



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110954887 B

(45) 授权公告日 2021.05.18

(21) 申请号 201911290571.2

G01S 13/00 (2006.01)

(22) 申请日 2019.12.16

G01S 13/02 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110954887 A

(56) 对比文件

CN 108535708 A, 2018.09.14

CN 110161476 A, 2019.08.23

(43) 申请公布日 2020.04.03

CN 106443594 A, 2017.02.22

(73) 专利权人 西安电子科技大学

CN 108919219 A, 2018.11.30

地址 710071 陕西省西安市太白南路2号

CN 101369014 A, 2009.02.18

(72) 发明人 高永婵 朱柏泉 朱圣棋 廖桂生
隋兵

KR 102021344 B1, 2019.09.16

高永婵. 复杂场景下多通道阵列自适应目标检测算法研究.《中国博士学位论文全文数据库信息科技辑》.2017,第15-30页.

(74) 专利代理机构 陕西电子工业专利中心
61205

郭小路. 多通道雷达干扰抑制与目标检测方法研究.《中国波束学位论文全文数据库信息科技辑》.2019,第57-72页.

代理人 田文英 王品华

审查员 王超

(51) Int. Cl.

G01S 7/41 (2006.01)

G01S 7/02 (2006.01)

权利要求书2页 说明书8页 附图2页

(54) 发明名称

基于球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成方法

(57) 摘要

本发明公开一种基于球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成方法,其步骤为:(1)设置相控阵MIMO雷达结构,获得训练样本集;(2)获得反对称特性协方差矩阵;(3)建立相控阵MIMO波束形成的代价函数;(4)计算实际导向矢量的最优估计值;(5)计算波束形成的权矢量。本发明克服了现有技术对样本需求依赖性强、导向矢量方向角不精确的问题,具有有效降低样本需求量,在小样本条件下依然可以取得优良性能,并在观测数据与实际数据存在失配时的相控阵MIMO雷达波束形成性能更加稳健,使波束形成性能更加优良的优点。



1. 一种基于球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成方法,其特征在于,通过酉变换计算反对称协方差矩阵,实现对训练样本的降维;基于球不变约束设计波束形成的代价函数及约束条件,进而利用拉格朗日乘数法计算波束形成所需的最优权矢量;该方法的步骤包括如下:

步骤1,生成训练样本集:

第一步,按照下式,生成相控阵MIMO接收信号:

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{M}{K}}\beta_s \mathbf{u}(\theta_s) + \sum_{i=1}^D \sqrt{\frac{M}{K}}\beta_i \mathbf{u}(\theta_i) + \tilde{\mathbf{n}}$$

其中, \mathbf{y} 表示大小为 $NK \times 1$ 的接收发射阵列发射的由目标信号、干扰信号和噪声信号构成的回波信号, N 表示相控阵MIMO雷达的每个接收阵列的阵元总数, K 表示相控阵MIMO雷达发射阵列的子阵总数, $\sqrt{\cdot}$ 表示开平方根操作, M 表示相控阵MIMO雷达结构每个发射阵列子阵中的阵元总数, β_s 表示目标信号在传播过程中由损耗形成的反射系数, β_s 的取值为大于0的任何数, $\mathbf{u}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的实际导向矢量, Σ 表示累加操作, D 表示回波信号中干扰信号的总数, i 表示回波信号中干扰信号的序号, β_i 表示第 i 个干扰信号在传播过程中由损耗形成的反射系数, β_i 取值为大于0的任何数, $\mathbf{u}(\theta_i)$ 表示回波信号中方位角为 θ_i 的第 i 个干扰信号的导向矢量, $\tilde{\mathbf{n}}$ 表示回波信号中的噪声信号;

第二步,将相控阵MIMO接收信号进行 L 次快拍,将所有快拍信号组成训练样本集,其中, L 取值大于等于 NK ;

步骤2,获得反对称协方差矩阵:

