



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117648564 A

(43) 申请公布日 2024. 03. 05

(21) 申请号 202311359708.1

(22) 申请日 2023.10.19

(71) 申请人 西安电子科技大学

地址 710071 陕西省西安市太白南路2号

(72) 发明人 许述文 李强 谢荣

(74) 专利代理机构 西安嘉思特知识产权代理事

务所(普通合伙) 61230

专利代理师 辛菲

(51) Int. Cl.

G06F 18/213 (2023.01)

权利要求书4页 说明书13页 附图5页

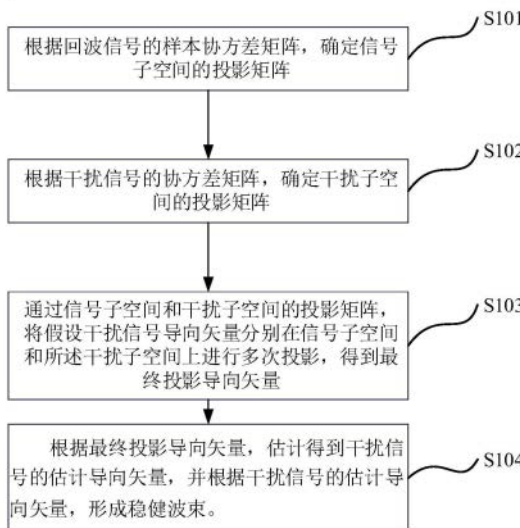
(54) 发明名称

一种基于干扰信号导向矢量估计的稳健波束形成方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于干扰信号导向矢量估计的稳健波束形成方法,包括:根据回波信号的样本协方差矩阵,确定信号子空间的投影矩阵;根据干扰信号的协方差矩阵,确定干扰子空间的投影矩阵;通过信号子空间和干扰子空间的投影矩阵,将假设干扰信号导向矢量分别在信号子空间和干扰子空间上进行多次投影,得到最终投影导向矢量;根据最终投影导向矢量,估计得到干扰信号的估计导向矢量,并根据干扰信号的估计导向矢量,形成稳健波束。根据本发明提供的方法,通过将假设干扰信号导向矢量分别在信号子空间和干扰子空间进行多次投影,能够有效削弱阵列位置误差、阵元幅相误差等阵列校正误差和阵列结构误差对波束形成性能的影响,实现波束的稳健性形成。

100



1. 一种基于干扰信号导向矢量估计的稳健波束形成方法,其特征在于,包括:

根据回波信号的样本协方差矩阵,确定信号子空间的投影矩阵,所述信号子空间包括期望信号和干扰信号;

根据所述干扰信号的协方差矩阵,确定干扰子空间的投影矩阵,所述干扰子空间包括所述干扰信号;

通过所述信号子空间和所述干扰子空间的投影矩阵,将假设干扰信号导向矢量分别在所述信号子空间和所述干扰子空间上进行多次投影,得到最终投影导向矢量,其中,所述假设干扰信号导向矢量是在假设获取所述回波信号的天线阵列不存在阵列误差的条件下,根据所述天线阵列的阵列结构信息得到的;

根据所述最终投影导向矢量,估计得到所述干扰信号的估计导向矢量,并根据所述干扰信号的估计导向矢量,形成稳健波束。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述根据回波信号的样本协方差矩阵,确定信号子空间的投影矩阵,包括:

对所述回波信号的样本协方差矩阵进行特征值分解处理,得到所述信号子空间的投影矩阵。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,所述对所述回波信号的样本协方差矩阵进行特征值分解处理,得到所述信号子空间的投影矩阵,包括:

通过第一特征值分解模型,对所述回波信号的样本协方差矩阵进行特征值分解处理,得到所述信号子空间的投影矩阵,所述第一特征值分解模型满足下述公式:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{R}} &= \sum_{i=1}^M \alpha_i \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H \\ &= \mathbf{E}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{E}_s^H + \mathbf{E}_n \mathbf{\Lambda}_n \mathbf{E}_n^H\end{aligned}$$

其中, $\hat{\mathbf{R}}$ 为所述回波信号的样本协方差矩阵, $\mathbf{e}_i$ 为所述样本协方差矩阵的特征向量, α_i 为所述样本协方差矩阵中特征向量 $\mathbf{e}_i$ 对应的特征值, $\mathbf{E}_s$ 为所述信号子空间,所述信号子空间是由所述样本协方差矩阵的较大的特征值对应的特征向量构成的, $\mathbf{\Lambda}_s$ 为所述信号子空间的特征向量对应的特征值; $\mathbf{E}_n$ 为第一噪声子空间,所述第一噪声子空间是由所述样本协方差矩阵的较小的特征值对应的特征向量构成的, $\mathbf{\Lambda}_n$ 为所述第一噪声子空间的特征向量对应的特征值;

其中,所述信号子空间的投影矩阵满足下述公式:

$$\mathbf{P}_E = \mathbf{E}_s \mathbf{E}_s^H$$

其中, $\mathbf{P}_E$ 为所述信号子空间的投影矩阵。

4. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,在所述根据所述干扰信号的协方差矩阵,确定干扰子空间的投影矩阵之前,所述方法还包括:

在不确定集上对阵列信号导向矢量进行积分,得到所述干扰信号的协方差矩阵;

其中,所述不确定集满足下述公式:

$$\mathbf{S}_a(\theta) = \left\{ \mathbf{a} \left\| \bar{\mathbf{a}}(\theta) - \mathbf{a} \right\|_2 \leq \varepsilon \right\}$$

其中, $\mathbf{S}_a(\theta)$ 为所述不确定集, $\bar{\mathbf{a}}(\theta)$ 为所述假设干扰信号导向矢量, ε 为常数, $\mathbf{a}$ 为导向矢

量变量, $|| \cdot ||$ 表示取模值;

其中,所述干扰信号的协方差矩阵满足下述公式:

$$\hat{\mathbf{R}}_j = \int_{S_a(\theta \in \Theta_j)} \frac{a a^H}{a^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} a} dv$$

其中, $\hat{\mathbf{R}}_j$ 为第j个干扰信号的协方差矩阵, a 为所述阵列信号导向矢量, $\hat{\mathbf{R}}$ 为所述样本协方差矩阵。

5. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述根据所述干扰信号的协方差矩阵,确定干扰子空间的投影矩阵,包括:

对所述干扰信号的协方差矩阵进行特征值分解处理,得到所述干扰子空间的投影矩阵。

6. 根据权利要求5所述的方法,其特征在于,所述对所述干扰信号的协方差矩阵进行特征值分解处理,得到所述干扰子空间的投影矩阵,包括:

通过第二特征值分解模型,对所述干扰信号的协方差矩阵进行特征值分解处理,得到所述干扰子空间的投影矩阵,所述第二特征值分解模型满足下述公式:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_j &= \sum_{i=1}^M \gamma_{i-j} \mathbf{e}_{i-j} \mathbf{e}_{i-j}^H \\ &= \mathbf{D}_{s-j} \mathbf{A}_{s-j} \mathbf{D}_{s-j}^H + \mathbf{D}_{n-j} \mathbf{A}_{n-j} \mathbf{D}_{n-j}^H \end{aligned}$$

其中, $\hat{\mathbf{R}}_j$ 为所述干扰信号的协方差矩阵, $\mathbf{e}_{i-j}$ 为所述干扰信号的协方差矩阵的特征向量; γ_{i-j} 为所述干扰信号的协方差矩阵的特征向量 $\mathbf{e}_{i-j}$ 对应的特征值, $\mathbf{D}_{s-j}$ 为所述干扰子空间,所述干扰子空间是由所述干扰信号的协方差矩阵的较大的特征值对应的特征向量构成的, $\mathbf{A}_{s-j}$ 为所述干扰子空间的特征向量对应的特征值, $\mathbf{D}_{n-j}$ 为第二噪声子空间,所述第二噪声子空间是由所述干扰信号的协方差矩阵的较小的特征值对应的特征向量构成的, $\mathbf{A}_{n-j}$ 为所述第二噪声子空间的特征向量对应的特征值;

其中,所述干扰信号的投影矩阵满足下述公式:

$$\mathbf{P}_D = \mathbf{D}_{s-j} \mathbf{D}_{s-j}^H$$

其中, $\mathbf{P}_D$ 为所述干扰信号的投影矩阵。

7. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述通过所述信号子空间和所述干扰子空间的投影矩阵,将假设干扰信号导向矢量分别在所述信号子空间和所述干扰子空间上进行多次投影,得到最终投影导向矢量,包括:

通过下述公式,将第i次投影后的所述干扰信号的导向矢量依次左乘所述信号子空间的投影矩阵和所述干扰子空间的投影矩阵,以将所述干扰信号的导向矢量在所述信号子空间和所述干扰子空间上进行第i+1次投影,对应得到第i+1次投影后的所述干扰信号的导向矢量,其中, $i=0,1,2,\dots$,未进行投影的所述干扰信号的导向矢量为所述假设干扰信号导向矢量:

$$\mathbf{a}_{i+1} = \mathbf{P}_D \mathbf{P}_E \mathbf{a}_i$$

其中, $\mathbf{a}_{i+1}$ 为第i+1次投影后的所述干扰信号的导向矢量, $\mathbf{a}_i$ 为第i次投影后的所述干扰信号的导向矢量, $\mathbf{P}_E$ 为所述信号子空间的投影矩阵, $\mathbf{P}_D$ 为所述干扰子空间的投影矩阵;

重复将所述干扰信号的导向矢量在所述信号子空间和所述干扰子空间上进行投影,直至第*i*+1次投影后的所述干扰信号的导向矢量与第*i*次投影后的所述干扰信号的导向矢量相等,得到收敛的所述最终投影导向矢量,所述最终投影导向矢量满足下述公式:

$$\hat{\mathbf{a}}_{\infty} = P_D P_E \hat{\mathbf{a}}_{\infty}$$

其中, $\hat{\mathbf{a}}_{\infty}$ 为所述最终投影导向矢量。

8. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述根据所述最终投影导向矢量,估计得到所述干扰信号的估计导向矢量,并根据所述干扰信号的估计导向矢量,形成稳健波束,包括:

根据所述最终投影导向矢量,估计得到所述干扰信号的估计导向矢量,所述估计导向矢量满足下述公式:

$$\hat{\mathbf{a}}_j = \sqrt{M} \hat{\mathbf{a}}_{\infty}$$

其中, $\hat{\mathbf{a}}_j$ 为所述估计导向矢量, $\hat{\mathbf{a}}_{\infty}$ 为所述最终投影导向矢量, *M* 为获取所述回波信号的天线阵列的阵元个数;

根据所述估计导向矢量,确定干扰加噪声协方差矩阵;

根据所述干扰加噪声协方差矩阵和所述样本协方差矩阵,确定所述期望信号的误差向量,所述期望信号的误差向量满足下述公式:

$$\min_{\mathbf{e}_{\perp}} (\bar{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_{\perp})^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} (\bar{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_{\perp})$$

$$\text{s.t. } \bar{\mathbf{a}}_0^H \mathbf{e}_{\perp} = 0$$

$$(\bar{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_{\perp})^H \tilde{\mathbf{R}}_{i+n} (\bar{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_{\perp}) \leq \bar{\mathbf{a}}_0^H \tilde{\mathbf{R}}_{i+n} \bar{\mathbf{a}}_0$$

其中, $\bar{\mathbf{a}}_0$ 为假设期望信号导向矢量,所述假设期望信号导向矢量是在假设获取所述回波信号的天线阵列不存在阵列误差的条件下,根据所述天线阵列的阵列结构信息得到的, $\mathbf{e}_{\perp}$ 为所述期望信号的误差向量, $\hat{\mathbf{R}}$ 为所述样本协方差矩阵, $\tilde{\mathbf{R}}_{i+n}$ 为所述干扰加噪声协方差矩阵;

根据所述误差向量,确定所述期望信号的导向矢量,所述期望信号的导向矢量满足下述公式:

$$\hat{\mathbf{a}}_0 = \bar{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_{\perp}$$

其中, $\hat{\mathbf{a}}_0$ 为所述期望信号的导向矢量;

根据所述期望信号的导向矢量和所述干扰加噪声协方差矩阵,形成所述稳健波束,所述稳健波束的阵列加权系数满足下述公式:

$$\hat{\mathbf{w}} = \frac{\tilde{\mathbf{R}}_{i+n}^{-1} \hat{\mathbf{a}}_0}{\hat{\mathbf{a}}_0^H \tilde{\mathbf{R}}_{i+n}^{-1} \hat{\mathbf{a}}_0}$$

其中, $\hat{\mathbf{w}}$ 为所述稳健波束的阵列加权系数。

9. 根据权利要求8所述的方法,其特征在于,所述根据所述估计导向矢量,确定干扰加噪声协方差矩阵,包括:

根据所述回波信号的样本协方差矩阵的最大特征值,对所述干扰信号的功率进行过估计,对应得到所述干扰信号的过估计功率;

根据所述干扰信号的过估计功率和所述估计导向矢量,确定所述干扰加噪声协方差矩阵。

10.根据权利要求9所述的方法,其特征在于,所述干扰加噪声协方差矩阵满足下述公式:

$$\tilde{\mathbf{R}}_{i+n} = p_{\max} \sum_{j=1}^J \hat{\mathbf{a}}_j \hat{\mathbf{a}}_j^H + \hat{\sigma}_n^2$$

$$p_{\max} = \frac{\alpha_1}{M}$$

其中, $\tilde{\mathbf{R}}_{i+n}$ 为所述干扰加噪声协方差矩阵, α_1 为所述回波信号的样本协方差矩阵的最大的特征值, $\hat{\mathbf{a}}_j$ 为所述估计导向矢量, $p_{\max}$ 为所述过估计功率, $\hat{\sigma}_n^2$ 为噪声的估计功率。

一种基于干扰信号导向矢量估计的稳健波束形成方法

技术领域

[0001] 本发明属于信号处理技术领域,具体涉及一种基于干扰信号导向矢量估计的稳健波束的形成方法。

背景技术

[0002] 自适应波束形成是通过阵列传感器自适应加权来实现空域滤波和干扰加噪声抑制,进而达到探测和增强空域中的期望信号信息的目的。样本协方差矩阵求逆 (Sample Matrix Inversion, SMI) 波束形成方法是众多自适应波束形成方法中最典型的代表,其广泛应用于雷达、声呐、地震学、天文学、无线通信、声学、医学成像等众多领域。但SMI波束形成只有在期望信号导向矢量准确已知、阵列接收信号不包含期望信号、信号协方差矩阵理想的情况下才能实现高输出信干噪比 (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR)。但是在许多应用场景下,期望信号总是存在于接收信号样本中,这将极大地影响SMI波束形成性能。

[0003] 近年来,为了实现波束形成的稳健性,许多方法将期望信号约束在一个球形或者椭球形不确定集中,然后通过求解最小化阵列输出功率或最大化期望信号输出功率优化问题,来修正期望信号导向矢量。这类方法在各种误差下都具有一定的稳健性。但是由于在求解优化问题时,仍将含有期望信号的样本协方差矩阵来替代干扰加噪声协方差矩阵,因此当阵列输入信噪比 (Signal-Noise Ratio, SNR) 较高时,仍会产生“信号相消”现象。

[0004] 为了剔除样本协方差矩阵中的期望信号成分,协方差矩阵重构方法通过对期望信号角度区域外的空域能量谱进行角度积分,来重构干扰加噪声协方差矩阵。利用重构的协方差矩阵代替样本协方差矩阵,然后通过最大化期望信号输出功率估计期望信号导向矢量。在阵列非结构误差下,由于剔除了期望信号,该方法即使在高输入信噪比情况下性能仍较好。

[0005] 但是基于空域能量谱积分的重构协方差矩阵方法,在积分过程中只考虑了信号角度对导向矢量的影响,并没有将阵列校正误差和阵列结构误差对干扰信号的积分导向矢量的影响考虑其中,因此上述方法的应用前提是阵列结构理想。一旦出现阵列位置误差、阵元幅相误差等阵列校正误差或者出现阵列结构误差,该方法输出SINR会大幅度下降,使得波束形成性能大幅下降。

发明内容

[0006] 本发明实施例提供了一种基于干扰信号导向矢量估计的稳健波束的形成方法在阵列校正误差下,波束形成性能大幅下降的问题。

[0007] 第一方面,本发明实施例提供了一种基于干扰信号导向矢量估计的稳健波束形成方法,所述方法包括:根据回波信号的样本协方差矩阵,确定信号子空间的投影矩阵,信号子空间包括期望信号和干扰信号;根据干扰信号的协方差矩阵,确定干扰子空间的投影矩阵,干扰子空间包括干扰信号;通过信号子空间和干扰子空间的投影矩阵,将假设干扰信号

导向矢量分别在信号子空间和干扰子空间上进行多次投影,得到最终投影导向矢量;根据最终投影导向矢量,估计得到干扰信号的估计导向矢量,并根据干扰信号的估计导向矢量,形成稳健波束。

[0008] 示例性的,假设干扰信号导向矢量是在假设获取回波信号的天线阵列不存在阵列误差,即理想状态的条件下,根据天线阵列的阵列结构信息得到的。

[0009] 根据本发明提供的方法,通过将假设干扰信号导向矢量分别在信号子空间和干扰子空间进行多次投影,能够有效削弱阵列位置误差、阵元幅相误差等阵列校正误差和阵列结构误差对波束形成性能的影响,进而实现稳健波束的形成。

[0010] 在第一方面的一种可能的实现方式中,可以对回波信号的样本协方差矩阵进行特征值分解处理,得到信号子空间的投影矩阵。

[0011] 在第一方面的一种可能的实现方式中,可以通过第一特征值分解模型,对回波信号的样本协方差矩阵进行特征值分解处理,得到信号子空间的投影矩阵,

[0012] 示例性的,第一特征值分解模型满足下述公式:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}} &= \sum_{i=1}^M \alpha_i \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H \\ &= \mathbf{E}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{E}_s^H + \mathbf{E}_n \mathbf{\Lambda}_n \mathbf{E}_n^H \end{aligned}$$

[0014] 其中, $\hat{\mathbf{R}}$ 为回波信号的样本协方差矩阵, $\mathbf{e}_i$ 为样本协方差矩阵的特征向量, α_i 为样本协方差矩阵中特征向量 $\mathbf{e}_i$ 对应的特征值, $\mathbf{E}_s$ 为信号子空间,信号子空间是由样本协方差矩阵的较大的特征值对应的特征向量构成的, $\mathbf{\Lambda}_s$ 为信号子空间的特征向量对应的特征值; $\mathbf{E}_n$ 为第一噪声子空间,第一噪声子空间是由样本协方差矩阵的较小的特征值对应的特征向量构成的, $\mathbf{\Lambda}_n$ 为第一噪声子空间的特征向量对应的特征值。

[0015] 示例性的,信号子空间的投影矩阵满足下述公式:

$$\mathbf{P}_E = \mathbf{E}_s \mathbf{E}_s^H$$

[0017] 其中, $\mathbf{P}_E$ 为信号子空间的投影矩阵。

[0018] 在第一方面的一种可能的实现方式中,在根据干扰信号的协方差矩阵,确定干扰子空间的投影矩阵之前,可以在不确定集上对阵列信号导向矢量进行积分,得到干扰信号的协方差矩阵。

[0019] 示例性的,不确定集满足下述公式:

$$\mathbf{S}_a(\theta) = \left\{ \mathbf{a} \left\| \bar{\mathbf{a}}(\theta) - \mathbf{a} \right\|_2 \leq \varepsilon \right\}$$

[0021] 其中, $\mathbf{S}_a(\theta)$ 为不确定集, $\bar{\mathbf{a}}(\theta)$ 为假设干扰信号导向矢量, ε 为常数, $\mathbf{a}$ 为导向矢量变量, $\|\cdot\|$ 表示取模值;

[0022] 示例性的,干扰信号的协方差矩阵满足下述公式:

$$\hat{\mathbf{R}}_j = \int_{\mathbf{S}_a(\theta \in \Theta_j)} \frac{\mathbf{a} \mathbf{a}^H}{\mathbf{a}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{a}} d\mathbf{v}$$

[0024] 其中, $\hat{\mathbf{R}}_j$ 为第j个干扰信号的协方差矩阵, $\mathbf{a}$ 为阵列信号导向矢量, $\hat{\mathbf{R}}$ 为样本协方差矩阵。

