



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108225536 B

(45)授权公告日 2019.09.24

(21)申请号 201711452018.5

(22)申请日 2017.12.28

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 108225536 A

(43)申请公布日 2018.06.29

(73)专利权人 西北工业大学  
地址 710072 陕西省西安市友谊西路127号

(72)发明人 杨益新 杨龙 张亚豪

(74)专利代理机构 西北工业大学专利中心  
61204

代理人 王鲜凯

(51) Int. Cl.  
G01H 3/00(2006.01)

审查员 于龙

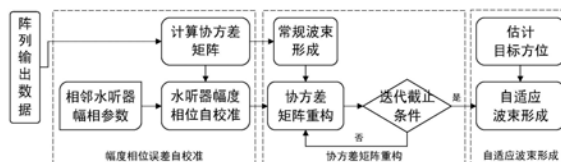
权利要求书2页 说明书6页 附图1页

(54)发明名称

基于水听器幅度与相位自校准的稳健自适应波束形成方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于水听器幅度与相位自校准的稳健自适应波束形成方法,计算水听器阵列的数据协方差矩阵,对水听器幅度相位误差自校准,重构协方差矩阵,形成自适应波束。在本发明在利用阵列自校准技术,实现阵元幅度相位误差校准的同时得到目标方位估计,进而重构出噪声干扰协方差矩阵,完成稳健自适应波束形成。解决了现有稳健波束形成方法仅对于轻微阵列流形失配效果明显,且性能会受人工参数选择的影响。对于固定安装的水听器阵列,其幅度和相位误差是导致阵列流形失配的问题,使得在严重幅度相位失配情况下的能够实现稳健自适应波束形成方法。



1. 一种基于水听器幅度与相位自校准的稳健自适应波束形成方法, 其特征在于: 阵元数为M的直线水听器阵列, 从阵列一端到另一端编号为1~M, 阵元间距为d, 总长度为d(M-1); 设阵列输出向量x(n)为 $x(n) = \text{diag}\{\gamma\}A(\theta)s(n) + e(n)$ ,  $1 \leq n \leq N$ , 式中: N是数据点数,  $s(n) = [s_1(n), \dots, s_K(n)]^T$ 为入射信号波形,  $e(n)$ 是阵元接收噪声,  $\gamma$ 表示水听器幅度相位参数向量, 该向量的第m个元素表示为 $\gamma_m = g_m e^{j\varphi_m}$ , m为阵元序号,  $g_m, \varphi_m$ 分别为m号水听器的幅度和相位,  $\text{diag}\{\}$ 表示向量对角化运算算子,  $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_K)]$ 是理想阵列流形矩阵; 所述方位角 $\theta_k$ 处的理想阵列流形向量 $a(\theta_k) = [1, \exp(-j2\pi f \tau_k), \dots, \exp\{-j2\pi f(M-1)\tau_k\}]^T$ , 其中: f为信号频率,  $\tau_k = d \cos \theta_k / c$ , d为阵元间距, c为声速, M为水听器个数; 自适应波束形成步骤如下:

步骤1: 计算水听器阵列输出向量的数据协方差矩阵为 $R = E\{x(n)x^H(n)\}$ , 其中E $\{\}$ 表示求数学期望, 上标H为共轭转置运算;

以采样协方差矩阵 $\hat{R}$ 近似表示数据协方差矩阵R, 即 $\hat{R} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)x^H(n)$ ; 计算采样协

方差矩阵 $\hat{R}$ 使用的快拍长度 $T = Nf_s$ , 其中 $f_s$ 为系统采样率;

步骤2、水听器幅度相位误差自校准:

阵列中相邻水听器, 序号分别为p和(p+1)已经精确校准, 幅度相位精确已知, 即 $\gamma_p = g_p e^{j\varphi_p}$ 和 $\gamma_{p+1} = g_{p+1} e^{j\varphi_{p+1}}$ ;

其中:  $1 \leq p \leq (M-1)$ ;  $g_p, g_{p+1}$ 分别为p和(p+1)号水听器精确幅度响应值,  $\varphi_p, \varphi_{p+1}$ 分别为p和(p+1)号水听器精确相位响应值;