按照下式,利用实际协方差矩阵的反对称性结构特性,计算反对称协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_p$:

$$\hat{\mathbf{R}}_p = \text{real}(\mathbf{T}\hat{\mathbf{R}}\mathbf{T}^H)$$

其中, $\text{real}(\cdot)$ 表示取实部操作, \mathbf{T} 表示酉变换矩阵, $\hat{\mathbf{R}}$ 表示对训练样本集进行最大似然估计得到的采样协方差矩阵,上标 H 表示共轭转置操作;

步骤3,按照下式,建立球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成的代价函数:

$$\min_{\mathbf{u}(\theta_s)} \mathbf{u}^H(\theta_s) \hat{\mathbf{R}}_p^{-1} \mathbf{u}(\theta_s)$$

$$\text{约束于} \|\mathbf{u}(\theta_s) - \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)\|_2^2 \leq \varepsilon$$

其中, $\min_{\mathbf{u}(\theta_s)}$ 表示对 $\mathbf{u}(\theta_s)$ 取最小值操作, $\bar{\mathbf{u}}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标信号与实际导向矢量失配的观测导向矢量,上标 -1 表示取逆操作, $\|\cdot\|_2$ 表示2范数操作, ε 表示球不变约束的最大失配值, ε 取值小于或等于3;

步骤4,求解球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成的代价函数:

第一步,利用拉格朗日乘子法,构建拉格朗日函数 f 如下:

$$f = \mathbf{u}^H(\theta_s) \hat{\mathbf{R}}_p^{-1} \mathbf{u}(\theta_s) + \lambda (\|\mathbf{u}(\theta_s) - \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)\|_2^2 - \varepsilon)$$

其中, λ 表示拉格朗日乘子;

第二步,对所构建的拉格朗日函数 f 关于 $\mathbf{u}(\theta_s)$ 求导,并置导数为零,得到实际导向矢量的最优估计值 $\hat{\mathbf{u}}(\theta_s)$:

$$\hat{\mathbf{u}}(\theta_s) = \bar{\mathbf{u}}(\theta_s) - (\mathbf{I} + \lambda \hat{\mathbf{R}}_p)^{-1} \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)$$

其中, \mathbf{I} 表示单位矩阵;

步骤5,按照下式,构建用来形成球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束的权矢量:

$$\hat{\mathbf{w}}_0 = \frac{(\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I})^{-1} \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)}{\mathbf{u}^H(\theta_s) (\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I})^{-1} \hat{\mathbf{R}}_p (\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I}) (\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I})^{-1} \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)}$$

其中, $\hat{\mathbf{w}}_0$ 表示相控阵MIMO波束的权矢量。

2.根据权利要求1所述的基于球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成方法,其特征在于,步骤1第一步中所述的回波信号中方位角为 θ_s 的实际导向矢量 $\mathbf{u}(\theta_s)$ 如下:

$$\mathbf{u}(\theta_s) = \mathbf{a}(\theta_s) \otimes \mathbf{b}(\theta_s)$$

其中, $\mathbf{a}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标信号实际发射导向矢量, $\mathbf{a}(\theta_s) = [0, e^{-j2\pi \sin(\theta_s)}, \dots, e^{-j2\pi(K-1)\sin(\theta_s)}]^T$, j 表示虚部单位符号, π 表示圆周率, \sin 表示取正弦操作, 上标 T 表示转置操作, \otimes 表示克罗内克乘积操作, $\mathbf{b}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标信号实际接收导向矢量, $\mathbf{b}(\theta_s) = [0, e^{-j2\pi \sin(\theta_s)}, \dots, e^{-j2\pi(N-1)\sin(\theta_s)}]^T$ 。

3.根据权利要求1所述的基于球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成方法,步骤2中所述的酉变换矩阵如下:

$$\mathbf{T} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{N/2} & \mathbf{J}_{N/2} \\ j\mathbf{I}_{N/2} & -j\mathbf{J}_{N/2} \end{pmatrix} & \text{当N是偶数} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{(N-1)/2} & 0 & \mathbf{J}_{(N-1)/2} \\ 0 & \sqrt{2} & 0 \\ j\mathbf{I}_{(N-1)/2} & 0 & -j\mathbf{J}_{(N-1)/2} \end{pmatrix} & \text{当N是奇数} \end{cases}$$