[0025] 在第一方面的一种可能的实现方式中,可以对干扰信号的协方差矩阵进行特征值分解处理,得到干扰子空间的投影矩阵。

[0026] 在第一方面的一种可能的实现方式中,可以通过第二特征值分解模型,对干扰信号的协方差矩阵进行特征值分解处理,得到干扰子空间的投影矩阵,第二特征值分解模型满足下述公式:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_j &= \sum_{i=1}^M \gamma_{i-j} \mathbf{e}_{i-j} \mathbf{e}_{i-j}^H \\ [0027] \quad &= \mathbf{D}_{s-j} \mathbf{A}_{s-j} \mathbf{D}_{s-j}^H + \mathbf{D}_{n-j} \mathbf{A}_{n-j} \mathbf{D}_{n-j}^H \end{aligned}$$

[0028] 其中, $\hat{\mathbf{R}}_j$ 为干扰信号的协方差矩阵, $\mathbf{e}_{i-j}$ 为干扰信号的协方差矩阵的特征向量; γ_{i-j} 为干扰信号的协方差矩阵的特征向量 $\mathbf{e}_{i-j}$ 对应的特征值, $\mathbf{D}_{s-j}$ 为干扰信号子空间, 干扰信号子空间是由干扰信号的协方差矩阵的较大的特征值对应的特征向量构成的, $\mathbf{A}_{s-j}$ 为干扰信号子空间的特征向量对应的特征值, $\mathbf{D}_{n-j}$ 为第二噪声子空间, 第二噪声子空间是由干扰信号的协方差矩阵的较小的特征值对应的特征向量构成的, $\mathbf{A}_{n-j}$ 为第二噪声子空间特征向量对应的特征值。

[0029] 示例性的, 干扰信号的投影矩阵满足下述公式:

$$[0030] \quad \mathbf{P}_D = \mathbf{D}_{s-j} \mathbf{D}_{s-j}^H$$

[0031] 其中, $\mathbf{P}_D$ 为干扰信号的投影矩阵。

[0032] 在第一方面的一种可能的实现方式中, 可以通过下述公式, 将第 i 次投影后的干扰信号的导向矢量依次左乘信号子空间的投影矩阵和干扰子空间的投影矩阵, 以将干扰信号导向矢量在信号子空间和干扰子空间上进行第 $i+1$ 次投影, 对应得到第 $i+1$ 次投影后的干扰信号的导向矢量:

$$[0033] \quad \mathbf{a}_{i+1} = \mathbf{P}_D \mathbf{P}_E \mathbf{a}_i$$

[0034] 其中, $\mathbf{a}_{i+1}$ 为第 $i+1$ 次投影后的干扰信号的导向矢量, $\mathbf{a}_i$ 为第 i 次投影后的干扰信号的导向矢量, $\mathbf{P}_E$ 为信号子空间的投影矩阵, $\mathbf{P}_D$ 为干扰子空间的投影矩阵。

[0035] 然后重复将干扰信号导向矢量在信号子空间和干扰子空间上进行投影, 直至第 $i+1$ 次投影后的干扰信号的导向矢量与第 i 次投影后的干扰信号的导向矢量相等, 得到收敛的最终投影导向矢量。

[0036] 示例性的, 最终投影导向矢量满足下述公式:

$$[0037] \quad \hat{\mathbf{a}}_\infty = \mathbf{P}_D \mathbf{P}_E \hat{\mathbf{a}}_\infty$$

[0038] 其中, $\hat{\mathbf{a}}_\infty$ 为最终投影导向矢量。

[0039] 示例性的, $i=0, 1, 2, \dots$, 未进行投影的干扰信号的导向矢量, 即投影的初始导向矢量 $\mathbf{a}_0$ 为假设干扰信号导向矢量 $\bar{\mathbf{a}}_j$ 。

[0040] 在第一方面的一种可能的实现方式中, 可以根据最终投影导向矢量, 估计得到干扰信号的估计导向矢量; 根据干扰信号的估计导向矢量, 确定干扰加噪声协方差矩阵; 根据干扰加噪声协方差矩阵和样本协方差矩阵, 确定期望信号的误差向量; 根据误差向量, 确定期望信号的导向矢量; 根据期望信号的导向矢量和干扰加噪声协方差矩阵, 形成稳健波束。

[0041] 示例性的, 干扰信号的估计导向矢量可以满足下述公式:

$$[0042] \quad \hat{\mathbf{a}}_j = \sqrt{M} \hat{\mathbf{a}}_\infty$$

[0043] 其中, $\hat{\mathbf{a}}_j$ 为干扰信号的估计导向矢量, $\hat{\mathbf{a}}_\infty$ 为最终投影导向矢量, M 为获取回波信号的天线阵列的阵元个数。

[0044] 示例性的, 期望信号的误差向量可以满足下述公式:

$$\min_{\mathbf{e}_\perp} (\bar{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp)^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} (\bar{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp)$$

$$[0045] \quad \text{s.t.} \quad \bar{\mathbf{a}}_0^H \mathbf{e}_\perp = 0$$

$$(\bar{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp)^H \tilde{\mathbf{R}}_{i+n} (\bar{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp) \leq \bar{\mathbf{a}}_0^H \tilde{\mathbf{R}}_{i+n} \bar{\mathbf{a}}_0$$

[0046] 其中, $\bar{\mathbf{a}}_0$ 为假设期望信号导向矢量, $\mathbf{e}_\perp$ 为期望信号的误差向量, $\hat{\mathbf{R}}$ 为样本协方差矩阵, $\tilde{\mathbf{R}}_{i+n}$ 为重构的干扰加噪声协方差矩阵。

[0047] 示例性的, 期望信号的导向矢量可以满足下述公式:

$$[0048] \quad \hat{\mathbf{a}}_0 = \bar{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp$$

[0049] 其中, $\hat{\mathbf{a}}_0$ 为期望信号的导向矢量。

[0050] 示例性的, 稳健波束的阵列加权系数可以满足下述公式:

$$[0051] \quad \hat{\mathbf{w}} = \frac{\tilde{\mathbf{R}}_{i+n}^{-1} \hat{\mathbf{a}}_0}{\hat{\mathbf{a}}_0^H \tilde{\mathbf{R}}_{i+n}^{-1} \hat{\mathbf{a}}_0}$$

[0052] 其中, $\hat{\mathbf{w}}$ 为稳健波束的阵列加权系数。

[0053] 在第一方面的一种可能的实现方式中, 可以根据回波信号的样本协方差矩阵的最大特征值, 对干扰信号的功率进行过估计, 对应得到干扰信号的过估计功率; 根据干扰信号的过估计功率和估计导向矢量, 确定干扰加噪声协方差矩阵。

[0054] 在第一方面的一种可能的实现方式中, 干扰加噪声协方差矩阵可以满足下述公式:

$$[0055] \quad \tilde{\mathbf{R}}_{i+n} = p_{\max} \sum_{j=1}^J \hat{\mathbf{a}}_j \hat{\mathbf{a}}_j^H + \hat{\sigma}_n^2$$

$$[0056] \quad p_{\max} = \frac{\alpha_1}{M}$$

[0057] 其中, $\tilde{\mathbf{R}}_{i+n}$ 为重构的干扰加噪声协方差矩阵, α_1 为回波信号的样本协方差矩阵的最大特征值, $\hat{\mathbf{a}}_j$ 为干扰信号的估计导向矢量, $p_{\max}$ 为过估计功率, $\hat{\sigma}_n^2$ 为噪声的估计功率。

[0058] 根据本发明提供的方法, 通过将假设干扰信号导向矢量分别在信号子空间和干扰子空间进行多次投影, 能够有效削弱阵列位置误差、阵元幅相误差等阵列校正误差和阵列结构误差对波束形成性能的影响, 实现稳健波束的形成。进一步的, 通过对干扰信号的功率进行适当的过估计, 能够增强对干扰信号的抑制。

[0059] 本发明实施例与现有技术相比存在的有益效果是: 根据本发明提供的方法, 通过将假设干扰信号导向矢量分别在信号子空间和干扰子空间进行多次投影, 能够有效削弱阵列位置误差、阵元幅相误差等阵列校正误差和阵列结构误差对干扰信号的影响, 实现稳健

波束的形成。

附图说明

[0060] 图1为本发明实施例提供的一种基于干扰信号导向矢量估计的稳健波束形成方法的流程示意图；

[0061] 图2为本发明实施例提供的一种基于干扰信号导向矢量估计的稳健波束形成方法的流程示意图；

[0062] 图3为本发明实施例提供的一种波束形成输出的信干噪比随输入信噪比的变化曲线示意图；

[0063] 图4为本发明实施例提供的另一种波束形成输出的信干噪比随输入信噪比的变化曲线示意图；

[0064] 图5为本发明实施例提供的又一种波束形成输出的信干噪比随输入信噪比的变化曲线示意图。

具体实施方式

[0065] 以下描述中,为了说明而不是为了限定,提出了诸如特定系统结构、技术之类的具体细节,以便透彻理解本发明实施例。然而,本领域的技术人员应当清楚,在没有这些具体细节的其它实施例中也可以实现本发明。在其它情况中,省略对众所周知的系统、装置、电路以及方法的详细说明,以免不必要的细节妨碍本发明的描述。

[0066] 应当理解,当在本发明说明书和所附权利要求书中使用时,术语“包括”指示所描述特征、整体、步骤、操作、元素和/或组件的存在,但并不排除一个或多个其它特征、整体、步骤、操作、元素、组件和/或其集合的存在或添加。

[0067] 还应当理解,在本发明说明书和所附权利要求书中使用的术语“和/或”是指相关联列出的项中的一个或多个的任何组合以及所有可能组合,并且包括这些组合。

[0068] 如在本发明说明书和所附权利要求书中所使用的那样,术语“如果”可以依据上下文被解释为“当...时”或“一旦”或“响应于确定”或“响应于检测到”。类似地,短语“如果确定”或“如果检测到[所描述条件或事件]”可以依据上下文被解释为意指“一旦确定”或“响应于确定”或“一旦检测到[所描述条件或事件]”或“响应于检测到[所描述条件或事件]”。