计算水听器阵列中所有水听器幅度相位参数 $\hat{\gamma}_m$ 和 $\hat{\gamma}_{m+1}$ :

$$\hat{\gamma}_m = \frac{\hat{R}_{m,m+1}}{\gamma_{m+1}^* \hat{R}_{p,p+1}}, m = p-1, p-2, \dots, 1$$

$$\hat{\gamma}_{m+1} = \frac{\hat{R}_{m,m+1}^*}{\gamma_m^* \hat{R}_{p,p+1}}, m = p+1, p+2, \dots, M-1$$

得到水听器幅度相位校准参数 $\hat{\gamma} = [\hat{\gamma}_1, \dots, \hat{\gamma}_{p-1}, \gamma_p, \gamma_{p+1}, \hat{\gamma}_{p+2}, \dots, \hat{\gamma}_M]^T$

式中:  $\hat{R}_{m,m+1}$ 和 $\hat{R}_{p,p+1}$ 分别为采样协方差矩阵 $\hat{R}$ 的第(m, m+1)元素和第(p, p+1)元素;

步骤3、协方差矩阵重构:

直线型水听器阵列的空间观测范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ , 记为 $\Theta$ , 将观测空间离散化为 $\tilde{K}$ 个网格点, 则网格点的阵列流形矩阵表示为:

$$B(\Theta) = [b(\theta_1), b(\theta_2), \dots, b(\theta_{\tilde{K}})] = \text{diag}(\hat{\gamma})[a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_{\tilde{K}})]$$

其中:  $a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_{\tilde{K}})$ 表示 $\tilde{K}$ 个网格点的理想阵列流形向量

第k个网格点的输出功率 $\hat{p}_k$ 以及噪声功率 $\hat{\sigma}^2$ 通过循环的方式估计得到:

$$\hat{p}_k^{(i+1)} = \hat{p}_k^{(i)} \frac{\mathbf{b}^H(\theta_k) \mathbf{R}^{-1(i)} \hat{\mathbf{R}} \mathbf{R}^{-1(i)} \mathbf{b}(\theta_k)}{\mathbf{b}^H(\theta_k) \mathbf{R}^{-1(i)} \mathbf{b}(\theta_k)}, k = 1, 2, \dots, \tilde{K}$$

$$\hat{\sigma}^{2(i+1)} = \frac{\text{Tr}\{(\mathbf{R}^{-1(i)})^2 \hat{\mathbf{R}}\}}{\text{Tr}\{(\mathbf{R}^{-1(i)})^2\}}$$

$$\mathbf{R}^{(i+1)} = \mathbf{B}(\boldsymbol{\theta}) \hat{\mathbf{P}}^{(i+1)} \mathbf{B}^H(\boldsymbol{\theta}) + \hat{\sigma}^{2(i+1)} \mathbf{I}$$

式中： $\text{Tr}\{\}$ 表示矩阵求迹运算，上标(i)表示迭代次数， $\mathbf{R}^{(i)}$ 表示第i次迭代的重构协方差矩阵， $\mathbf{R}^{-1(i)}$ 表示第i次迭代的重构协方差矩阵的逆， $\hat{\sigma}^{2(i+1)}$ 表示第i+1次噪声功率；

步骤4、自适应波束形成：信号到达方位通过方位功率谱 $[\hat{p}_1^{(i)}, \hat{p}_2^{(i)}, \dots, \hat{p}_{\tilde{K}}^{(i)}]$ 的峰值搜索进行估计，记作 $\hat{\theta}_0$ ；利用Capon波束形成的权值计算公式，给出基于水听器幅度相位自校准的稳健自适应波束形成方法：

$$\mathbf{w} = \left\{ \mathbf{a}^H(\hat{\theta}_0) \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\gamma}}^*) \mathbf{R}_{rec} \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\gamma}}) \mathbf{a}(\hat{\theta}_0) \right\}^{-1} \mathbf{R}_{rec} \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\gamma}}) \mathbf{a}(\hat{\theta}_0)。$$

## 基于水听器幅度与相位自校准的稳健自适应波束形成方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于阵列信号处理和水声探测等领域,涉及一种基于水听器幅度与相位自校准的稳健自适应波束形成方法,利用阵列自校准技术,实现阵元幅度相位误差校准的同时得到目标方位估计,进而重构出噪声干扰协方差矩阵,完成稳健自适应波束形成设计。

### 背景技术

[0002] 波束形成技术通常是对空间分布的传感器阵列所采集的场信息进行线性加权求和处理,从而得到空间某一方位的波束输出。因此,波束形成器又被理解为空域滤波器,在声纳、雷达等领域得到广泛的应用。由于使用压电陶瓷的设计工艺,水听器阵列阵元间的幅度和相位差异较大,这种差异性会导致阵列流形失配,从而严重影响波束形成算法性能。