其中, \mathbf{T} 表示酉变换矩阵, \mathbf{J} 表示副对角线上元素是1其余元素是0的置换矩阵。

4.根据权利要求2所述的基于球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成方法,其特征在于,步骤3中所述的观测导向矢量 $\bar{\mathbf{u}}(\theta_s)$ 由如下公式构成:

$$\bar{\mathbf{u}}(\theta_s) = \bar{\mathbf{a}}(\theta_s) \otimes \bar{\mathbf{b}}(\theta_s)$$

其中, $\bar{\mathbf{a}}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标信号观测发射导向矢量, $\bar{\mathbf{a}}(\theta_s) = [0, e^{-j2\pi \sin(\theta_s + \Delta)}, \dots, e^{-j2\pi(K-1)\sin(\theta_s + \Delta)}]^T$, Δ 表示方位角 θ_s 的误差, $\bar{\mathbf{b}}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标信号观测接收导向矢量, $\bar{\mathbf{b}}(\theta_s) = [0, e^{-j2\pi \sin(\theta_s + \Delta)}, \dots, e^{-j2\pi(N-1)\sin(\theta_s + \Delta)}]^T$ 。

基于球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成方法

技术领域

[0001] 本发明属于雷达技术领域,更进一步涉及相控阵MIMO雷达技术领域中的基于球不变约束和反对称的相控阵MIMO雷达波束形成方法;本发明可用于雷达信号处理时观测数据存在失配误差的情况下,且可用训练样本较少时的相控阵MIMO雷达的波束形成方法。

背景技术

[0002] 相控阵MIMO雷达,通过传统MIMO雷达的基础上进行子阵划分,形成的子阵内发射相干信号,子阵间发射相互正交信号,从而兼备MIMO雷达波形分集增益和相控阵雷达相干增益的优点。

[0003] 自适应波束形成,也称为空域自适应滤波,即通过在相控阵的接收端对空间阵元进行加权相加处理,抑制空间干扰和噪声,增强有用信号,以得到期望的输出结果。自适应求解阵元最优权矢量的方法称为波束形成方法。自适应波束形成中需要用大量独立同分布的训练样本来估计协方差矩阵,所需要的样本数通常需大于协方差矩阵维数的两倍。而在实际应用中,由于干扰环境快速变化,可利用的训练样本数是有限的。此外,实际环境中还存在波形分裂、目标非相关散射、阵列误差等因素,造成实际导向矢量的误差,带来波束形成的性能下降。

[0004] 河海大学在其申请的专利文献“数字阵列超低副瓣自适应数字波束形成方法”(专利申请号:201210002661,公布号:CN 102608580 A)中公开了一种相控阵自适应波束形成方法。该方法包括如下步骤:步骤1,首先估计干扰方向;步骤2,然后构建干扰辅助波束进行空域降维处理;步骤3,最后计算波束形成器权矢量。该方法具有很好的超低副瓣波束保形能力,但是,该方法仍然存在的不足之处是,由于波形分裂、目标非相关散射、阵列误差等因素引起导向矢量失配,带来波束形成的性能下降的问题。

[0005] Aboulnasr Hassanien, Sergiy A. Vorobyov等人在其发表的论文“Phased-MIMO Radar A Tradeoff Between Phased-Array and MIMO Radars”(IEEE Transactions on Signal Processing, 58(6), 3137-3151 2010)中提出了一种相控阵MIMO波束形成方法。该方法的实现步骤是:步骤1,建立相控阵MIMO雷达信号模型;步骤2,求解基于相控阵MIMO雷达信号模型的最小方差无畸变波束形成器;步骤3,求解波束形成器的权矢量,实现波束形成。该方法存在的不足之处在于:该方法假设有足够的训练样本来进行波束形成,要求用于计算协方差矩阵的训练样本数必须大于两倍的系统维数,否则协方差矩阵奇异,造成波束形成性能急剧下降。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于针对上述现有技术的不足,提出一种能够在训练样本数较少,实际数据存在误差时的相控阵MIMO雷达波束形成方法。该方法可以解决训练样本数较少造成波束形成的性能恶化的问题,同时可以有效提高实际数据存在误差时波束形成的稳健性,从而解决雷达天线阵列的波束形成准确度问题。