[0069] 另外,在本发明说明书和所附权利要求书的描述中,术语“第一”、“第二”、“第三”等仅用于区分描述,而不能理解为指示或暗示相对重要性。

[0070] 在本发明说明书中描述的参考“一个实施例”或“一些实施例”等意味着在本发明的一个或多个实施例中包括结合该实施例描述的特定特征、结构或特点。由此,在本说明书中的不同之处出现的语句“在一个实施例中”、“在一些实施例中”、“在其他一些实施例中”、“在另外一些实施例中”等不是必然都参考相同的实施例,而是意味着“一个或多个但不是所有的实施例”,除非是以其他方式另外特别强调。术语“包括”、“包含”、“具有”及它们的变形都意味着“包括但不限于”,除非是以其他方式另外特别强调。

[0071] 本发明实施例提供的稳健波束形成方法可以应用于超级计算机和笔记本电脑等处理设备,本发明实施例对处理设备的具体类型不作任何限制。

[0072] 图1示出了本发明实施例提供的一种基于干扰信号导向矢量估计的稳健波束形成

方法的示意性流程图。作为示例而非限定,该方法可以应用上述处理设备中。方法100可以包括步骤S101-S104,下面对各步骤进行说明。

[0073] S101,根据回波信号的样本协方差矩阵,确定信号子空间的投影矩阵。

[0074] 在一些实施例中,在确定信号子空间的投影矩阵之前,可以先进行步骤S1011,根据回波信号确定回波信号的样本协方差矩阵。

[0075] S1011,根据回波信号,确定回波信号的样本协方差矩阵。

[0076] 若获取回波信号的天线阵列是阵元个数为M的均匀线阵,两相邻阵元的间距为 0.5λ , λ 为信号波长;则天线阵列在第k时刻接收到的回波信号的信号向量满足下述公式:

$$[0077] \quad \mathbf{x}(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_M(k)]^T$$

[0078] 其中, $\mathbf{x}(k)$ 为天线阵列在第k时刻接收到的回波信号的信号向量, $x_i(k)$ ($i=1, 2, \dots, M$)为第i个阵元接收到的信号。

[0079] 若有一个期望信号和J个干扰信号分别从角度 $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_J$ 入射天线阵列,且噪声为均值为0,方差为 σ_n^2 的高斯白噪声,则天线阵列在第k时刻接收到的回波信号的信号向量可以满足下述公式:

$$[0080] \quad \mathbf{x}(k) = s_0(k)\mathbf{a}_0(\theta_0) + \sum_{j=1}^J s_j(k)\mathbf{a}_j(\theta_j) + \mathbf{n}(k)$$

[0081] 其中, $\mathbf{n}(k)$ 为k时刻的噪声数据, $\mathbf{a}_0$ 为期望信号的导向矢量, $\mathbf{a}_j$ 为第j个干扰信号的导向矢量, s_0 为期望信号的幅度, s_j 为第j个干扰信号的幅度。

[0082] 示例性的,干扰信号或者期望信号的导向矢量均可以满足下述公式:

$$[0083] \quad \mathbf{a}_i = [1, e^{j2\pi d \sin(\theta_i)/\lambda}, \dots, e^{j2\pi(M-1)d \sin(\theta_i)/\lambda}]^H$$

[0084] 其中, $\mathbf{a}_i$ 为干扰信号或者期望信号的导向矢量, θ_i 为干扰信号或者期望信号的角度,d为天线阵列的阵元间距, λ 为回波信号的波长。

[0085] 在一个示例中,可以通过下述公式,根据回波信号,确定回波信号的样本协方差矩阵:

$$[0086] \quad \hat{\mathbf{R}} = 1/K \sum_{k=1}^K \mathbf{x}(k)\mathbf{x}^H(k)$$

[0087] 其中, $\hat{\mathbf{R}}$ 为样本协方差矩阵,K为快拍数, $\mathbf{x}(k)$ 为天线阵列在第k时刻接收到的回波信号的信号向量。

[0088] 在一些实施例中,一般来说,回波信号中包含期望信号部分,因此当期望信号导向矢量存在误差时,求解Capon阵列加权系数后,阵列波束形成会产生信号相消现象,而且当输入SNR较大时,这种现象更明显。因此,可以通过从回波信号中分离出干扰信号和期望信号来避免该类现象出现。

[0089] 在一种可能的实现方式中,可以根据回波信号的样本协方差矩阵确定信号子空间的投影矩阵,先初步分离回波信号中的噪声。

[0090] 在一个示例中,可以通过步骤S1012-S1013,根据回波信号的样本协方差矩阵,确定信号子空间的投影矩阵。

[0091] S1012,对样本协方差矩阵进行特征值分解处理,得到信号子空间。

[0092] 示例性的,信号子空间包括干扰信号和期望信号。

[0093] 在一个示例中,可以通过下述第一特征值分解模型对样本协方差矩阵进行特征值

分解:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}} &= \sum_{i=1}^M \alpha_i \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H \\ [0094] \quad &= \mathbf{E}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{E}_s^H + \mathbf{E}_n \mathbf{\Lambda}_n \mathbf{E}_n^H \end{aligned}$$

$$[0095] \quad \mathbf{E}_s = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_{J+1}]$$

$$[0096] \quad \mathbf{\Lambda}_s = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{J+1})$$

$$[0097] \quad \mathbf{E}_n = [\mathbf{e}_{J+2}, \mathbf{e}_{J+3}, \dots, \mathbf{e}_M]$$

$$[0098] \quad \mathbf{\Lambda}_n = \text{diag}(\alpha_{J+2}, \alpha_{J+3}, \dots, \alpha_M)$$

[0099] 其中, $\mathbf{e}_i$ 为样本协方差矩阵的特征向量; α_i 为样本协方差矩阵中特征向量 $\mathbf{e}_i$ 对应的特征值; 并且特征值按照数值大小降序排列, 即 $\alpha_1 \geq \alpha_2 \geq \dots \geq \alpha_M$; $\mathbf{E}_s$ 为信号子空间, 由样本协方差矩阵中较大的特征值对应的特征向量构成, $\mathbf{\Lambda}_s$ 为信号子空间的特征向量对应的特征值; $\mathbf{E}_n$ 为第一噪声子空间, 由样本协方差矩阵中较小的特征值对应的特征向量构成, $\mathbf{\Lambda}_n$ 为第一噪声子空间的特征向量对应的特征值。

[0100] 示例性的, 由于噪声相对于干扰信号和期望信号的幅度较小, 回波信号中包括 J 个干扰信号和 1 个期望信号, 所以构成信号子空间的第一投影矩阵的特征向量对应的特征值为样本协方差矩阵的特征值中的前 $J+1$ 个较大的特征值。构成第一噪声子空间的特征向量为后 $M-J-1$ 个较小特征值对应的特征向量。

[0101] S1013, 根据信号子空间, 确定信号子空间的投影矩阵。

[0102] 示例性的, 可以通过下述公式, 根据信号子空间, 确定信号子空间的投影矩阵:

$$[0103] \quad \mathbf{P}_E = \mathbf{E}_s \mathbf{E}_s^H$$

[0104] 其中, $\mathbf{P}_E$ 为信号子空间的投影矩阵。

[0105] S102, 根据干扰信号的协方差矩阵, 确定干扰子空间的投影矩阵。

[0106] 在一些实施例中, 在确定干扰子空间的投影矩阵之前, 可以先进行步骤 S1021, 通过在环形不确定集上对期望信号角度区域外的空域能量谱 (即 Capon 功率谱) 进行积分, 得到干扰信号的协方差矩阵。

[0107] S1021, 在不确定集上对阵列信号导向矢量进行环形积分, 得到干扰信号的协方差矩阵。

[0108] 示例性的, 不确定集满足下述公式:

$$[0109] \quad \mathcal{S}_a(\theta) = \{ \mathbf{a} \mid \|\bar{\mathbf{a}}(\theta) - \mathbf{a}\|_2 \leq \varepsilon \}$$

[0110] 其中, $\mathcal{S}_a(\theta)$ 为不确定集, $\bar{\mathbf{a}}(\theta)$ 为假设干扰信号导向矢量, ε 为常数, $\mathbf{a}$ 为导向矢量变量, $\|\cdot\|$ 表示取模值, 为了避免模糊, 规定 $\|\bar{\mathbf{a}}(\theta)\|_2 \leq \sqrt{M}$ 。

[0111] 示例性的, 假设干扰信号导向矢量是在假设获取回波信号的天线阵列不存在阵列误差, 即理想状态的条件下, 根据天线阵列的阵列结构信息得到的。

[0112] 在一个示例中, 可以通过下述公式, 在不确定集上对阵列信号导向矢量进行积分, 得到干扰信号的协方差矩阵:

$$[0113] \quad \hat{\mathbf{R}}_j = \int_{S_a(\theta \in \Theta_j)} \frac{\mathbf{a}\mathbf{a}^H}{\mathbf{a}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{a}} d\nu$$

[0114] 其中, $\hat{\mathbf{R}}_j$ 为第 j 个干扰信号的协方差矩阵, $\mathbf{a}$ 为阵列信号导向矢量, $\hat{\mathbf{R}}$ 为样本协方差矩阵。

[0115] 在一些实施例中, 由于对不确定集的积分操作会导致噪声的积累, 因此可以通过步骤 S1022-S1023, 根据干扰信号的协方差矩阵, 确定干扰子空间的投影矩阵, 进一步去除噪声。

[0116] 示例性的, 干扰子空间只包括干扰信号。

[0117] S1022, 对干扰信号的协方差矩阵进行特征值分解处理, 得到干扰子空间。

[0118] 在一种可能的实现方式中, 可以通过下述第二特征分解模型对干扰信号的协方差矩阵进行特征值分解:

$$[0119] \quad \begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_j &= \sum_{i=1}^M \gamma_{i-j} \mathbf{e}_{i-j} \mathbf{e}_{i-j}^H \\ &= \mathbf{D}_{s-j} \mathbf{A}_{s-j} \mathbf{D}_{s-j}^H + \mathbf{D}_{n-j} \mathbf{A}_{n-j} \mathbf{D}_{n-j}^H \end{aligned}$$

$$[0120] \quad \mathbf{D}_{s-j} = [\mathbf{e}_{1-j}, \mathbf{e}_{2-j}, \dots, \mathbf{e}_Q]$$

$$[0121] \quad \mathbf{A}_{s-j} = \text{diag}(\gamma_{1-j}, \gamma_{2-j}, \dots, \gamma_{Q-j})$$

$$[0122] \quad \mathbf{D}_{n-j} = [\mathbf{e}_{Q+1}, \mathbf{e}_{Q+2}, \dots, \mathbf{e}_M]$$

$$[0123] \quad \mathbf{A}_{n-j} = \text{diag}(\alpha_{Q+1}, \alpha_{Q+2}, \dots, \alpha_M)$$