[0003] 自适应波束形成器可以在干扰方位自适应产生凹槽,从而提高信干噪比(SINR, Signal to interference and noise ratio)。提高波束形成干扰抑制能力的一种有效措施是采用自适应波束形成技术,其中最为典型的是Capon于1969年提出的最小方差无失真响应(MVDR:Minimum variance Distortionless Response Beamforming)波束形成技术。它在保持波束指向方向信号无失真的条件下,通过使基阵输出功率最小来实现对干扰的有效抑制,具有较好的方位分辨能力和较强的干扰抑制能力。然而,MVDR波束形成方法的稳健性较差,当出现阵列流形误差时,其波束形成性能会急剧下降。

[0004] 在被动声纳中,导致阵列流形误差的因素很多,主要包括:波达角(AOA, Angle-of-Arrival)误差、阵形校准误差和平面波假设的失配等。波达角误差主要有粗糙的空间扫描网格或者方位估计误差引起,导致假设的波达角与真实波达角存在误差;阵形校准误差主要是由传感器的幅频响应或相频响应的差异,传感器之间的耦合效应以及传感器位置误差引起;此外有限快拍数下协方差矩阵估计误差和阵列流形误差有着密切关系,采样协方差矩阵和真实协方差矩阵之间的估计误差可以等效成阵列流形误差。为了减小MVDR波束形成器对各种误差失配引起的性能下降,近四十年来大量的相关算法被提出。

[0005] 对角加载方法是一种最常见的提高MVDR波束形成器稳健性的方法,Cox等人(H Cox,R M Zeskind,M M Owen. Robust adaptive beamforming[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech&Signal Processing,1987,35(10):1365-1376.)最早通过增加白噪声增益的方法推导出对角加载算法的表达式,从而提高MVDR波束形成器对阵列流形误差的稳健性。并且白噪声增益约束方法和加权值范数约束方法是等效的。但是由于很难给出合适的对角加载量的取值,降低了对角加载算法的实用性。2003年Li等人(J Li,P Stoica,Z Wang. On robust Capon beamforming and diagonal loading[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2003,51(7):1702-1715.)利用协方差矩阵拟合方法,通过限制阵列流形误差在一个给定的不确定集范围内,推导出一种稳健的Capon波束形成方法(RCB, Robust Capon Beamforming),并且该方法被证明等效为对角加载算法。阵列流形不确定集上限取值具有明确物理意义,较对角加载算法中对角加载量的选择更加容易。Somasundaram将RCB算法应用于被动声纳的信号分析,得到更加稳健的时间方位历程(S D Somasundaram,N H

Parsons.Evaluation of robust Capon beamforming for passive sonar[J].IEEE Journal of Oceanic Engineering,2011,36(4):686-695.)。然而不确定集上限仍然是一个人工参数,它的选取仍会直接影响算法的性能。

[0006] 现有稳健波束形成方法仅对于轻微阵列流形失配效果明显,且性能会受人工参数选择的影响。对于固定安装的水听器阵列,其幅度和相位误差是导致阵列流形失配的主要因素,因此亟需给出一种严重幅度相位失配情况下的稳健自适应波束形成方法。

## 发明内容

[0007] 要解决的技术问题

[0008] 为了避免现有技术的不足之处,本发明提出一种基于水听器幅度与相位自校准的稳健自适应波束形成方法,针对水听器阵列存在严重的阵元幅度相位失配情况,利用阵列自校准技术,实现阵元幅度相位误差校准的同时得到目标方位估计,进而重构出噪声干扰协方差矩阵,完成稳健自适应波束形成设计。

