



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112230226 B

(45) 授权公告日 2022. 12. 27

(21) 申请号 202011009033.4

G01S 7/52 (2006.01)

(22) 申请日 2020.09.23

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 111123273 A, 2020.05.08

申请公布号 CN 112230226 A

CN 106788653 A, 2017.05.31

CN 111651719 A, 2020.09.11

(43) 申请公布日 2021.01.15

CN 109490819 A, 2019.03.19

(73) 专利权人 浙江大学

US 2010142781 A1, 2010.06.10

地址 310013 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

CN 107340499 A, 2017.11.10

(72) 发明人 陈耀武 林振伟 刘雪松 蒋荣欣

张赫等. 一种强干扰环境下的离格稀疏贝叶斯DOA估计方法.《数据采集与处理》.2019, (第06期),

(74) 专利代理机构 杭州天勤知识产权代理有限公司 33224

审查员 赵雅琴

专利代理师 曹兆霞

(51) Int. Cl.

G01S 15/89 (2006.01)

G01S 7/539 (2006.01)

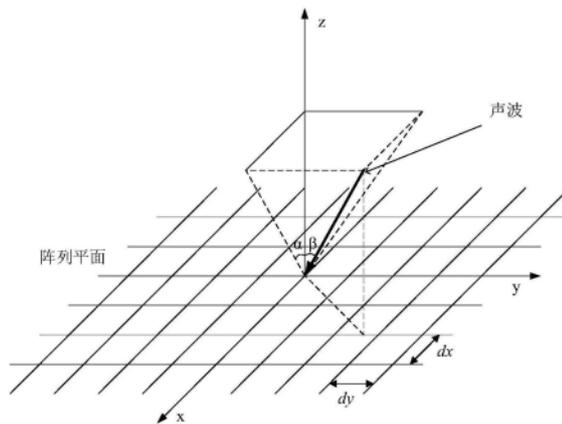
权利要求书3页 说明书6页 附图3页

(54) 发明名称

基于贝叶斯压缩感知算法的自适应波束形成器设计方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于贝叶斯压缩感知算法的自适应波束形成器设计方法,包括:(1) 平面阵列阵元接收声波入射信号,所述声波入射信号包含目标信号和干扰信号,基于声波入射信号构建自适应波束形成器,采用贝叶斯压缩感知算法对声波入射信号进行波达方向估计;(2) 根据干扰信号的波达方向和入声波入射信号的Capon空间谱重构得到干扰加噪声协方差矩阵;(3) 定义最大旁瓣水平约束值,并根据最大旁瓣水平约束值对目标波束图的旁瓣进行约束,同时根据干扰加噪声协方差矩阵通过凸优化方法计算自适应波束形成器的阵元权重系数。具有更大的输出信噪比。



1. 一种基于贝叶斯压缩感知算法的自适应波束形成器设计方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

(1) 平面阵列阵元接收声波入射信号, 所述声波入射信号包含目标信号和干扰信号, 基于声波入射信号构建自适应波束形成器, 其中, 接收的声波入射信号表示为:

$$\mathbf{X}(k) = \sum_{l=0}^L \mathbf{a}(\alpha_l, \beta_l) s_l(k) + \mathbf{n}(k) = \Phi \mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (1)$$

其中, k 表示采样快拍数, $\mathbf{X}(k)$ 表示采样快拍数为 k 时接收的声波入射信号, $\mathbf{n}(k)$ 表示高斯噪声向量, $\mathbf{s}(k) = [s_1(k), 1=0, 1, 2, \dots, L]^T$ 表示 $L+1$ 个方向的入射信号源, l 表示入射方向的索引, 当 $l=0$ 时, (α_1, β_1) 表示目标信号的入射方向, 当 $l=1, 2, \dots, L$ 时, (α_l, β_l) 表示干扰信号的入射方向, $\mathbf{a}(\alpha_l, \beta_l)$ 表示入射方向为 (α_l, β_l) 的阵列流形矢量, $\Phi = [\mathbf{a}(\alpha_l, \beta_l), l=0, 1, 2, \dots, L]$ 表示阵列流形矩阵, 具体表示如下:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \exp(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_1 u_0 + y_1 v_0)) & \cdots & \exp(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_1 u_L + y_1 v_L)) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_N u_0 + y_N v_0)) & \cdots & \exp(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_N u_L + y_N v_L)) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, λ 为波长, x_n, y_n 表示第 n 个阵元的位置, $n=1, 2, \dots, N, N$ 为自然数, $u_l = \sin \alpha_l, v_l = \sin \beta_l, l=0, 1, 2, \dots, L, L$ 为自然数;

基于声波入射信号构建自适应波束形成器表示为:

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{w}^H \mathbf{X}(k) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{Y}(k)$ 表示自适应波束形成器的输出, $\mathbf{w}^H \in \mathbb{C}^N$ 表示阵元权重系数, 上标 H 表示赫尔米特转置;

采用贝叶斯压缩感知算法对声波入射信号进行波达方向估计, 采用贝叶斯压缩感知算法对声波入射信号进行波达方向估计时, 令候选的信号方向数量为 M , 则候选信号源表示为 $\bar{\mathbf{s}}(k) = [\bar{s}_1(k), \bar{s}_2(k), \dots, \bar{s}_M(k)]^T$, 则阵元接收到的声波入射信号改写为:

$$\bar{\mathbf{X}}(k) = \bar{\Phi} \bar{\mathbf{s}}(k) + \bar{\mathbf{n}}(k) \quad (4)$$

其中, $\bar{\mathbf{X}}(k)$ 表示改写的声波入射信号, $\bar{\mathbf{n}}(k)$ 表示噪声向量, $\bar{\mathbf{s}}(k)$ 表示候选信号源向量, 阵列流形矩阵 $\bar{\Phi}$ 如下所示:

$$\bar{\Phi} = \begin{bmatrix} \exp(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_1 u_1 + y_1 v_1)) & \cdots & \exp(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_1 u_M + y_1 v_M)) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_N u_1 + y_N v_1)) & \cdots & \exp(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_N u_M + y_N v_M)) \end{bmatrix} \quad (5)$$