[0124] 其中, $\mathbf{e}_{i-j}$ 为干扰信号的协方差矩阵的特征向量; γ_{i-j} 为干扰信号的协方差矩阵的特征向量 $\mathbf{e}_{i-j}$ 对应的特征值; 类似的, 干扰信号的协方差矩阵的特征值按照大小降序排列, 即 $\gamma_{1-j} \geq \gamma_{2-j} \geq \dots \geq \gamma_{M-j}$; $\mathbf{D}_{s-j}$ 为干扰子空间, 由干扰信号的协方差矩阵中较大的特征值对应的特征向量构成, $\mathbf{A}_{s-j}$ 为干扰子空间的特征向量对应的特征值, $\mathbf{D}_{n-j}$ 为第二噪声子空间, 由干扰信号的协方差矩阵中较小的特征值对应的特征向量构成的, $\mathbf{A}_{n-j}$ 为第二噪声子空间的特征向量对应的特征值。

[0125] 示例性的, 由于干扰信号的幅度大于噪声, 因此干扰子空间的第一投影矩阵中包括的特征向量对应的特征值为干扰信号的协方差矩阵的特征值中的前 Q 个较大的特征值, 干扰子空间投影矩阵的特征向量为这前 Q 个较大的特征值对应的特征向量。

[0126] 在一个示例中, Q 的数值可以为满足下述不等式的最小正整数:

$$[0127] \quad \sum_{i=1}^Q |\gamma_{i-j}|^2 / \sum_{i=1}^M |\gamma_{i-j}|^2 \geq \rho$$

[0128] 其中, ρ 为常数, $\rho \in [0, 1]$ 。

[0129] S1023, 根据干扰子空间, 确定干扰子空间的投影矩阵。

[0130] 示例性的, 可以通过下述公式, 根据第一投影矩阵, 确定干扰子空间的投影矩阵:

$$[0131] \quad \mathbf{P}_D = \mathbf{D}_{s-j} \mathbf{D}_{s-j}^H$$

[0132] 其中, $\mathbf{P}_D$ 为干扰子空间的投影矩阵。

[0133] S103, 通过信号子空间和干扰子空间的投影矩阵, 将假设干扰信号导向矢量分别在信号子空间和所述干扰子空间上进行多次投影, 得到最终投影导向矢量。

[0134] 在一些实施例中,可以通过信号子空间和干扰子空间的投影矩阵,将假设干扰信号导向矢量分别在信号子空间和干扰子空间上进行多次投影,从而有效削弱阵列位置误差、阵元幅相误差等阵列校正误差和阵列结构误差对阵列导向矢量的影响,得到最终投影导向矢量。

[0135] 示例性的,可以通过步骤S1031-S1033,将假设干扰信号导向矢量分别在信号子空间和所述干扰子空间上进行多次投影,得到最终投影导向矢量。

[0136] S1031,将第*i*次投影后的干扰信号的导向矢量依次左乘信号子空间的投影矩阵和干扰子空间的投影矩阵,以将干扰信号导向矢量在信号子空间和干扰子空间上进行第*i*+1次投影,对应得到第*i*+1次投影后的干扰信号的导向矢量。

[0137] 示例性的, $i=0,1,2,\dots$,未进行投影的干扰信号的导向矢量,即投影的初始导向矢量 $\mathbf{a}_0$ 为假设干扰信号导向矢量 $\bar{\mathbf{a}}_j$ 。

[0138] 示例性的,第*i*+1次投影后的干扰信号的导向矢量满足下述公式:

$$[0139] \quad \mathbf{a}_{i+1} = \mathbf{P}_D \mathbf{P}_E \mathbf{a}_i$$

[0140] 其中, $\mathbf{a}_{i+1}$ 为第*i*+1次投影后的干扰信号的导向矢量, $\mathbf{a}_i$ 为第*i*次投影后的干扰信号的导向矢量, $\mathbf{P}_E$ 为信号子空间的投影矩阵, $\mathbf{P}_D$ 为干扰子空间的投影矩阵;

[0141] 举例来说,当*i*=0时,可以将假设干扰信号导向矢量左乘信号子空间的投影矩阵,得到假设干扰信号导向矢量在信号子空间的投影,即 $\hat{\mathbf{a}}(\theta) = \mathbf{E}_s \mathbf{E}_s^H \bar{\mathbf{a}}(\theta)$,其中, $\hat{\mathbf{a}}(\theta)$ 为假设干扰信号导向矢量在信号子空间的投影。然后再给其在信号子空间的投影左乘干扰子空间的投影矩阵,得到其在干扰子空间的投影,即 $\hat{\mathbf{a}}(\theta_j) = \mathbf{D}_{s-j} \mathbf{D}_{s-j}^H \hat{\mathbf{a}}(\theta_j)$,其中 $\hat{\mathbf{a}}(\theta_j) = \hat{\mathbf{a}}_1$ 为进行1次投影后的干扰信号的导向矢量。

[0142] S1032,确定第*i*次投影后的干扰信号的导向矢量是否与第*i*+1次投影后的干扰信号的导向矢量相等。

[0143] 在一种可能的实现方式中,若第*i*次投影后的干扰信号的导向矢量与第*i*+1次投影后的干扰信号的导向矢量相等,则得到了收敛的最终投影导向矢量;可以进行步骤S1033。

[0144] 在另一种可能的实现方式中,若第*i*次投影后的干扰信号的导向矢量与第*i*+1次投影后的干扰信号的导向矢量不相等,则*i*=*i*+1,进行步骤S1031。

[0145] S1033,将第*i*+1次投影后的干扰信号的导向矢量确定为最终投影导向矢量。

[0146] 示例性的,最终投影导向矢量满足下述公式:

$$[0147] \quad \hat{\mathbf{a}}_\infty = \mathbf{P}_D \mathbf{P}_E \hat{\mathbf{a}}_\infty = \mathbf{D}_{s-j} \mathbf{D}_{s-j}^H \mathbf{E}_s \mathbf{E}_s^H \hat{\mathbf{a}}_\infty$$

[0148] 其中, $\hat{\mathbf{a}}_\infty$ 为最终投影导向矢量。

[0149] 示例性的,根据上述公式可以得出,最终投影导向矢量可以由矩阵 $\mathbf{D}_{s-j} \mathbf{D}_{s-j}^H \mathbf{E}_s \mathbf{E}_s^H$ 中对应的特征值为1的特征向量组成,即最终投影导向矢量还满足下述公式:

$$[0150] \quad \hat{\mathbf{a}}_\infty = \Upsilon(\mathbf{D}_{s-j} \mathbf{D}_{s-j}^H \mathbf{E}_s \mathbf{E}_s^H)$$

[0151] 其中, $\Upsilon(\cdot)$ 表示取矩阵特征值为1的特征向量。

[0152] S104,根据最终投影导向矢量,估计得到干扰信号的估计导向矢量,并根据干扰信号的估计导向矢量,形成稳健波束。

[0153] 在一些实施例中,可以通过步骤S1041-S1045,根据最终投影导向矢量,估计得到干扰信号的估计导向矢量,并根据干扰信号的估计导向矢量,形成稳健波束。

[0154] S1041,根据最终投影导向矢量,估计得到干扰信号的估计导向矢量。

[0155] 示例性的,干扰信号的估计导向矢量可以满足下述公式:

$$[0156] \quad \hat{\mathbf{a}}_j = \sqrt{M} \hat{\mathbf{a}}_\infty$$

[0157] 其中, $\hat{\mathbf{a}}_j$ 为干扰信号的估计导向矢量。

[0158] S1042,根据估计导向矢量,确定干扰加噪声协方差矩阵。

[0159] 在一种可能的实现方式中,可以根据回波信号的样本协方差矩阵的最大特征值对干扰信号的功率进行适当过估计,得到干扰信号的过估计功率。然后根据干扰信号的过估计功率和估计导向矢量,确定干扰加噪声协方差矩阵,这样能够增强对干扰信号抑制,并且通过单一数值对干扰信号功率进行过估计能够减少计算量。

[0160] 示例性的,根据未进行过估计的干扰信号的功率和未进行投影操作修正误差的干扰信号的导向矢量得到的真实干扰加噪声协方差矩阵满足下述公式:

$$[0161] \quad \mathbf{R}_{i+n} = \sum_{j=1}^J \sigma_j^2 \mathbf{a}_j \mathbf{a}_j^H + \sigma_n^2$$

[0162] 其中, $\mathbf{R}_{i+n}$ 为真实干扰加噪声协方差矩阵, σ_j^2 为干扰信号的真实功率, $\mathbf{a}_j$ 为干扰信号的真实导向矢量。

[0163] 在一个示例中,经过适当过估计得到的干扰信号的过估计功率满足下述公式:

$$[0164] \quad \hat{\sigma}_j^2 (j=1, \dots, J) = \frac{\alpha_1}{M} = p_{\max}$$

[0165] 其中, α_1 为回波信号样本协方差矩阵的最大的特征值, $p_{\max}$ 、 $\hat{\sigma}_j^2 (j=1, \dots, J)$ 均为干扰信号的过估计功率。

[0166] 示例性的,干扰加噪声协方差矩阵满足下述公式:

$$[0167] \quad \tilde{\mathbf{R}}_{i+n} = p_{\max} \sum_{j=1}^J \hat{\mathbf{a}}_j \hat{\mathbf{a}}_j^H + \hat{\sigma}_n^2$$

[0168] 其中, $\tilde{\mathbf{R}}_{i+n}$ 为干扰加噪声协方差矩阵, $\hat{\sigma}_n^2$ 为噪声的估计功率,其大小为 α_M ,即样本协方差矩阵最小的特征值。

[0169] S1043,根据干扰加噪声协方差矩阵和样本协方差矩阵,确定期望信号的误差向量。

[0170] 在一个示例中,可以通过下述凸优化问题,根据干扰加噪声协方差矩阵和样本协方差矩阵,估计期望信号的误差向量:

$$\min_{\mathbf{e}_\perp} (\bar{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp)^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} (\bar{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp)$$

$$[0171] \quad \text{s.t. } \bar{\mathbf{a}}_0^H \mathbf{e}_\perp = 0$$

$$(\bar{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp)^H \tilde{\mathbf{R}}_{i+n} (\bar{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp) \leq \bar{\mathbf{a}}_0^H \tilde{\mathbf{R}}_{i+n} \bar{\mathbf{a}}_0$$