[0009] 技术方案

[0010] 一种基于水听器幅度与相位自校准的稳健自适应波束形成方法,其特征在于:阵元数为M的直线水听器阵列,从阵列一端到另一端编号为1~M,阵元间距为d,总长度为d(M-1);设阵列输出向量x(n)为 $x(n) = \text{diag}\{\gamma\}A(\theta)s(n) + e(n)$ ,  $1 \leq n \leq N$ ,式中:N是数据点数,s(n)=[s<sub>1</sub>(n),...,s<sub>K</sub>(n)]<sup>T</sup>为入射信号波形,e(n)是阵元接收噪声,γ表示水听器幅度相位参数向量,该向量的第m个元素表示为 $\gamma_m = g_m e^{j\varphi_m}$ ,m为阵元序号,g<sub>m</sub>,φ<sub>m</sub>分别为m号水听器的幅度和相位,diag{ }表示向量对角化运算算子,A=[a(θ<sub>1</sub>),...,a(θ<sub>K</sub>)]是理想阵列流形矩阵;所述方位角θ<sub>k</sub>处的理想阵列流形向量 $a(\theta_k) = [1, \exp(-j2\pi f \tau_k), \dots, \exp\{-j2\pi f(M-1)\tau_k\}]^T$ ,其中:f为信号频率,τ<sub>k</sub>=dcosθ<sub>k</sub>/c,d为阵元间距,c为声速,M为水听器个数;自适应波束形成步骤如下:

[0011] 步骤1:计算水听器阵列输出向量的数据协方差矩阵为 $R = E\{x(n)x^H(n)\}$ ,其中E{ }表示求数学期望,上标H为共轭转置运算;

[0012] 以采样协方差矩阵 $\hat{R}$ 近似表示数据协方差矩阵R,即 $\hat{R} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)x^H(n)$ ;计算采

样协方差矩阵 $\hat{R}$ 使用的快拍长度T=Nf<sub>s</sub>,其中f<sub>s</sub>为系统采样率;

[0013] 步骤2、水听器幅度相位误差自校准:

[0014] 阵列中相邻水听器,序号分别为p和(p+1)已经精确校准,幅度相位精确已知,即

$$\gamma_p = g_p e^{j\varphi_p} \text{ 和 } \gamma_{p+1} = g_{p+1} e^{j\varphi_{p+1}};$$

[0015] 其中: $1 \leq p \leq (M-1)$ ;g<sub>p</sub>,g<sub>p+1</sub>分别为p和(p+1)号水听器精确幅度响应值,φ<sub>p</sub>,φ<sub>p+1</sub>分别为p和(p+1)号水听器精确相位响应值;

[0016] 计算水听器阵列中所有水听器幅度相位参数 $\hat{\gamma}_m$ 和 $\hat{\gamma}_{m+1}$ :

$$[0017] \quad \hat{\gamma}_m = \frac{\hat{R}_{m,m+1}}{\gamma_{m+1}^* \hat{R}_{p,p+1}}, m = p-1, p-2, \dots, 1$$

$$[0018] \quad \hat{\gamma}_{m+1} = \frac{\hat{\mathbf{R}}_{m,m+1}^*}{\gamma_m^* \hat{\mathbf{R}}_{p,p+1}^*}, m = p+1, p+2, \dots, M-1$$

[0019] 得到水听器幅度相位校准参数  $\hat{\boldsymbol{\gamma}} = [\hat{\gamma}_1, \dots, \hat{\gamma}_{p-1}, \gamma_p, \gamma_{p+1}, \hat{\gamma}_{p+2}, \dots, \hat{\gamma}_M]^T$

[0020] 式中:  $\hat{\mathbf{R}}_{m,m+1}$  和  $\hat{\mathbf{R}}_{p,p+1}$  分别为采样协方差矩阵  $\hat{\mathbf{R}}$  的第  $(m, m+1)$  元素和第  $(p, p+1)$  元素;

[0021] 步骤3、协方差矩阵重构:

[0022] 直线型水听器阵列的空间观测范围为  $0^\circ \sim 180^\circ$ , 记为  $\Theta$ , 将观测空间离散化为  $\tilde{K}$  个网格点, 则网格点的阵列流形矩阵表示为:

$$[0023] \quad \mathbf{B}(\Theta) = [\mathbf{b}(\theta_1), \mathbf{b}(\theta_2), \dots, \mathbf{b}(\theta_{\tilde{K}})] = \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\gamma}}) [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_{\tilde{K}})]$$

[0024] 其中:  $\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_{\tilde{K}})$  表示  $\tilde{K}$  个网格点的理想阵列流形向量