则波达方向估计问题转化为如下所示:

$$\bar{s}_Q(k) = \arg(\max [P(\bar{s}_Q(k) | \bar{\mathbf{X}}_Q(k))]) \quad Q=R, I \quad (6)$$

其中, $Q=R, I, \bar{s}_R(k)$ 和 $\bar{s}_I(k)$ 分别表示候选信号源 $\bar{\mathbf{s}}_Q(k)$ 的实部和虚部, $P(\bar{s}_Q(k) | \bar{\mathbf{X}}_Q(k))$ 表示后验概率, 则 $\bar{\mathbf{X}}_Q(k)$ 为:

$$\bar{\mathbf{X}}_R(k) = \begin{bmatrix} \bar{\Phi}_R \\ \bar{\Phi}_I \end{bmatrix} \bar{\mathbf{s}}_R(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_R(k) = \boldsymbol{\Omega}_R \bar{\mathbf{s}}_R(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_R(k) \quad (7)$$

$$\bar{\mathbf{X}}_I(k) = \begin{bmatrix} -\bar{\Phi}_I \\ \bar{\Phi}_R \end{bmatrix} \bar{\mathbf{s}}_I(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_I(k) = \boldsymbol{\Omega}_I \bar{\mathbf{s}}_I(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_I(k) \quad (8)$$

$$\bar{\mathbf{X}}_R(k) + \bar{\mathbf{X}}_I(k) = \begin{bmatrix} R(\bar{\mathbf{X}}(k)) \\ I(\bar{\mathbf{X}}(k)) \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_R(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_I(k) = \begin{bmatrix} R(\boldsymbol{\varepsilon}(k)) \\ I(\boldsymbol{\varepsilon}(k)) \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $R(\cdot)$ 表示取实部, $I(\cdot)$ 表示取虚部, $\varepsilon(k)$ 为保真度系数, 表示信号DOA估计的精度, $\boldsymbol{\Omega}_R = \begin{bmatrix} \bar{\Phi}_R \\ \bar{\Phi}_I \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{\Omega}_I = \begin{bmatrix} -\bar{\Phi}_I \\ \bar{\Phi}_R \end{bmatrix}$, 后验概率 $P(\bar{\mathbf{s}}_Q(k) | \bar{\mathbf{X}}_Q(k))$ 引入超参数 $\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q \in \mathbb{R}^{2M}$ 转化为:

$$P(\bar{\mathbf{s}}_Q(k) | \bar{\mathbf{X}}_Q(k)) = \int P(\bar{\mathbf{s}}_Q(k) | \bar{\mathbf{X}}_Q(k), \bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q) P(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q | \bar{\mathbf{X}}_Q(k)) d\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q \quad Q = R, I \quad (10)$$

其中, $Q=R, I, R, I$ 分别表示实部和虚部, 超参数 $\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q$ 的值由求解其最大似然函数得到, 如下所示:

$$L(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q) = -\frac{1}{2} \sum_Q \{ \log | \mathbf{I} + \boldsymbol{\Omega}_Q [\text{diag}(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q)]^{-1} \boldsymbol{\Omega}_Q^T | + (M + 2a) \log [\bar{\mathbf{X}}_Q(k)^T (\mathbf{I} + \boldsymbol{\Omega}_Q [\text{diag}(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q)]^{-1} \boldsymbol{\Omega}_Q^T) \bar{\mathbf{X}}_Q(k) + 2b] \} \quad (11)$$

其中, $Q=R, I, a, b$ 为用户自定义比例控制参数, $\text{diag}(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q)$ 表示以 $\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q$ 为对角元素的对角矩阵, 上标T表示矩阵的转置; 则声波入射信号的DOA估计通过下式求得:

$$\bar{\mathbf{s}}_Q(k) = (\text{diag}(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q) + \boldsymbol{\Omega}_Q^T \boldsymbol{\Omega}_Q)^{-1} \boldsymbol{\Omega}_Q^T \bar{\mathbf{X}}_Q(k) \quad Q = R, I \quad (12)$$

$\bar{\mathbf{X}}_Q(k)$ 具有K个采样点, 通过多任务贝叶斯压缩感知算法进行波达方向估计时, 通过共享相同的超参数和观测矩阵来关联K个采样点, 所以公式(12)中的波达方向估计写成:

$$\bar{\mathbf{s}}_Q = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\text{diag}(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q) + \boldsymbol{\Omega}_Q^T \boldsymbol{\Omega}_Q)^{-1} \boldsymbol{\Omega}_Q^T \bar{\mathbf{X}}_Q(k) \quad Q = R, I \quad (13)$$

当入射方向索引 $l=0$ 时, 根据公式(13)得到目标信号的波达方向, 当入射方向索引 $l \neq 0$ 时, 根据公式(13)得到干扰信号的波达方向;

(2) 根据干扰信号的波达方向和声波入射信号的Capon空间谱重构得到干扰加噪声协方差矩阵 $\bar{\mathbf{R}}_{i+n}$;

(3) 定义最大旁瓣水平约束值为 BP_{PSLL} , 令 (u_j, v_j) 表示目标波束图的旁瓣区域, 其中, $j=1, 2, \dots, J$, 则根据最大旁瓣水平约束值对目标波束图的旁瓣进行约束, 表示为:

$$| \mathbf{w}^H \bar{\mathbf{a}}(u_j, v_j) |^2 \leq BP_{\text{PSLL}}, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (14)$$

其中, 结合重构的干扰加噪声协方差矩阵 $\bar{\mathbf{R}}_{i+n}$, 则自适应波束形成器的阵元系数通过凸优化方法求解, 得到自适应波束形成器的权重系数值, 求解过程如下所示:

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \bar{\mathbf{R}}_{i+n} \mathbf{w} \quad (15)$$

$$\text{subject to } \mathbf{w}^H \bar{\mathbf{a}}_s = 1 \quad (16)$$

$$|\mathbf{w}^H \bar{\mathbf{a}}(u_j, v_j)|^2 \leq \text{BP}_{\text{PSLL}}, j = 1, 2, \dots, J \quad (17)$$