[0172] 其中, $\bar{\mathbf{a}}_0$ 为假设期望信号导向矢量, $\mathbf{e}_\perp$ 为期望信号的误差向量, $\hat{\mathbf{R}}$ 为样本协方差矩

阵, $\tilde{\mathbf{R}}_{i+n}$ 为重构的干扰加噪声协方差矩阵。

[0173] 示例性的, 假设期望信号导向矢量是在假设获取回波信号的天线阵列不存在阵列误差, 即理想状态的条件下, 根据天线阵列的阵列结构信息得到的。

[0174] S1044, 根据误差向量, 确定期望信号的导向矢量。

[0175] 示例性的, 期望信号的导向矢量满足下述公式:

$$[0176] \quad \hat{\mathbf{a}}_0 = \bar{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp$$

[0177] 其中, $\hat{\mathbf{a}}_0$ 为期望信号的导向矢量。

[0178] S1045, 根据期望信号的导向矢量, 形成稳健波束。

[0179] 在一种可能的实现方式中, 可以将干扰加噪声协方差矩阵和期望信号的导向矢量代入Capon解中, 得到阵列加权系数矢量。然后根据阵列加权系数矢量, 形成稳健波束。

[0180] 示例性的, 阵列加权系数矢量满足下述公式:

$$[0181] \quad \hat{\mathbf{w}} = \frac{\tilde{\mathbf{R}}_{i+n}^{-1} \hat{\mathbf{a}}_0}{\hat{\mathbf{a}}_0^H \tilde{\mathbf{R}}_{i+n}^{-1} \hat{\mathbf{a}}_0}$$

[0182] 其中, $\hat{\mathbf{w}}$ 为阵列加权系数矢量。

[0183] 示例性的, 形成的稳健波束满足下述公式:

$$[0184] \quad \mathbf{B}(\theta) = \hat{\mathbf{w}}^H \mathbf{a}(\theta) \quad (\theta = [-90^\circ, 90^\circ])$$

$$[0185] \quad \mathbf{a}(\theta) = \left[1, e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta)}, \dots, e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (M-1) d \sin(\theta)} \right]^H$$

[0186] 其中, $\mathbf{B}(\theta)$ 为波束, d 为获取回波信号的天线阵列的间距, λ 为回波信号的波长, θ 为空域角度。

[0187] 根据本发明提供的方法, 通过将假设干扰信号导向矢量分别在信号子空间和干扰子空间进行多次投影, 能够有效削弱阵列位置误差、阵元幅相误差等阵列校正误差和阵列结构误差对波束形成性能的影响, 实现稳健波束的形成。进一步的, 通过对干扰信号的功率进行适当的过估计, 能够增强对干扰信号的抑制。

[0188] 图2示出的是本发明实施例提供的一种基于干扰信号导向矢量估计的稳健波束形成方法。作为示例而非限定, 方法200可以是方法100的一种可能的具体实现方式。方法200可以包括S201-S2015, 下面对各步骤做以说明。

[0189] S201, 根据回波信号, 确定回波信号的样本协方差矩阵。

[0190] S202, 对样本协方差矩阵进行特征值分解处理, 得到信号子空间。

[0191] S203, 根据信号子空间, 确定信号子空间的投影矩阵。

[0192] 示例性的, 方法200中的步骤S201-S203与方法100中的步骤S101的内容相同, 具体请参考方法100中对步骤S101的描述, 在此不赘述。

[0193] S204, 在不确定集上对阵列信号导向矢量进行环形积分, 得到干扰信号的协方差矩阵。

[0194] S205, 对干扰信号的协方差矩阵进行特征值分解处理, 得到干扰子空间。

[0195] S206, 根据干扰子空间, 确定干扰子空间的投影矩阵。

[0196] 示例性的,方法200中的步骤S204-S206与方法100中的步骤S102的内容相同,具体请参考方法100中对步骤S102的描述,在此不赘述。

[0197] 可选地,本发明不限定执行步骤S201-S203,确定信号子空间的投影矩阵;和步骤S204-S206干扰子空间的投影矩阵的先后顺序,只要在对干扰信号的导向矢量进行投影前确定信号子空间的投影矩阵和干扰子空间的投影矩阵即可。

[0198] S207,将第 i 次投影后的干扰信号的导向矢量依次左乘信号子空间的投影矩阵和干扰子空间的投影矩阵,以将干扰信号导向矢量在信号子空间和干扰子空间上进行第 $i+1$ 次投影,对应得到第 $i+1$ 次投影后的干扰信号的导向矢量。

[0199] S208,确定第 i 次投影后的干扰信号的导向矢量是否与第 $i+1$ 次投影后的干扰信号的导向矢量相等。

[0200] S209,将第 $i+1$ 次投影后的干扰信号的导向矢量确定为最终投影导向矢量。

[0201] 示例性的,方法200中的步骤S207-S209与方法100中的步骤S103的内容相同,具体请参考方法100中对步骤S103的描述,在此不赘述。

[0202] S210,根据最终投影导向矢量,估计得到干扰信号的估计导向矢量。

[0203] S211,根据回波信号的样本协方差矩阵的最大特征值对干扰信号的功率进行过估计,得到干扰信号的过估计功率。

[0204] S212,根据干扰信号的过估计功率和估计导向矢量,确定干扰加噪声协方差矩阵。

[0205] S213,根据干扰加噪声协方差矩阵和样本协方差矩阵,确定期望信号的误差向量。

[0206] S214,根据误差向量,确定期望信号的导向矢量。

[0207] S215,根据期望信号的导向矢量,形成稳健波束。

[0208] 示例性的,方法200中的步骤S210-S215与方法100中的步骤S104的内容相同,具体请参考方法100中对步骤S104的描述,在此不赘述。

[0209] 图3示出的是本发明实施例提供的在存在阵列随机角度观测误差的场景下,阵列的输出信干噪比随阵列输入信噪比的变化曲线示意图。

[0210] 参见图3,图3中的(a)为阵列的输出信干噪比随着天线阵列获取的回波信号的信噪比的变化趋势图,图3中的(b)为阵列的输出信干噪比随着天线阵列获取的回波信号的快拍数的变化趋势图。参见图3,可以看出,在存在阵列随机观测角度误差的场景下根据本发明提供的方法,阵列的输出信干噪比更高。

[0211] 图4示出的是本发明实施例提供的在存在阵列矫正误差的场景下,阵列的输出信干噪比随阵列输入信噪比的变化曲线示意图。

[0212] 参见图4,图4中的(a)为阵列的输出信干噪比随着天线阵列获取的回波信号的信噪比的变化趋势图,图4中的(b)为阵列的输出信干噪比随着天线阵列获取的回波信号的快拍数的变化趋势图。由图4可以看出,相较于现有的方法,根据本发明提供的方法,阵列的输出信干噪比有明显的提升。

[0213] 图5示出的是本发明实施例提供的在存在阵列阵元幅相误差的场景下,阵列的输出信干噪比随阵列输入信噪比的变化曲线示意图。

[0214] 参见图5,图5中的(a)为阵列的输出信干噪比随着天线阵列获取的回波信号的信噪比的变化趋势图,图5中的(b)为阵列的输出信干噪比随着天线阵列获取的回波信号的快拍数的变化趋势图。由图5可以看出,相较于现有的方法,根据本发明提供的方法,阵列的输

出信干噪比更大。

[0215] 根据本发明提供的方法,通过将假设干扰信号导向矢量在分别在信号子空间和干扰子空间进行多次投影,能够有效削弱阵列位置误差、阵元幅相误差等阵列校正误差和阵列结构误差对波束形成性能的影响,实现稳健波束的形成。进一步的,通过对干扰信号的功率进行适当的过估计,能够增强对干扰信号的抑制。

[0216] 在上述实施例中,对各个实施例的描述都各有侧重,某个实施例中未详述或记载的部分,可以参见其它实施例的相关描述。

[0217] 本领域普通技术人员可以意识到,结合本文中所公开的实施例描述的各示例的单元及算法步骤,能够以电子硬件、或者计算机软件和电子硬件的结合来实现。这些功能究竟以硬件还是软件方式来执行,取决于技术方案的特定应用和设计约束条件。专业技术人员可以对每个特定的应用来使用不同方法来实现所描述的功能,但是这种实现不应认为超出本发明的范围。