[0025] 第  $k$  个网格点的输出功率  $\hat{p}_k$  以及噪声功率  $\hat{\sigma}^2$  通过循环的方式估计得到:

$$[0026] \quad \hat{p}_k^{(i+1)} = \hat{p}_k^{(i)} \frac{\mathbf{b}^H(\theta_k) \mathbf{R}^{-1(i)} \hat{\mathbf{R}} \mathbf{R}^{-1(i)} \mathbf{b}(\theta_k)}{\mathbf{b}^H(\theta_k) \mathbf{R}^{-1(i)} \mathbf{b}(\theta_k)}, k = 1, 2, \dots, \tilde{K}$$

$$[0027] \quad \hat{\sigma}^{2(i+1)} = \frac{\text{Tr}\{(\mathbf{R}^{-1(i)})^2 \hat{\mathbf{R}}\}}{\text{Tr}\{(\mathbf{R}^{-1(i)})^2\}}$$

$$[0028] \quad \mathbf{R}^{(i+1)} = \mathbf{B}(\Theta) \hat{\mathbf{P}}^{(i+1)} \mathbf{B}^H(\Theta) + \hat{\sigma}^{2(i+1)} \mathbf{I}$$

[0029] 式中:  $\text{Tr}\{\}$  表示矩阵求迹运算, 上标  $(i)$  表示迭代次数,  $\mathbf{R}^{(i)}$  表示第  $i$  次迭代的重构协方差矩阵,  $\mathbf{R}^{-1(i)}$  表示第  $i$  次迭代的重构协方差矩阵的逆,  $\hat{\sigma}^{2(i+1)}$  表示第  $i+1$  次噪声功率;

[0030] 步骤4、自适应波束形成: 信号到达方位通过方位功率谱  $[\hat{p}_1^{(i)}, \hat{p}_2^{(i)}, \dots, \hat{p}_{\tilde{K}}^{(i)}]$  的峰值搜索进行估计, 记作  $\hat{\theta}_0$ ; 利用Capon波束形成的权值计算公式, 给出基于水听器幅度相位自校准的稳健自适应波束形成方法:

$$[0031] \quad \mathbf{w} = \left\{ \mathbf{a}^H(\hat{\theta}_0) \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\gamma}}^*) \mathbf{R}_{rec} \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\gamma}}) \mathbf{a}(\hat{\theta}_0) \right\}^{-1} \mathbf{R}_{rec} \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\gamma}}) \mathbf{a}(\hat{\theta}_0)。$$

[0032] 有益效果

[0033] 本发明提出的一种基于水听器幅度与相位自校准的稳健自适应波束形成方法, 计算水听器阵列的数据协方差矩阵, 对水听器幅度相位误差自校准, 重构协方差矩阵, 形成自适应波束。在本发明在利用阵列自校准技术, 实现阵元幅度相位误差校准的同时得到目标方位估计, 进而重构出噪声干扰协方差矩阵, 完成稳健自适应波束形成。解决了现有稳健波束形成方法仅对于轻微阵列流形失配效果明显, 且性能会受人工参数选择的影响。对于固定安装的水听器阵列, 其幅度和相位误差是导致阵列流形失配的问题, 使得在严重幅度相位失配情况下的能够实现稳健自适应波束形成方法。

## 附图说明

[0034] 图1: 基于水听器幅度与相位自校准的稳健自适应波束形成方法流程框图。

[0035] 图2: 基于水听器幅度相位自校准的稳健自适应波束形成波束图

### 具体实施方式

[0036] 现结合实施例、附图对本发明作进一步描述：

[0037] 布置一条水平放置于水下的直线水听器基阵，阵元数为M，阵元间距为d。从阵列一端到另一端编号为1~M，阵元间距可以选取为d，此时阵列的总长度为d(M-1)。

[0038] 设阵列输出向量x(n)表示为 $x(n) = \text{diag}\{\gamma\}A(\theta)s(n) + e(n)$ ， $1 \leq n \leq N$ ，式中，N是数据点数， $s(n) = [s_1(n), \dots, s_K(n)]^T$ 为入射信号波形，e(n)是阵元接收噪声， $\gamma$ 表示水听器幅度相位参数向量，该向量的第m个元素可以表示为 $\gamma_m = g_m e^{j\varphi_m}$ ，m为阵元序号， $g_m, \varphi_m$ 分别为m号水听器的幅度和相位，diag{}表示向量对角化运算算子， $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_K)]$ 是理想阵列流形矩阵，对于均匀直线阵，方位角 $\theta_k$ 处的理想阵列流形向量 $a(\theta_k) = [1, \exp(-j2\pi f \tau_k), \dots, \exp(-j2\pi f (M-1) \tau_k)]^T$ ，其中f为信号频率， $\tau_k = d \cos \theta_k / c$ ，d为阵元间距，c为声速，M为水听器个数。