在获得自适应波束形成器的权重系数值后,即根据 $Y(k) = \mathbf{w}^H X(k)$ 得到自适应波束形成器。

2. 如权利要求1所述的基于贝叶斯压缩感知算法的自适应波束形成器设计方法,其特征在于,自适应波束形成器的输出信干噪比SINR计算如下:

$$\text{SINR} = \frac{E[|\mathbf{w}^H X_s(k)|^2]}{E[|\mathbf{w}^H (X_i(k) + X_n(k))|^2]} = \frac{\sigma_s^2 |\mathbf{w}^H \mathbf{a}_s|^2}{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{i+n} \mathbf{w}} \quad (18)$$

其中, $E[\cdot]$ 表示期望, $|\cdot|^2$ 表示平方, $X_s(k)$, $X_i(k)$ 和 $X_n(k)$ 分别表示目标信号分量,干扰信号分量和噪声分量, σ_s^2 表示信号的能量, \mathbf{a}_s 表示目标信号的阵列流形矢量, $\mathbf{R}_{i+n} = E[(X_i(k) + X_n(k))(X_i(k) + X_n(k))^H] \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示干扰加噪声协方差矩阵,则自适应波束形成器的设计转化为如下问题:

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{i+n} \mathbf{w}, \text{subject to } \mathbf{w}^H \mathbf{a}_s = 1 \quad (19)$$

3. 如权利要求1所述的基于贝叶斯压缩感知算法的自适应波束形成器设计方法,其特征在于,步骤(2)中,声波入射信号Capon空间谱函数 $\bar{\mathbf{P}}(u_l, v_l)$ 为:

$$\bar{\mathbf{P}}(u_l, v_l) = \frac{1}{\bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)} \quad (20)$$

其中, $\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{X}(k) \mathbf{X}(k)^H$ 表示阵元的采样协方差矩阵;

则根据干扰信号的波达方向重构的干扰加噪声协方差矩阵 $\bar{\mathbf{R}}_{i+n}$ 如下:

$$\bar{\mathbf{R}}_{i+n} = \sum_{l=1}^L \bar{\mathbf{P}}(u_l, v_l) \bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l) \bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)^H = \sum_{l=1}^L \frac{\bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l) \bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)^H}{\bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)} \quad (21)$$

其中, $\bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)$ 表示干扰信号源的入射方向 (u_l, v_l) 对应的阵列流形矢量。

4. 如权利要求1所述的基于贝叶斯压缩感知算法的自适应波束形成器设计方法,其特征在于,根据阵列的孔径和阵元个数设定最大旁瓣水平约束值,阵元越多则旁瓣越小。

基于贝叶斯压缩感知算法的自适应波束形成器设计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及声纳阵列信号处理领域,具体涉及一种基于贝叶斯压缩感知算法(BCS)的自适应波束形成器设计方法。

背景技术

[0002] 近年来,相控阵三维成像声纳技术由于其在水下物理、生物、地质等方面的应用而得到了迅速发展。传统的相控阵三维声纳具有固定的波束方向,不能在抵消干扰的同时自动跟踪期望信号的来向,无法适应复杂水声环境下工作的需要,如申请公布号为CN109116334A的专利申请公开了一种基于超波束加权的声纳波束形成方法及系统。

[0003] 自适应波束形成算法作为一个新的技术手段,在保证期望信号大增益接收的前提下,自适应地使波束方向图零陷对准干扰的方向,实现对阵列的波束方向图进行自适应的控制,从而抑制掉干扰或者降低干扰信号的强度。因此,研究自适应波束形成算法具有重要意义。如申请公布号为CN110736976A的专利申请公开了一种任意阵形的声纳波束形成器性能估计方法。申请公布号为CN110196421A的专利申请公开了一种密布式MIMO声纳自适应波束形成探测方法。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种基于贝叶斯压缩感知算法的自适应波束形成器设计方法,该自适应波束形成器设计方法通过贝叶斯压缩感知算法实现了对干扰加噪声协方差矩阵更准确地重构,相比较于其他自适应算法具有更大的输出信干噪比,同时,波束方向图的旁瓣峰值被约束在了更低的水平。

[0005] 为实现上述发明目的,本发明提供的技术方案为:

[0006] 一种基于贝叶斯压缩感知算法的自适应波束形成器设计方法,包括以下步骤:

[0007] (1) 平面阵列阵元接收声波入射信号,所述声波入射信号包含目标信号和干扰信号,基于声波入射信号构建自适应波束形成器,采用贝叶斯压缩感知算法对声波入射信号进行波达方向估计;

[0008] (2) 根据干扰信号的波达方向和声波入射信号的Capon空间谱重构得到干扰加噪声协方差矩阵;

[0009] (3) 定义最大旁瓣水平(PSLL)约束值,并根据最大旁瓣水平约束值对目标波束图的旁瓣进行约束,同时根据干扰加噪声协方差矩阵通过凸优化方法计算自适应波束形成器的权重系数值。

[0010] 步骤(1)中,接收的声波入射信号表示为:

$$[0011] \quad \mathbf{X}(k) = \sum_{l=0}^L \mathbf{a}(\alpha_l, \beta_l) s_l(k) + \mathbf{n}(k) = \Phi \mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (1)$$

[0012] 其中, k 表示采样快拍数, $\mathbf{X}(k)$ 表示采样快拍数为 k 时接收的声波入射信号, $\mathbf{n}(k)$ 表示高斯噪声向量, $\mathbf{s}(k) = [s_1(k), 1=1, 2, \dots, L]^T$ 表示 $L+1$ 个方向的入射信号源, l 表示入射方向的索引,当 $l=0$ 时, (α_1, β_1) 表示目标信号的入射方向,当 $l=1, 2, \dots, L$ 时, (α_l, β_l) 表示