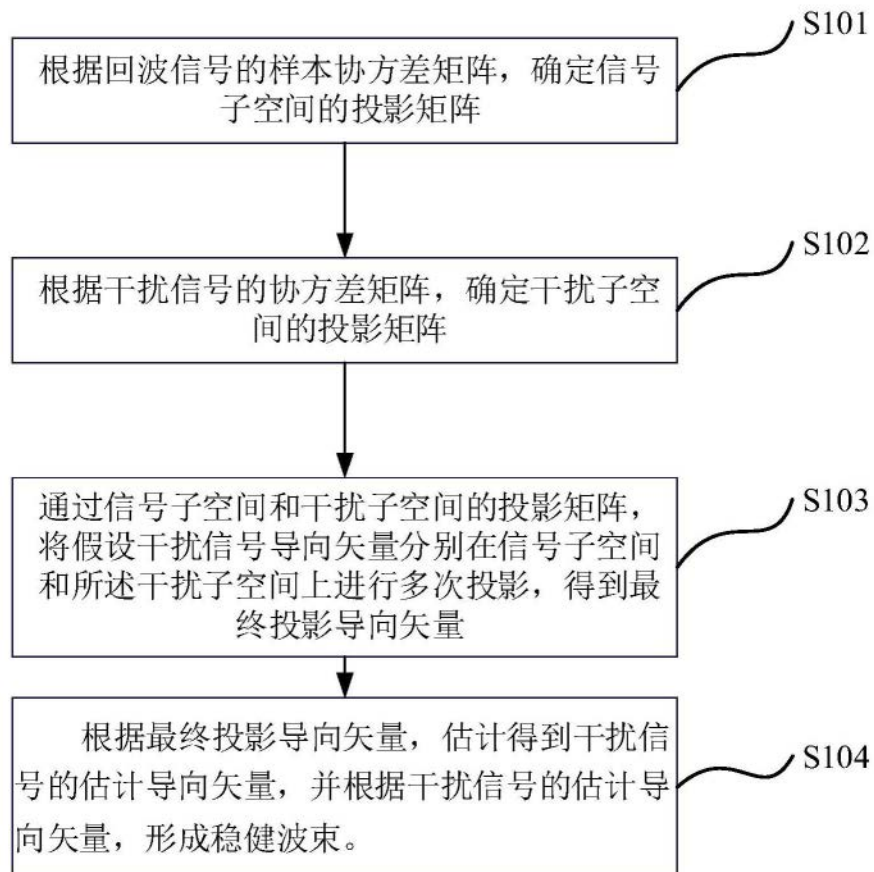
100

图1

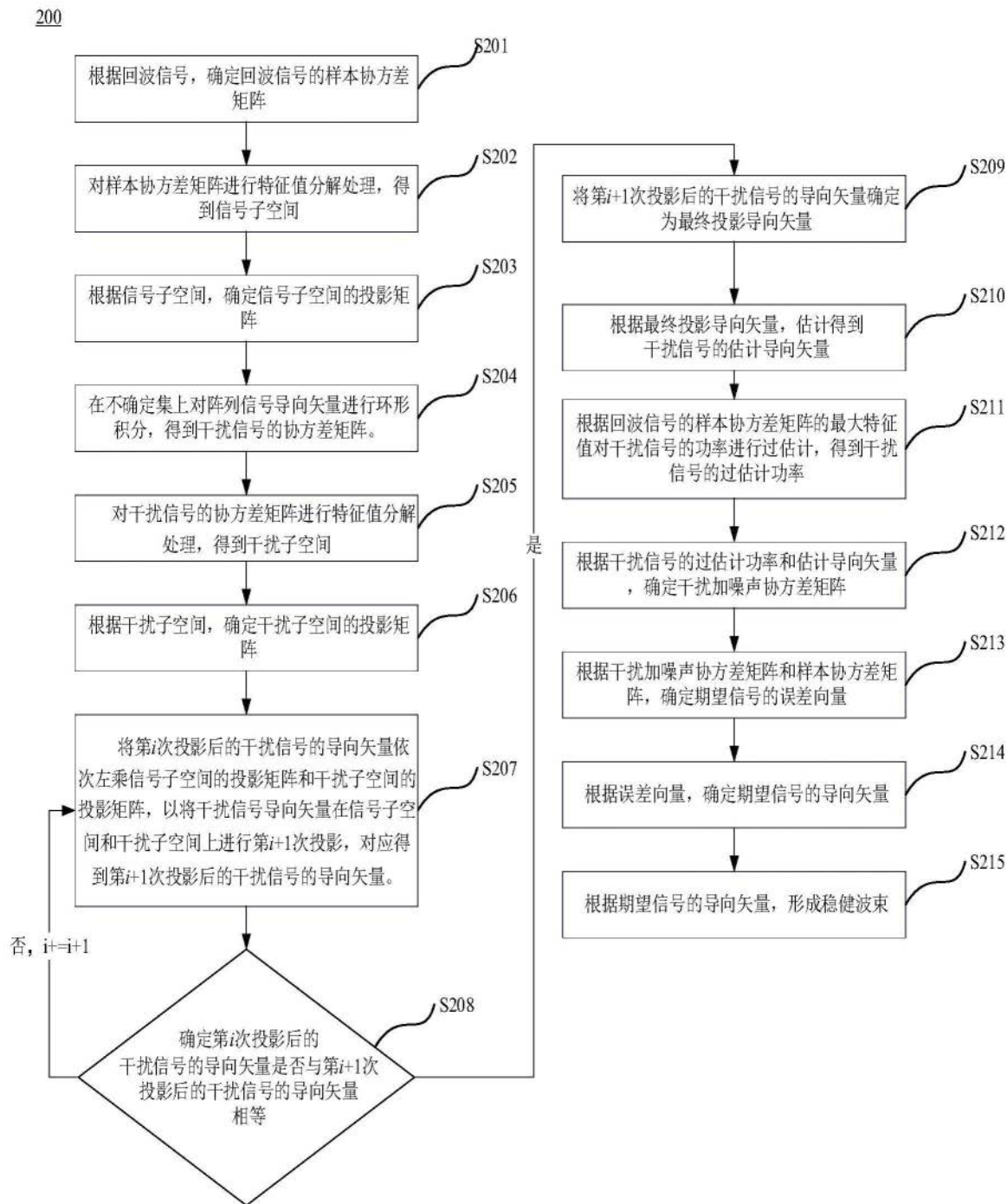
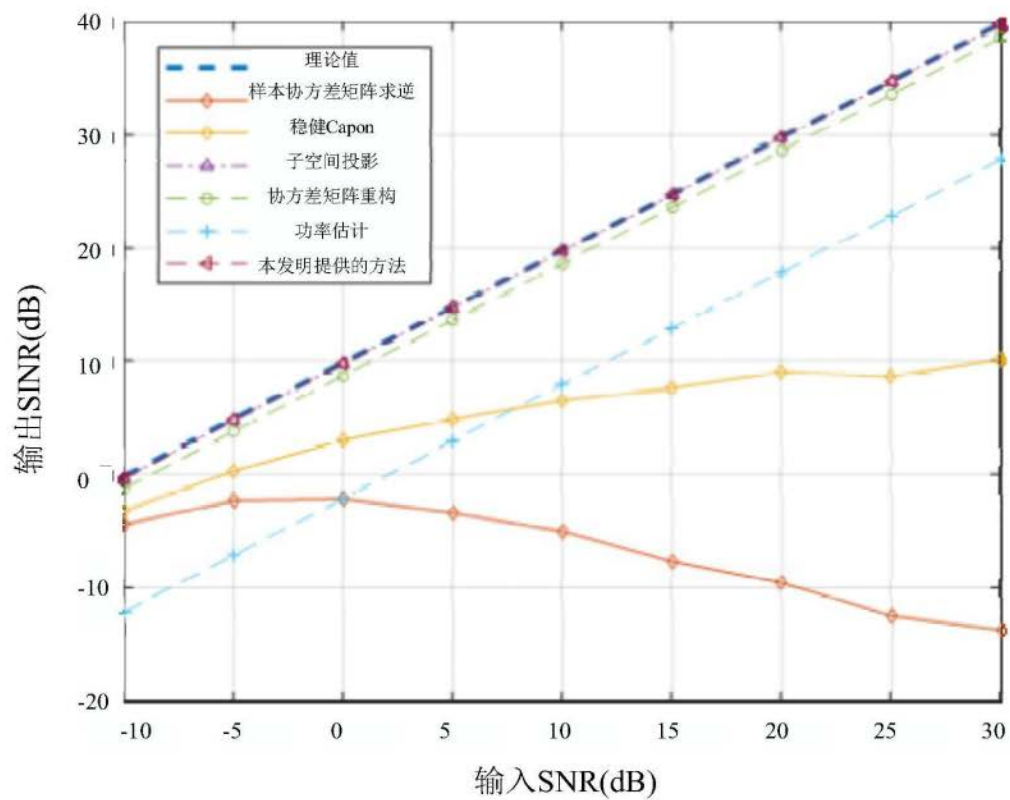
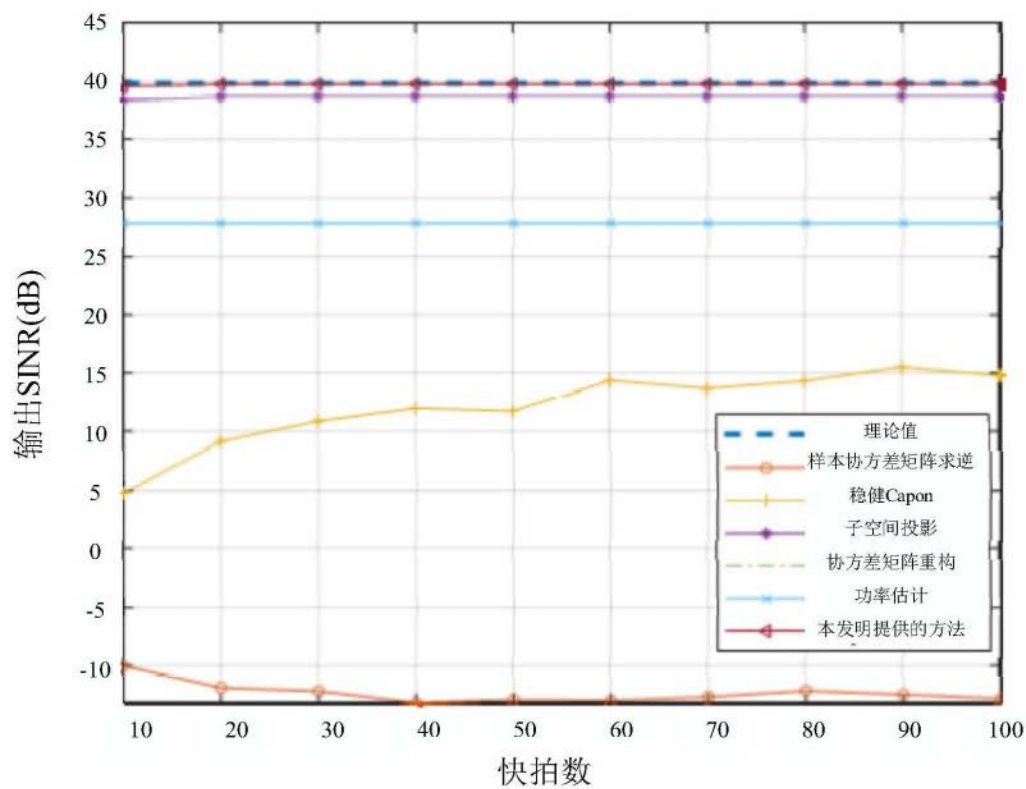


图2



(a)



(b)