[0039] 步骤1：利用该阵列接收和记录水声信号，得到阵列输出数据矩阵 $X = [x(1), \dots, x(N)]$ ，其中N是每个通道每次需处理的数据点数，x(n)为阵列输出向量，计算阵列输出协方差矩阵为 $\hat{R} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)x^H(n)$ 。

[0040] 数据协方差矩阵中： $E\{\}$ 表示求数学期望，上标H为共轭转置运算。实际应用中使用采样协方差矩阵 $\hat{R}$ 近似表示数据协方差矩阵R，即 $\hat{R} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)x^H(n)$ 。计算采样协方差矩阵 $\hat{R}$ 使用的快拍长度 $T = Nf_s$ ，其中 $f_s$ 为系统采样率。

[0041] 步骤2：水听器幅度相位误差自校准：

[0042] 首先假设阵列中相邻水听器（其序号分别为p和(p+1)， $1 \leq p \leq (M-1)$ ）已经精确校准，即其幅度相位精确已知，即 $\gamma_p = g_p e^{j\varphi_p}$ 和 $\gamma_{p+1} = g_{p+1} e^{j\varphi_{p+1}}$ ，其中 $g_p, g_{p+1}$ 分别为p和(p+1)号水听器精确幅度响应值， $\varphi_p, \varphi_{p+1}$ 分别为p和(p+1)号水听器精确相位响应值。

[0043] 理想阵列流形矩阵A(θ)具有Vandermonde矩阵结构，即 $A(\theta)_{m,k} = a^{m-1}(\theta_k)$ ，其中 $a(\theta_k) = e^{-j2\pi f d \cos \theta_k / c}$ ，f为信号频率，d为阵元间距，c为声速， $\theta_k$ 为第k个信号方位。阵列输出协方差矩阵的第(m,n)个元素 $R_{m,n}$ 可以表示为：

$$[0044] \quad R_{m,n} = \begin{cases} \gamma_m \gamma_n^* \sum_{k=1}^K p_k a^{m-n}(\theta_k), m \neq n \\ \gamma_m \gamma_n^* \sum_{k=1}^K p_k a^{m-n}(\theta_k) + \sigma^2, m = n \end{cases}$$

[0045] 式中\*表示共轭运算。当 $n = m+1$ 时，

[0046] 其他水听器幅度相位参数 $\hat{\gamma}_m$ 和 $\hat{\gamma}_{m+1}$ 可估计为：

$$[0047] \quad \hat{\gamma}_m = \frac{\hat{R}_{m,m+1}}{\gamma_{m+1}^* \hat{R}_{p,p+1}}, m = p-1, p-2, \dots, 1$$

$$[0048] \quad \hat{\gamma}_{m+1} = \frac{\hat{R}_{m,m+1}^*}{\gamma_m^* \hat{R}_{p,p+1}^*}, m = p+1, p+2, \dots, M-1$$

[0049] 式中  $\hat{R}_{m,m+1}$  和  $\hat{R}_{p,p+1}$  分别为采样协方差矩阵  $\hat{R}$  的第  $(m, m+1)$  元素和第  $(p, p+1)$  元素。

从而计算出水听器幅度相位校准参数  $\hat{\gamma} = [\hat{\gamma}_1, \dots, \hat{\gamma}_{p-1}, \gamma_p, \gamma_{p+1}, \hat{\gamma}_{p+2}, \dots, \hat{\gamma}_M]^T$ 。

[0050] 步骤3、协方差矩阵重构：

[0051] 协方差矩阵重构迭代初值选取。水听器线阵的空间观测范围为  $0^\circ \sim 180^\circ$ ，记为  $\Theta$ ，将观测空间离散化为  $\tilde{K}$  个网格点。计算常规波束形成方位谱图，即

$\hat{P}_{CBF}^{(0)}(\theta_k) = \mathbf{a}^H(\theta_k) \hat{R} \mathbf{a}(\theta_k)$ ,  $1 \leq k \leq \tilde{K}$ ，即迭代初值为  $\hat{\mathbf{P}}^{(0)} = \text{diag}\{\hat{P}_{CBF}^{(0)}(\theta_1), \hat{P}_{CBF}^{(0)}(\theta_2), \dots, \hat{P}_{CBF}^{(0)}(\theta_{\tilde{K}})\}$ ，其中  $\text{diag}\{\}$  为向量对角化运算。