干扰信号的入射方向, $\mathbf{a}(\alpha_1, \beta_1)$ 表示入射方向为 (α_1, β_1) 的阵列流形矢量, $\Phi = [\mathbf{a}(\alpha_1, \beta_1), \dots, \mathbf{a}(\alpha_L, \beta_L)]$, $l = 1, 2, \dots, L$ 表示阵列流形矩阵, 具体表示如下:

$$[0013] \quad \Phi = \begin{bmatrix} \exp\left(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_1 u_0 + y_1 v_0)\right) & \cdots & \exp\left(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_1 u_L + y_1 v_L)\right) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp\left(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_N u_0 + y_N v_0)\right) & \cdots & \exp\left(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_N u_L + y_N v_L)\right) \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0014] 其中, λ 为波长, x_n, y_n 表示第 n 个阵元的位置, $n = 1, 2, \dots, N$, N 为自然数, $u_1 = \sin \alpha_1, v_1 = \sin \beta_1, u_l, v_l \in [-1, 1], l = 1, 2, \dots, L, L$ 为自然数;

[0015] 基于声波入射信号构建自适应波束形成器表示为:

$$[0016] \quad Y(k) = \mathbf{w}^H X(k) \quad (3)$$

[0017] 其中, $Y(k)$ 表示自适应波束形成器的输出, $\mathbf{w}^H \in \mathbb{C}^N$ 表示阵元权重系数, 上标 H 表示赫米特转置, 自适应波束形成器的输出信干噪比 (SINR) 可计算如下:

$$[0018] \quad \text{SINR} = \frac{E[|\mathbf{w}^H X_s(k)|^2]}{E[|\mathbf{w}^H (X_i(k) + X_n(k))|^2]} = \frac{\sigma_s^2 |\mathbf{w}^H \mathbf{a}_s|^2}{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{i+n} \mathbf{w}} \quad (4)$$

[0019] 其中, $E[\cdot]$ 表示期望, $|\cdot|^2$ 表示平方, $X_s(k), X_i(k)$ 和 $X_n(k)$ 分别表示目标信号分量, 干扰信号分量和噪声分量, σ_s^2 表示信号的能量, \mathbf{a}_s 表示目标信号的阵列流形矢量, $\mathbf{R}_{i+n} = E[(X_i(k) + X_n(k))(X_i(k) + X_n(k))^H] \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示干扰加噪声协方差矩阵, 则自适应波束形成器的设计转化为如下问题:

$$[0020] \quad \min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{i+n} \mathbf{w}, \text{ subject to } \mathbf{w}^H \mathbf{a}_s = 1. \quad (5)$$

[0021] 采用贝叶斯压缩感知算法对声波入射信号进行波达方向 (DOA) 估计时, 令候选的信号方向数量为 M , 则候选信号源可表示为 $\bar{\mathbf{s}}(k) = [\bar{s}_1(k), \bar{s}_2(k), \dots, \bar{s}_M(k)]^T$, 则阵元接收到的声波入射信号 $\bar{\mathbf{X}}(k)$ 改写为:

$$[0022] \quad \bar{\mathbf{X}}(k) = \bar{\Phi} \bar{\mathbf{s}}(k) + \bar{\mathbf{n}}(k) \quad (6)$$

[0023] 其中, $\bar{\mathbf{n}}(k)$ 表示噪声向量, $\bar{\mathbf{s}}(k)$ 表示候选信号源向量, 阵列流形矩阵 $\bar{\Phi}$ 如下所示:

$$[0024] \quad \bar{\Phi} = \begin{bmatrix} \exp\left(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_1 u_1 + y_1 v_1)\right) & \cdots & \exp\left(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_1 u_M + y_1 v_M)\right) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp\left(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_N u_1 + y_N v_1)\right) & \cdots & \exp\left(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_N u_M + y_N v_M)\right) \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0025] 则 DOA 估计问题可转化为如下所示:

$$[0026] \quad \bar{\mathbf{s}}_Q(k) = \arg(\max [P(\bar{\mathbf{s}}_Q(k) | \bar{\mathbf{X}}_Q(k))]) \quad Q=R, I \quad (8)$$

[0027] 其中, $Q=R, I$, $\bar{\mathbf{s}}_R(k)$ 和 $\bar{\mathbf{s}}_I(k)$ 分别表示候选信号源 $\bar{\mathbf{s}}_Q(k)$ 的实部和虚部,

$P(\bar{\mathbf{s}}_Q(k) | \bar{\mathbf{X}}_Q(k))$ 表示后验概率, 则 $\bar{\mathbf{X}}_Q(k)$ 为:

[0028] $\bar{\mathbf{X}}_R(k) = \begin{bmatrix} \bar{\Phi}_R \\ \bar{\Phi}_I \end{bmatrix} \bar{\mathbf{s}}_R(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_R(k) = \boldsymbol{\Omega}_R \bar{\mathbf{s}}_R(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_R(k) \quad (9)$

[0029] $\bar{\mathbf{X}}_I(k) = \begin{bmatrix} -\bar{\Phi}_I \\ \bar{\Phi}_R \end{bmatrix} \bar{\mathbf{s}}_I(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_I(k) = \boldsymbol{\Omega}_I \bar{\mathbf{s}}_I(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_I(k) \quad (10)$

[0030] $\bar{\mathbf{X}}_R(k) + \bar{\mathbf{X}}_I(k) = \begin{bmatrix} R(\bar{\mathbf{X}}(k)) \\ I(\bar{\mathbf{X}}(k)) \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_R(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_I(k) = \begin{bmatrix} R(\boldsymbol{\varepsilon}(k)) \\ I(\boldsymbol{\varepsilon}(k)) \end{bmatrix} \quad (11)$

[0031] 其中, $R(\cdot)$ 表示取实部, $I(\cdot)$ 表示取虚部, $\varepsilon(k)$ 为保真度系数, 表示信号DOA估计的精度, $\boldsymbol{\Omega}_R = \begin{bmatrix} \bar{\Phi}_R \\ \bar{\Phi}_I \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{\Omega}_I = \begin{bmatrix} -\bar{\Phi}_I \\ \bar{\Phi}_R \end{bmatrix}$, 后验概率 $P(\bar{\mathbf{s}}_Q(k) | \bar{\mathbf{X}}_Q(k))$ 引入超参数 $\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q \in \mathbb{R}^{2M}$ 转化为:

[0032] $P(\bar{\mathbf{s}}_Q(k) | \bar{\mathbf{X}}_Q(k)) = \int P(\bar{\mathbf{s}}_Q(k) | \bar{\mathbf{X}}_Q(k), \bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q) P(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q | \bar{\mathbf{X}}_Q(k)) d\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q \quad Q = R, I \quad (12)$