图3

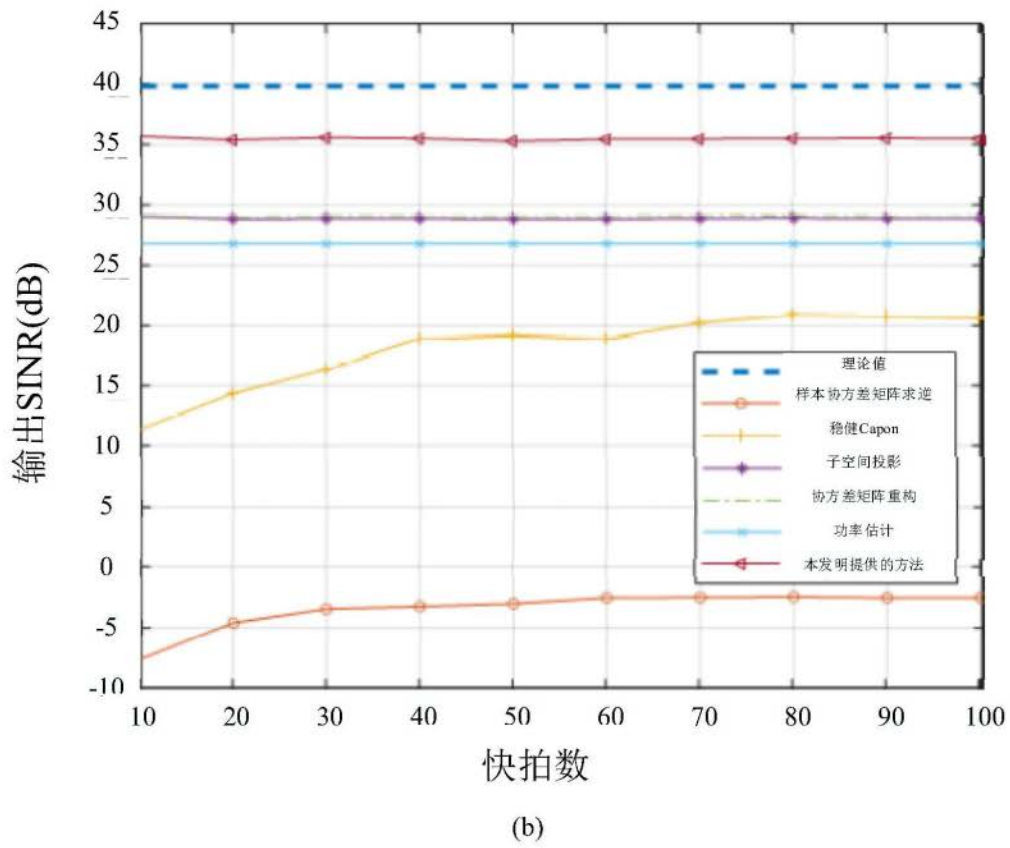
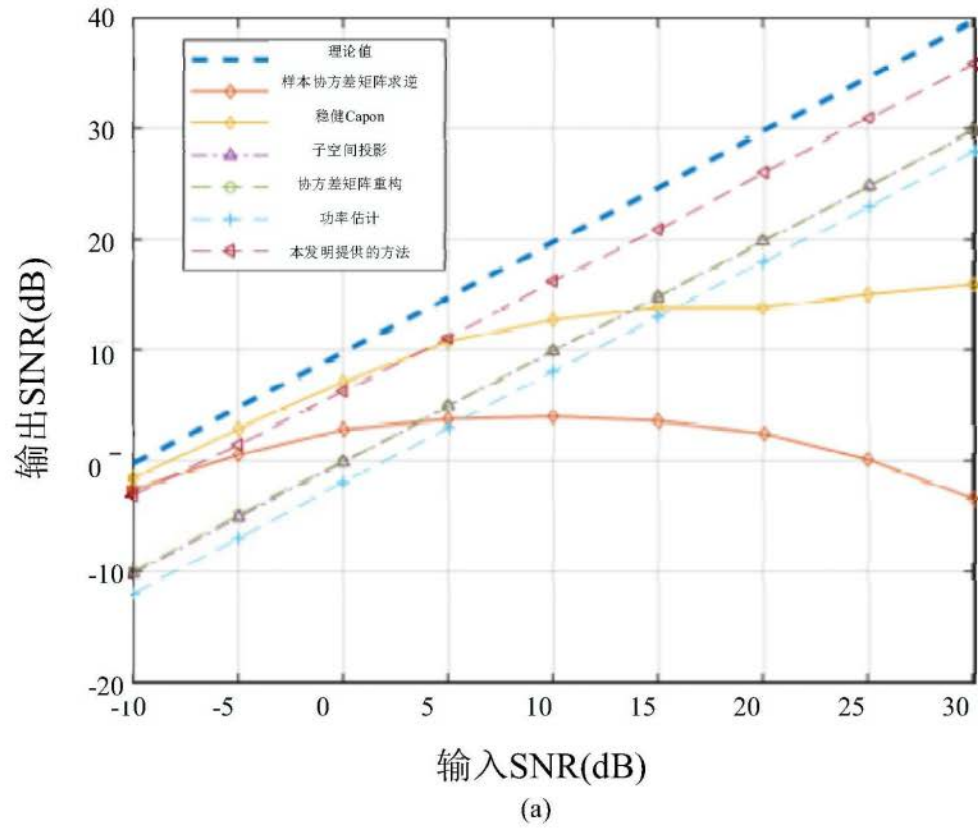
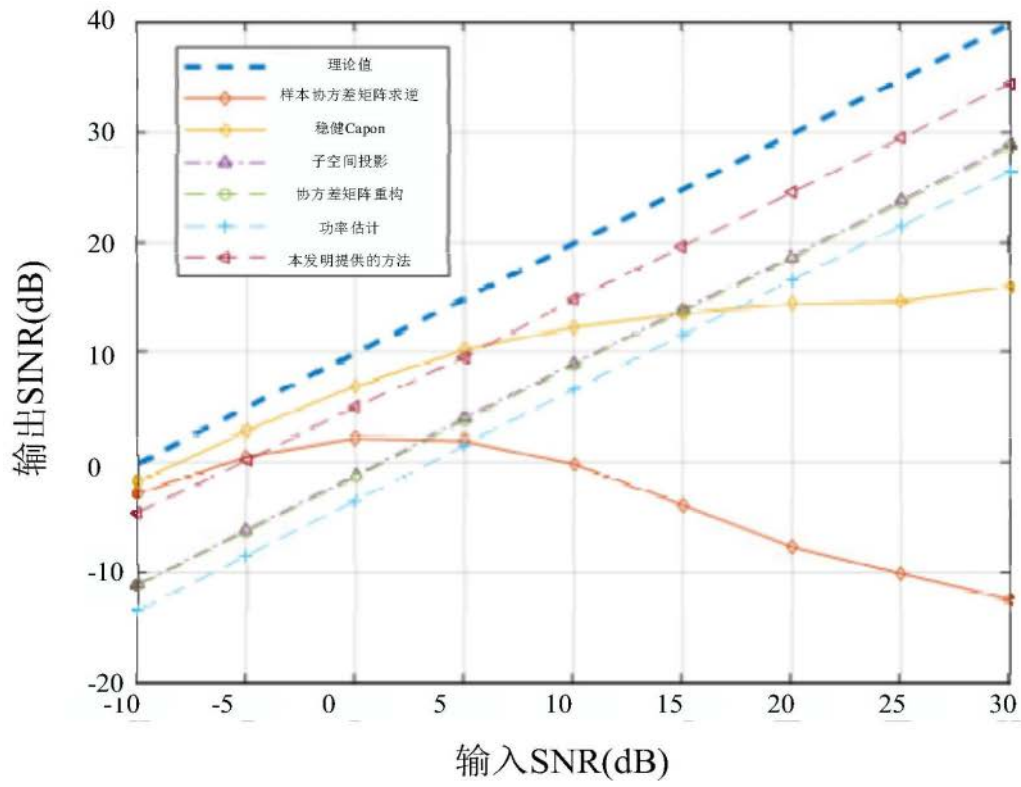
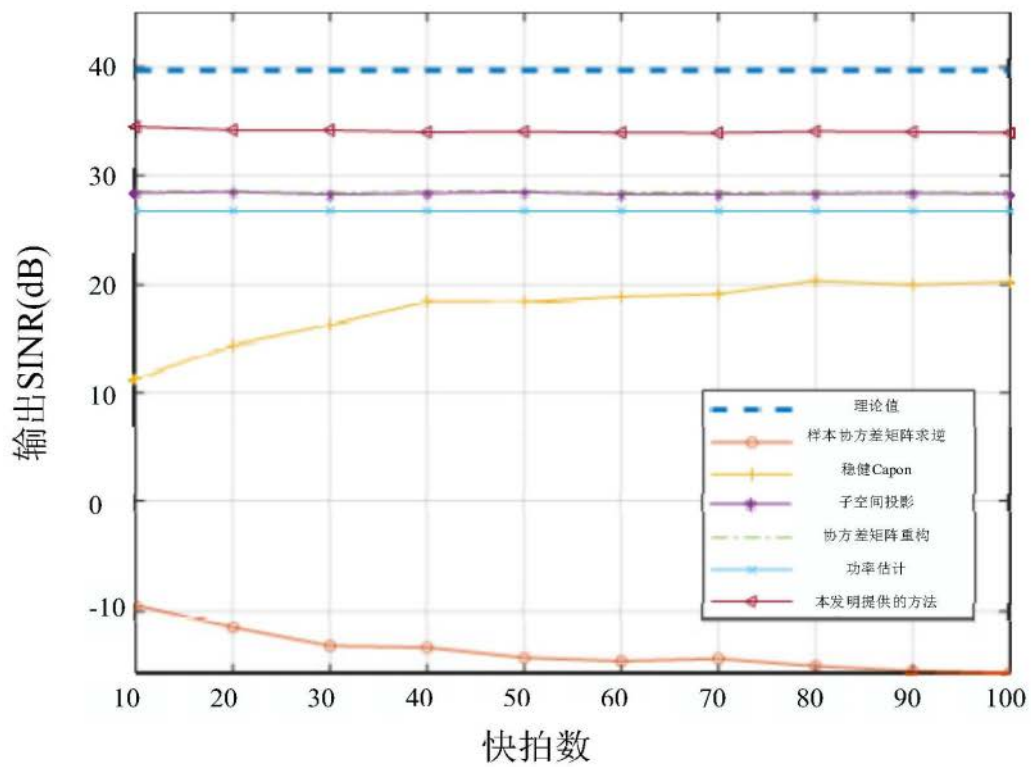


图4



(a)



(b)

图5