阳, 王自娟, 朱代柱, 等. 一种基于频率方差加权的线谱目标检测方法[J]. 声学学报, 2010, 35(1): 76 – 80.  
Chen Yang, Wang Zi-juan, Zhu Dai-zhu, et al. A detecting method for line-spectrum target based on variance of frequency weight[J]. Aata Acustica, 2010, 35(1): 76 – 80. (in Chinese)
- [16] 陈阳, 赵安邦, 王自娟, 等. 瞬时频率方差加权导向最小方差波束形成检测器[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(6): 730 – 735.  
Chen Yang, Zhao An-bang, Wang Zi-juan, et al. Variance of instantaneous frequency-weighted steered minimum variance beamforming detector[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(6): 730 – 735. (in Chinese)
- [17] 陈新华, 鲍习中, 李启虎, 等. 水下声信号未知频率的目标检测方法研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(4): 471 – 475.  
Chen Xin-hua, Bao Xi-zhong, Li Qi-hu, et al. Research on detection of underwater acoustic signal with unknown frequency[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(4): 471 – 475. (in Chinese)
- [18] 郑恩明, 陈新华, 孙长瑜. 基于幅值加权的未知线谱目标检测方法[J]. 振动与冲击, 2014, 33(16): 160 – 164.  
Zheng En-ming, Chen Xin-hua, Sun Chang-yu. Unknown target detection weighted method based on the amplitude[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(16): 160 – 164. (in Chinese)
- [19] 郑恩明, 陈新华, 孙长瑜. 基于频率方差加权的时延差估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(2): 224 – 229.  
Zheng En-ming, Chen Xin-hua, Sun Chang-yu. The time delay difference estimation weighted method based on frequency variance[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(2): 224 – 229. (in Chinese)
- [20] 郑恩明, 陈新华, 孙长瑜, 等. 基于时延差方差加权的时延差估计方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(6): 1362 – 1367.  
Zheng En-ming, Chen Xin-hua, Sun Chang-yu, et al. Weighted time delay difference estimation method based on its variance[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(6): 1362 – 1367. (in Chinese)
- [21] 郑恩明, 陈新华, 孙长瑜. 一种水下声信号未知频率的时延差估计方法[J]. 振动与冲击, 2014, 33(9): 190 – 194.  
Zheng En-ming, Chen Xin-hua, Sun Chang-yu. A time delay difference estimation method of underwater acoustic signal with unknown frequency[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(9): 190 – 194. (in Chinese)
- [22] Samuel D. Wideband robust capon beam-forming for passive sonar[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, 38(2): 308 – 322.
- [23] Hossain M S, Islam M R, Godara L C. Efficient robust broadband beamforming algorithms using variable loading[J]. IEEE Latin America Transactions, 2012, 10(3): 1697 – 1702.
- [24] Chen Y S, Qin G. A normalized beamforming algorithm for broadband speech using a continuous interleaved sampling strategy[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2013, 20(3): 868 – 874.

#### 作者简介



**郑恩明** 男, 1985年8月出生于河南省周口市. 现为中国科学院声学研究所助理研究员, 博士. 主要研究方向为阵列信号理、水下目标检测与定位.

E-mail: zhengeningioa@163.com



**陈新华** 男, 1978年7月出生于江苏省泰州市. 现为中国科学院声学研究所副研究员, 副主任. 在国内外发表学术论文20余篇. 主要研究方向为水声信号处理, 水声工程, 水下目标检测与定位.

E-mail: chenxinhua@mail.ioa.ac.cn



**李冰** 男, 1978年1月出生于湖北省建始县, 现为中国科学院声学研究所助理研究员, 主要研究方向水声通信.

E-mail: libingbj@163.com



**王麟煜** 男, 1972年8月出生于黑龙江省, 现为中国科学院声学研究所助理研究员. 主要研究方向为水声信号检测与理.

E-mail: wlyhyh@163.com