[0033] 其中, $Q=R, I, R, I$ 分别表示实部和虚部, 超参数 $\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q$ 的值由求解其最大似然函数得到, 如下所示:

[0034]
$$L(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q) = -\frac{1}{2} \sum_Q \{ \log | \mathbf{I} + \boldsymbol{\Omega}_Q [\text{diag}(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q)]^{-1} \boldsymbol{\Omega}_Q^T | + (M + 2a) \log [\mathbf{X}_Q(k)^T (\mathbf{I} + \boldsymbol{\Omega}_Q [\text{diag}(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q)]^{-1} \boldsymbol{\Omega}_Q^T) \mathbf{X}_Q(k) + 2b] \} \quad (13)$$

[0035] 其中, $Q=R, I, a, b$ 为用户自定义比例控制参数, $\text{diag}(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q)$ 表示以 $\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q$ 为对角元素的对角矩阵, 上标^T表示矩阵的转置; 则声波入射信号的DOA估计通过下式可以求得:

[0036] $\bar{\mathbf{s}}_Q(k) = (\text{diag}(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q) + \boldsymbol{\Omega}_Q^T \boldsymbol{\Omega}_Q)^{-1} \boldsymbol{\Omega}_Q^T \bar{\mathbf{X}}_Q(k) \quad Q = R, I \quad (14)$

[0037] 由于 $\bar{\mathbf{X}}_Q(k)$ 具有 K 个采样点, 而上面的推导过程仅使用其中一个采样点。通过多任务贝叶斯压缩感知算法 (MT-BCS) 进行DOA估计时, 可以通过共享相同的超参数和观测矩阵来关联 K 个采样点, 从而提高了估计精度, 所以公式 (14) 中的DOA估计可以写成:

[0038] $\bar{\mathbf{s}}_Q = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\text{diag}(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q) + \boldsymbol{\Omega}_Q^T \boldsymbol{\Omega}_Q)^{-1} \boldsymbol{\Omega}_Q^T \bar{\mathbf{X}}_Q(k) \quad Q = R, I. \quad (15)$

[0039] 当入射方向索引 $l=0$ 时, 根据公式 (15) 得到目标信号的波达方向, 当入射方向索引 $l \neq 0$ 时, 根据公式 (15) 得到干扰信号的波达方向。

[0040] 步骤 (2) 中, 根据目标信号方位的先验信息可以将由步骤 (1) 得到的波达方向分为目标信号源的入射方向为 (u_0, v_0) , 对应的阵列流形矢量为 $\bar{\mathbf{a}}_s(u_0, v_0)$, 以及干扰信号源的入射方向为 (u_l, v_l) ($l=1, 2, \dots, L$), 对应的阵列流形矢量为 $\bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)$, 声波入射信号Capon空间谱函数为:

[0041] $\bar{P}(u_l, v_l) = \frac{1}{\bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)^H \bar{\mathbf{R}}^{-1} \bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)} \quad (16)$

[0042] 其中, $\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{X}(k)\mathbf{X}(k)^H$ 表示阵元的采样协方差矩阵, 则根据干扰信号的波达方向重构的干扰加噪声协方差矩阵 $\bar{\mathbf{R}}_{i+n}$ 如下:

$$[0043] \quad \bar{\mathbf{R}}_{i+n} = \sum_{l=1}^L \bar{\mathbf{P}}(u_l, v_l) \bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l) \bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)^H = \sum_{l=1}^L \frac{\bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l) \bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)^H}{\bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)} \quad (17)$$

[0044] 步骤(3)中, 定义最大旁瓣水平 (PSLL) 约束值为 BP_{PSLL} , 令 (u_j, v_j) ($j=1, 2, \dots, J$) 表示目标波束图的旁瓣区域, 则旁瓣的约束如下:

$$[0045] \quad |\mathbf{w}^H \bar{\mathbf{a}}(u_j, v_j)|^2 \leq \text{BP}_{\text{PSLL}}, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (18)$$

[0046] 结合重构的干扰加噪声协方差矩阵 $\bar{\mathbf{R}}_{i+n}$, 则自适应波束形成器的阵元系数通过凸优化方法求解, 得到自适应波束形成器的权重系数值, 求解过程如下所示:

$$[0047] \quad \min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \bar{\mathbf{R}}_{i+n} \mathbf{w},$$

$$[0048] \quad \text{subject to } \mathbf{w}^H \bar{\mathbf{a}}_s = 1,$$

$$[0049] \quad |\mathbf{w}^H \bar{\mathbf{a}}(u_j, v_j)|^2 \leq \text{BP}_{\text{PSLL}}, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (19)$$

[0050] 在获得自适应波束形成器的权重系数值后, 即可以根据 $Y(k) = \mathbf{w}^H X(k)$ 得到自适应波束形成器。

[0051] 最大旁瓣水平 (PSLL) 约束值与阵列的孔径和阵元个数相关, 本发明中根据阵列的孔径和阵元个数设定最大旁瓣水平 (PSLL) 约束值, 阵元越多则旁瓣越小。例如针对 20×20 的阵列, 最大旁瓣水平 (PSLL) 约束值是 -25dB, 当约束值小于 -25 的时候求不出解。

[0052] 与现有技术相比, 本发明具有的有益效果为:

[0053] 本发明中, 贝叶斯压缩感知算法将对阵元接收到的声波入射信号进行 DOA 估计获得目标信号源与干扰信号源的方位, 根据获得的目标信号源和干扰信号源方位再结合采样数据的 Capon 空间谱估计可以精确地重构出干扰加噪声协方差矩阵。同时, 相对于其他自适应波束形成算法, 本发明提出的自适应波束形成器对波束方向图的旁瓣进行了约束, 将旁瓣控制在较低的水平。该方法实现了对干扰加噪声协方差矩阵更准确的重构, 具有更大的输出信干噪比和更好的旁瓣控制水平。

附图说明

[0054] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案, 下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图做简单地介绍, 显而易见地, 下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例, 对于本领域普通技术人员来讲, 在不付出创造性劳动前提下, 还可以根据这些附图获得其他附图。