[0052] 直线型水听器阵列的空间观测范围为  $0^\circ \sim 180^\circ$ ，记为  $\Theta$ ，将观测空间离散化为  $\tilde{K}$  个网格点。考虑已经校准的幅度相位误差参数  $\hat{\gamma}$ ，则网格点的阵列流形矩阵可以表示为

$$[0053] \quad \mathbf{B}(\Theta) = [\mathbf{b}(\theta_1), \mathbf{b}(\theta_2), \dots, \mathbf{b}(\theta_{\tilde{K}})] = \text{diag}(\hat{\gamma})[\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_{\tilde{K}})]$$

[0054]  $\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_{\tilde{K}})$  表示  $\tilde{K}$  个网格点的理想阵列流形向量。对于直线阵， $\mathbf{a}(\theta_k) = [1, \exp(-j2\pi f \tau_k), \dots, \exp\{-j2\pi f (M-1) \tau_k\}]^T$ ，其中  $f$  为信号频率， $\tau_k = d \cos \theta_k / c$ ， $d$  为阵元间距， $c$  为声速。

[0055] 随后，第  $k$  个网格点的输出功率  $\hat{p}_k$  以及噪声功率  $\hat{\sigma}^2$  可以通过循环的方式估计得到，即

$$[0056] \quad \hat{p}_k^{(i+1)} = \hat{p}_k^{(i)} \frac{\mathbf{b}^H(\theta_k) \mathbf{R}^{-1(i)} \hat{R} \mathbf{R}^{-1(i)} \mathbf{b}(\theta_k)}{\mathbf{b}^H(\theta_k) \mathbf{R}^{-1(i)} \mathbf{b}(\theta_k)}, k = 1, 2, \dots, \tilde{K}$$

$$[0057] \quad \hat{\sigma}^{2(i+1)} = \frac{\text{Tr}\{(\mathbf{R}^{-1(i)})^2 \hat{R}\}}{\text{Tr}\{(\mathbf{R}^{-1(i)})^2\}}$$

$$[0058] \quad \mathbf{R}^{(i+1)} = \mathbf{B}(\Theta) \hat{\mathbf{P}}^{(i+1)} \mathbf{B}^H(\Theta) + \hat{\sigma}^{2(i+1)} \mathbf{I}$$

[0059] 式中  $\text{Tr}\{\}$  表示矩阵求迹运算，上标  $(i)$  表示迭代次数， $\mathbf{R}^{(i)}$  表示第  $i$  次迭代的重构协方差矩阵， $\mathbf{R}^{-1(i)}$  表示第  $i$  次迭代的重构协方差矩阵的逆， $\hat{\sigma}^{2(i+1)}$  表示第  $i+1$  次噪声功率，幅相误差校准的阵列流形向量  $\mathbf{b}(\theta_k) = \text{diag}\{\hat{\gamma}\} \mathbf{a}(\theta_k)$ 。

[0060] 协方差矩阵重构迭代截至条件。迭代截至条件为  $|\hat{p}_k^{(i+1)} - \hat{p}_k^{(i)}| < \varepsilon$ ，综合考虑计算量和迭代精度， $\varepsilon = 0.1\%$ 。设迭代截至时迭代次数为  $I$ ，即重构的协方差矩阵为  $\mathbf{R}^{(I)} = \mathbf{B}(\Theta) \hat{\mathbf{P}}^{(I)} \mathbf{B}^H(\Theta) + \sigma^{2(I)} \mathbf{I}$ ，为了方便记为  $\mathbf{R}_{\text{rec}}$ 。

[0061] 步骤4、自适应波束形成：

[0062] 信号到达方位可以通过方位功率谱  $[\hat{p}_1^{(i)}, \hat{p}_2^{(i)}, \dots, \hat{p}_{\tilde{K}}^{(i)}]$  的峰值搜索进行估计，记作  $\hat{\theta}_0$ 。利用Capon波束形成的权值计算公式，可以给出基于水听器幅度相位自校准的稳健自适应



应波束形成方法：

$$[0063] \quad \mathbf{w} = \left\{ \mathbf{a}^H(\hat{\theta}_0) \text{diag}(\hat{\gamma}^*) \mathbf{R}_{rec} \text{diag}(\hat{\gamma}) \mathbf{a}(\hat{\theta}_0) \right\}^{-1} \mathbf{R}_{rec} \text{diag}(\hat{\gamma}) \mathbf{a}(\hat{\theta}_0)。$$