[0007] 实现本发明目的的思路是：首先，设置相控阵MIMO雷达阵列；然后，利用协方差矩阵的反对称性，获得反对称协方差矩阵；接着，建立球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成的代价函数；然后，使用拉格朗日数乘子求解该代价函数，得到实际导向矢量的最优估计值；最后，利用得到的反对称协方差矩阵和实际导向矢量的最优估计值计算实权矢量，实现相控阵MIMO波束形成。

[0008] 本发明的具体步骤如下：

[0009] 步骤1，生成训练样本集：

[0010] 第一步，按照下式，生成相控阵MIMO接收信号：

$$[0011] \quad \mathbf{y} = \sqrt{\frac{M}{K}} \beta_s \mathbf{u}(\theta_s) + \sum_{i=1}^D \sqrt{\frac{M}{K}} \beta_i \mathbf{u}(\theta_i) + \tilde{\mathbf{n}}$$

[0012] 其中， \mathbf{y} 表示大小为 $NK \times 1$ 的接收发射阵列发射的由目标信号、干扰信号和噪声信号构成的回波信号， N 表示相控阵MIMO雷达的每个接收阵列的阵元总数， K 表示相控阵MIMO雷达发射阵列的子阵总数， $\sqrt{\quad}$ 表示开平方根操作， M 表示相控阵MIMO雷达结构每个发射阵列子阵中的阵元总数， β_s 表示目标信号在传播过程中由损耗形成的反射系数， β_s 的取值为大于0的任何数， $\mathbf{u}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的实际导向矢量， Σ 表示累加操作， D 表示回波信号中干扰信号的总数， i 表示回波信号中干扰信号的序号， β_i 表示第 i 个干扰信号在传播过程中由损耗形成的反射系数， β_i 取值为大于0的任何数， $\mathbf{u}(\theta_i)$ 表示回波信号中方位角为 θ_i 的第 i 个干扰信号的导向矢量， $\tilde{\mathbf{n}}$ 表示回波信号中的噪声信号；

[0013] 第二步，将相控阵MIMO接收信号进行 L 次快拍，将所有快拍信号组成训练样本集，其中， L 取值大于等于 NK ；

[0014] 步骤2，获得反对称协方差矩阵：

[0015] 按照下式，利用实际协方差矩阵的反对称性结构特性，计算反对称协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_p$ ：

$$[0016] \quad \hat{\mathbf{R}}_p = \text{real}(\mathbf{T}\hat{\mathbf{R}}\mathbf{T}^H)$$

[0017] 其中， $\text{real}(\cdot)$ 表示取实部操作， \mathbf{T} 表示酉变换矩阵， $\hat{\mathbf{R}}$ 表示对训练样本集进行最大似然估计得到的采样协方差矩阵，上标 H 表示共轭转置操作；

[0018] 步骤3，按照下式，建立球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成的代价函数：

$$[0019] \quad \min_{\mathbf{u}(\theta_s)} \mathbf{u}^H(\theta_s) \hat{\mathbf{R}}_p^{-1} \mathbf{u}(\theta_s)$$

$$[0020] \quad \text{约束于} \|\mathbf{u}(\theta_s) - \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)\|_2 \leq \varepsilon$$

[0021] 其中， $\min_{\mathbf{u}(\theta_s)}$ 表示对 $\mathbf{u}(\theta_s)$ 取最小值操作， $\bar{\mathbf{u}}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标信号与实际导向矢量失配的观测导向矢量，上标 -1 表示取逆操作， $\|\cdot\|_2$ 表示2范数操作， ε 表示球不变约束的最大失配值， ε 取值小于或等于3；

[0022] 步骤4，求解球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成的代价函数：

[0023] 第一步，利用拉格朗日乘子法，构建拉格朗日函数 f 如下：

$$[0024] \quad f = \mathbf{u}^H(\theta_s) \hat{\mathbf{R}}_p^{-1} \mathbf{u}(\theta_s) + \lambda (\|\mathbf{u}(\theta_s) - \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)\|_2^2 - \varepsilon)$$