[0055] 图1为本发明的基于贝叶斯压缩感知算法的自适应波束形成器设计方法方位角定义示意图;

[0056] 图2为本发明的基于贝叶斯压缩感知算法的自适应波束形成器设计方法信号源和干扰源方位与强度示意图;

[0057] 图3为本发明的基于贝叶斯压缩感知算法的自适应波束形成器设计方法波束图。

[0058] 图4为本发明与其他方法在不同输入信噪比下的性能对比图。

[0059] 图5为本发明与其他方法在不同采样次数下的性能对比图。

具体实施方式

[0060] 为使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例对本发明进行进一步的详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施方式仅仅用以解释本发明,并不限定本发明的保护范围。

[0061] 本发明提供一种基于贝叶斯压缩感知算法的自适应波束形成器设计方法,该方法通过贝叶斯压缩感知算法实现了对干扰加噪声协方差矩阵更准确的重构,相比较于其他自适应算法具有更大的输出信干噪比,同时,波束方向图的旁瓣峰值被约束在了更低的水平。

[0062] 本实施例中,设计所考虑的是一个 20×20 的二维换能器阵列。图1为本发明的基于贝叶斯压缩感知算法的自适应波束形成器设计方法方位角定义示意图,其中, α, β 表示声波入射信号在水平和垂直方向的角度。假设信号入射方向为 $(0^\circ, 0^\circ)$,两个干扰源入射方向分别为 $(45^\circ, 36^\circ)$ 和 $(30^\circ, 60^\circ)$ 输入干扰噪声比(INR)为30dB。换能器按半波长间距均匀分布在一个矩形平面内,换能器的水平和垂直间距相等,载波频率为 $f=300\text{kHz}$,声速为 1500m/s , u 和 v 的取值范围分别是 $(-1, 1)$ 和 $(-1, 1)$,波束数为 181×181 。

[0063] 实施例提供的一种基于贝叶斯压缩感知算法的自适应波束形成器设计方法,具体步骤如下所示:

[0064] 步骤1,候选的信号方向数量为 $M=181 \times 181$,则候选信号源可表示为 $\bar{\mathbf{s}}(k) = [\bar{s}_1(k), \bar{s}_2(k), \dots, \bar{s}_M(k)]^T$,则阵元接收到的信号可改写为:

$$[0065] \quad \bar{\mathbf{X}}(k) = \bar{\Phi} \bar{\mathbf{s}}(k) + \bar{\mathbf{n}}(k)$$

[0066] 其中,阵列流形矩阵如下所示:

$$[0067] \quad \bar{\Phi} = \begin{bmatrix} \exp(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_1 u_1 + y_1 v_1)) & \cdots & \exp(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_1 u_M + y_1 v_M)) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_N u_1 + y_N v_1)) & \cdots & \exp(\frac{i2\pi}{\lambda}(x_N u_M + y_N v_M)) \end{bmatrix}$$

[0068] 则DOA估计问题可转化为如下所示:

$$[0069] \quad \bar{\mathbf{s}}_Q(k) = \arg(\max[P(\bar{\mathbf{s}}_Q(k)|\bar{\mathbf{X}}_Q(k))]) \quad Q=R, I$$

[0070] 其中, $\bar{\mathbf{s}}_R$ 和 $\bar{\mathbf{s}}_I$ 分别表示 $\bar{\mathbf{s}}$ 的实部和虚部, $P(\bar{\mathbf{s}}_Q(k)|\bar{\mathbf{X}}_Q(k))$ 表示后验概率。则 $\bar{\mathbf{X}}(k)$ 为:

$$[0071] \quad \bar{\mathbf{X}}_R(k) = \begin{bmatrix} \bar{\Phi}_R \\ \bar{\Phi}_I \end{bmatrix} \bar{\mathbf{s}}_R(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_R(k) = \boldsymbol{\Omega}_R \bar{\mathbf{s}}_R(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_R(k)$$

$$[0072] \quad \bar{\mathbf{X}}_I(k) = \begin{bmatrix} -\bar{\Phi}_I \\ \bar{\Phi}_R \end{bmatrix} \bar{\mathbf{s}}_I(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_I(k) = \boldsymbol{\Omega}_I \bar{\mathbf{s}}_I(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_I(k)$$

$$[0073] \quad \bar{\mathbf{X}}_R(k) + \bar{\mathbf{X}}_I(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\bar{\mathbf{X}}(k)) \\ \mathbf{I}(\bar{\mathbf{X}}(k)) \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_R(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_I(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\boldsymbol{\varepsilon}(k)) \\ \mathbf{I}(\boldsymbol{\varepsilon}(k)) \end{bmatrix}$$

[0074] 其中, $\varepsilon(k)$ 为保真度系数表示信号DOA估计的精度。后验概率 $P(\bar{\mathbf{s}}_Q(k) | \bar{\mathbf{X}}_Q(k))$ 引入超参数 $\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q \in \mathbf{R}^{2M}$ 转化为:

$$[0075] \quad P(\bar{\mathbf{s}}_Q(k) | \bar{\mathbf{X}}_Q(k)) = \int P(\bar{\mathbf{s}}_Q(k) | \bar{\mathbf{X}}_Q(k), \bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q) P(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q | \bar{\mathbf{X}}_Q(k)) d\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q \quad Q = R, I$$

[0076] 其中, R, I 分别表示实部和虚部, 超参数 $\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q$ 的值由求解其最大似然函数得到, 如下所示:

$$[0077] \quad L(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q) = -\frac{1}{2} \sum_Q \{ \log | \mathbf{I} + \boldsymbol{\Omega}_Q [\text{diag}(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q)]^{-1} \boldsymbol{\Omega}_Q^T | + (M + 2a) \log [\mathbf{X}_Q(k)^T (\mathbf{I} + \boldsymbol{\Omega}_Q [\text{diag}(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q)]^{-1} \boldsymbol{\Omega}_Q^T) \mathbf{X}_Q(k) + 2b] \} \quad Q = R, I$$