[0064] 具体实施例中：使用一条10个阵元的水听器阵列，阵元间距为半波长，两个窄带不相关干扰从80°和100°方位到达阵列，期望信号从50°入射。第3和第4号阵元为已经精确校准阵元，水听器的幅度和相位随机产生，其中幅度参数为0.5~1.5上的均匀分布，相位参数为 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 上均匀分布，即 $g_m \sim U[0.5, 1.5]$ ， $\phi_m \sim U[-\pi/2, \pi/2]$ 。干噪比为20dB，信噪比为5dB，快拍数为200。图2给出了利用本发明给出的基于水听器幅度相位自校准的稳健自适应波束形成方法的波束图，在保持50°信号方位形成波束主瓣条件下，对于80°和100°方位的干扰，均能准确产生凹槽，从而提高波束输出的信干噪比，实现水听器严重幅度相位失配情况下的稳健自适应波束形成设计。表1为幅度与相位误差自校准估计值。

[0065] 表1幅度与相位误差自校准参数估计值列表

[0066]

水听器编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
真实相位值	-0.8193	0.0907	0	0	-0.3973	1.0346	-0.2410	-0.6475	0.3773	1.4040
估计相位值	-0.7434	0.1480	0	0	-0.4320	0.9540	-0.3447	-0.7939	0.2282	1.2076
真实幅度值	1.2627	1.0049	1	1	1.1500	0.5921	1.4454	0.8475	0.6365	0.8461
估计幅度值	1.2861	1.0004	1	1	1.3246	0.6192	1.5264	0.8209	0.6242	0.9409

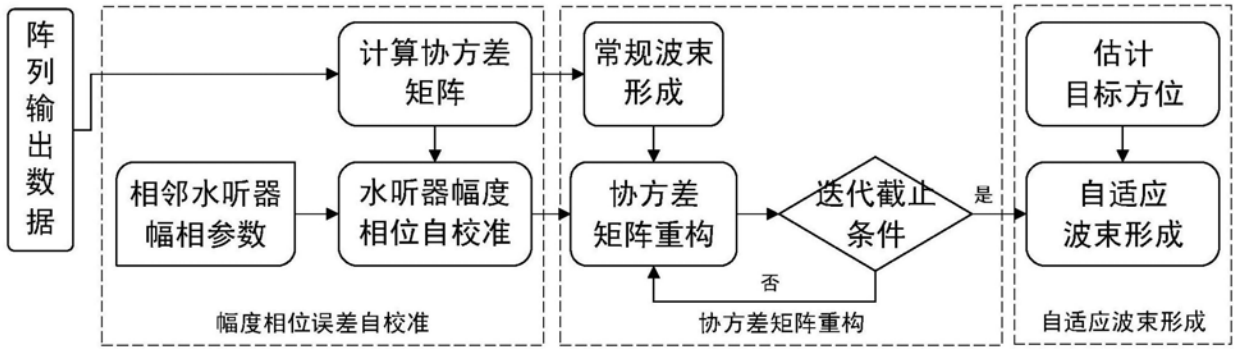


图1

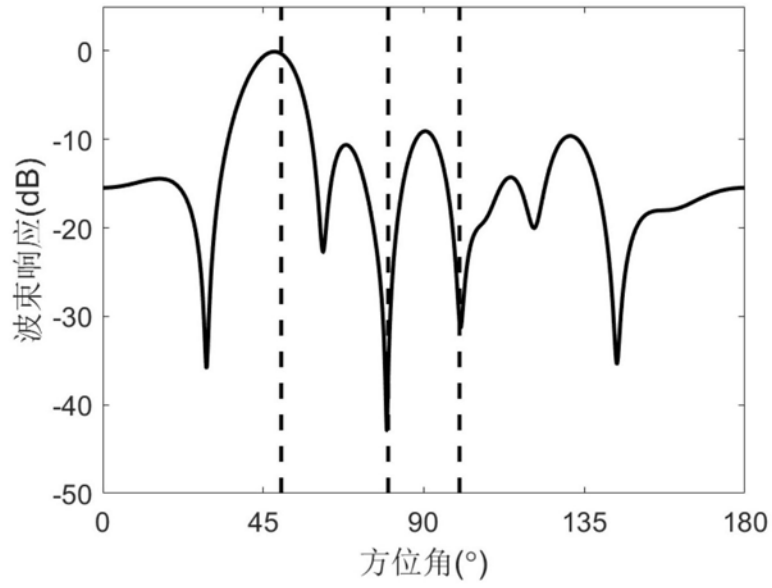


图2