[0078] 其中, a, b 为用户自定义比例控制参数, $\text{diag}(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q)$ 表示以 $\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q$ 为对角元素的对角矩阵; 则入射信号的DOA通过下式可以求得:

$$[0079] \quad \bar{\mathbf{s}}_Q(k) = (\text{diag}(\bar{\boldsymbol{\gamma}}_Q) + \boldsymbol{\Omega}_Q^T \boldsymbol{\Omega}_Q)^{-1} \boldsymbol{\Omega}_Q^T \mathbf{X}_Q(k) \quad Q = R, I.$$

[0080] 最终得到信号源和干扰源的方位与归一化强度如图2所示。

[0081] 步骤2, 根据获得入射信号源的方向为 $(0^\circ, 0^\circ)$, 阵列流形矢量为 $\bar{\mathbf{a}}_s$, 干扰源的方向为 $(45^\circ, 36^\circ)$ 和 $(30^\circ, 60^\circ)$, 阵列流形矢量为 $\bar{\mathbf{a}}_i$ 。Capon空间谱函数为:

$$[0082] \quad \bar{\mathbf{P}}(u, v) = \frac{1}{\bar{\mathbf{a}}(u, v)^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \bar{\mathbf{a}}(u, v)}$$

[0083] 其中, $\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{X}(k) \mathbf{X}(k)^H$ 表示阵元的采样协方差矩阵。则干扰加噪声协方差矩阵可重构如下:

$$[0084] \quad \bar{\mathbf{R}}_{i+n} = \sum_{l=1}^L \bar{\mathbf{P}}(u_l, v_l) \bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l) \bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)^H = \sum_{l=1}^L \frac{\bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l) \bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)^H}{\bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \bar{\mathbf{a}}(u_l, v_l)}$$

[0085] 步骤3, 设定旁瓣峰值为 -25dB, 通过凸优化方法求解自适应波束形成器的阵元系数。最终得到的波束方向图如图3所示, 与其他自适应波束形成算法的比较, 包括对角加载方法 (DL)、最差情形方法 (WC)、直接求逆方法 (SMI) 和协方差矩阵重构方法 (CMR) 如图4和图5所示, 其中图4比较的不同输入信噪比 (SNR) 下的输出信干噪比 (SINR), 图5比较的不同采样次数下的输出信干噪比 (SINR)。可以看出在不同条件下本发明的性能总是优于其他方法。

[0086] 以上所述的具体实施方式对本发明的技术方案和有益效果进行了详细说明, 应理解的是以上所述仅为本发明的最优选实施例, 并不用于限制本发明, 凡在本发明的原则范围内所做的任何修改、补充和等同替换等, 均应包含在本发明的保护范围之内。

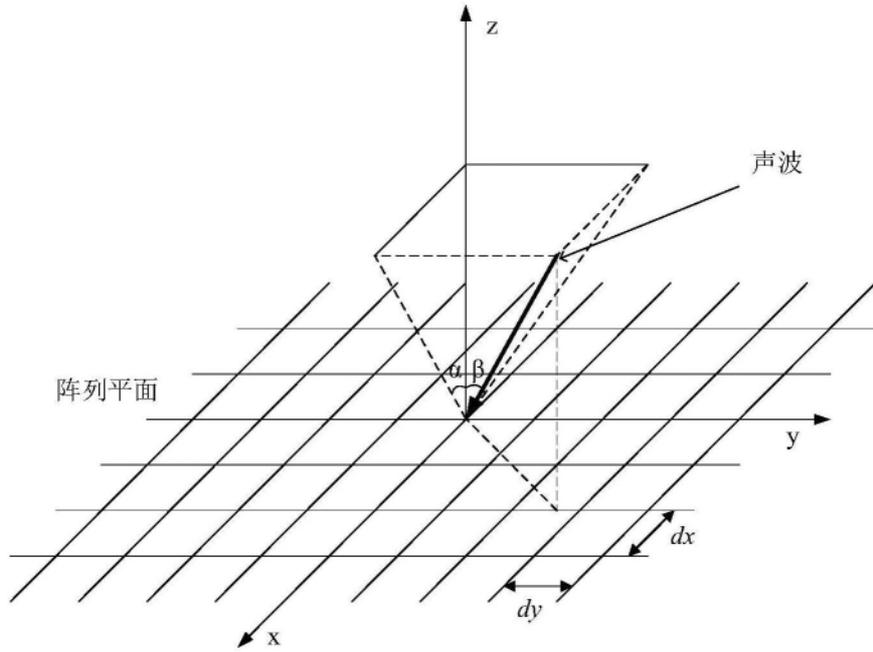


图1

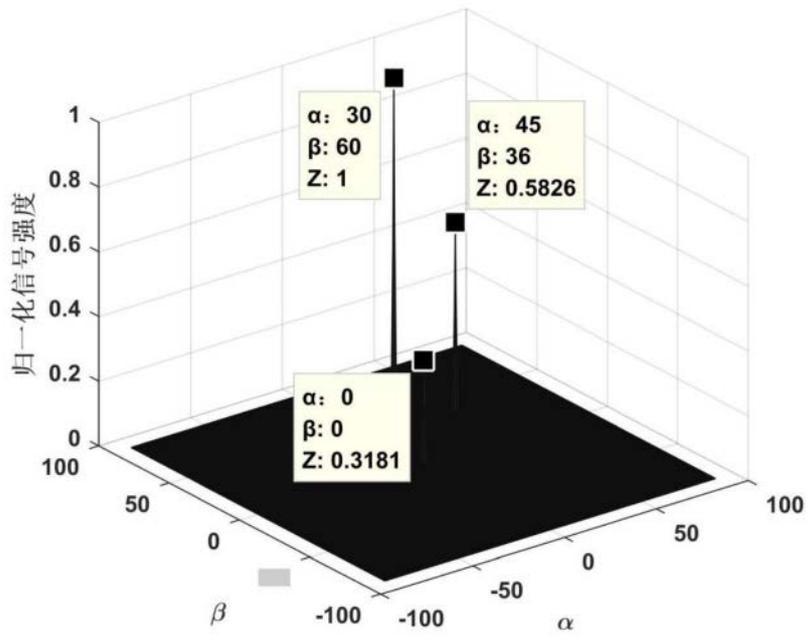


图2

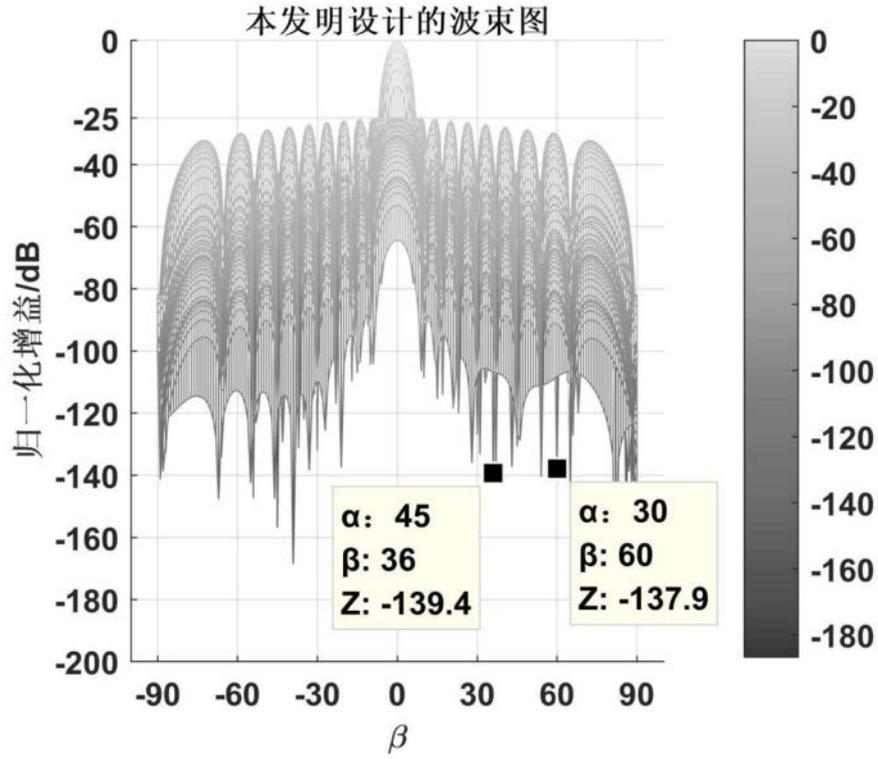


图3

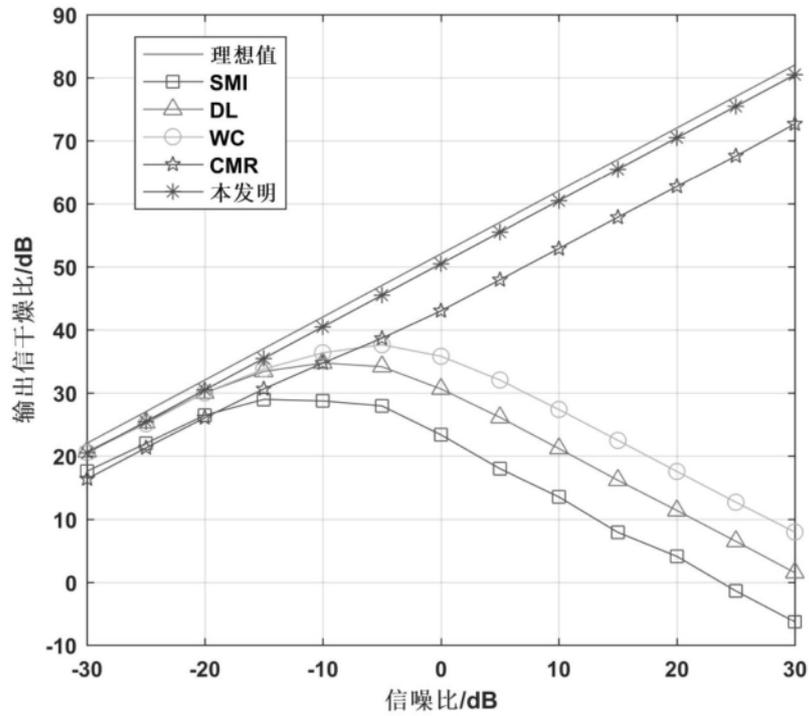


图4

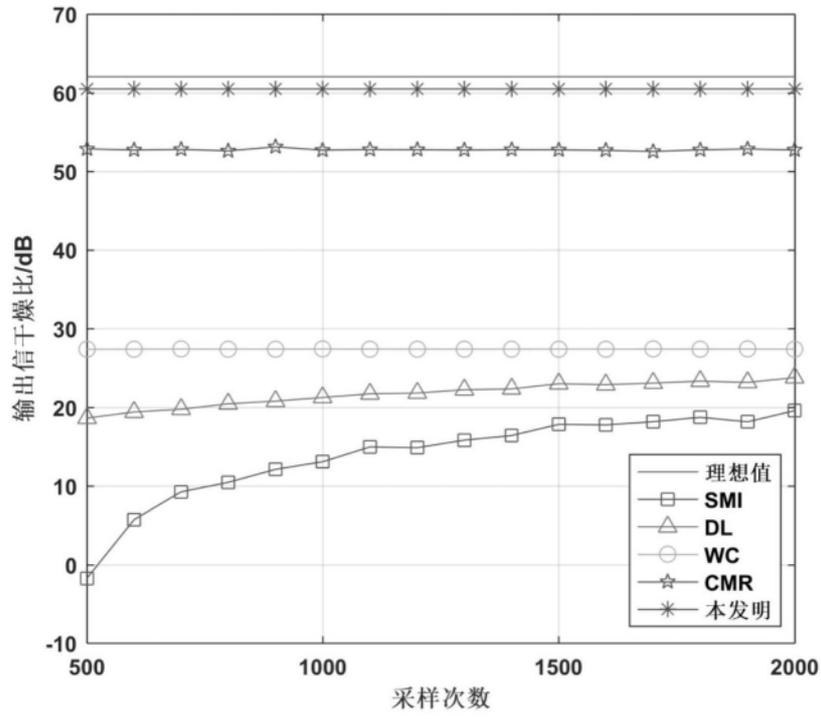


图5