[0025] 其中, λ 表示拉格朗日乘子;

[0026] 第二步,对所构建的拉格朗日函数 f 关于 $\mathbf{u}(\theta_s)$ 求导,并置导数为零,得到实际导向矢量的最优估计值 $\hat{\mathbf{u}}(\theta_s)$:

$$[0027] \quad \hat{\mathbf{u}}(\theta_s) = \bar{\mathbf{u}}(\theta_s) - (\mathbf{I} + \lambda \hat{\mathbf{R}}_p)^{-1} \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)$$

[0028] 其中, \mathbf{I} 表示单位矩阵;

[0029] 步骤5,按照下式,构建用来形成球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束的权矢量:

$$[0030] \quad \hat{\mathbf{w}}_0 = \frac{(\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I})^{-1} \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)}{\mathbf{u}^H(\theta_s) (\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I})^{-1} \hat{\mathbf{R}}_p (\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I}) (\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I})^{-1} \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)}$$

[0031] 其中, $\hat{\mathbf{w}}_0$ 表示相控阵MIMO波束的权矢量。

[0032] 本发明与现有技术相比具有以下优点:

[0033] 第一,本发明利用实际协方差矩阵的反对称性结构特性,计算反对称协方差矩阵,克服了现有技术要求用于计算协方差矩阵的训练样本数必须大于两倍的系统维数的问题,使得本发明具有有效降低样本需求量,在训练样本较少条件下依然可以取得优良性能的优点。

[0034] 第二,本发明设计波束形成时,建立球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成的代价函数,从而得到实际导向矢量的最优估计值,克服了现有技术由于波形分裂、目标非相关散射、阵列误差等因素引起导向矢量失配,带来波束形成的性能下降的问题,使得本发明具有波束形成性能更加稳健优良的优点。

附图说明

[0035] 图1为本发明的流程图;

[0036] 图2为本发明与现有技术波束形成方向图;

[0037] 图3为本发明与现有技术输出信干噪比随输入信噪比变化曲线图。

具体实施方式

[0038] 下面结合附图对本发明的做进一步的描述。

[0039] 参照附图1,对本发明实现的具体步骤做进一步的描述。

[0040] 步骤1,生成训练样本集:

[0041] 第一步,按照下式,生成相控阵MIMO接收信号:

$$[0042] \quad \mathbf{y} = \sqrt{\frac{M}{K}} \beta_s \mathbf{u}(\theta_s) + \sum_{i=1}^D \sqrt{\frac{M}{K}} \beta_i \mathbf{u}(\theta_i) + \tilde{\mathbf{n}}$$

[0043] 其中, \mathbf{y} 表示大小为 $NK \times 1$ 的接收发射阵列发射的由目标信号、干扰信号和噪声信号构成的回波信号, N 表示相控阵MIMO雷达的每个接收阵列的阵元总数, K 表示相控阵MIMO雷达发射阵列的子阵总数, $\sqrt{\quad}$ 表示开平方根操作, M 表示相控阵MIMO雷达结构每个发射阵列子阵中的阵元总数, β_s 表示目标信号在传播过程中由损耗形成的反射系数, β_s 的取值为大

于0的任何数, $u(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的实际导向矢量, Σ 表示累加操作, D 表示回波信号中干扰信号的总数, i 表示回波信号中干扰信号的序号, β_i 表示第 i 个干扰信号在传播过程中由损耗形成的反射系数, β_i 取值为大于0的任何数, $u(\theta_i)$ 表示回波信号中方位角为 θ_i 的第 i 个干扰信号的导向矢量, \mathbf{n} 表示回波信号中的噪声信号。所述的回波信号中方位角为 θ_s 的实际导向矢量 $u(\theta_s)$ 如下:

$$[0044] \quad \mathbf{u}(\theta_s) = \mathbf{a}(\theta_s) \otimes \mathbf{b}(\theta_s)$$

[0045] 其中, $a(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标信号实际发射导向矢量, $\mathbf{a}(\theta_s) = [0, e^{-j2\pi \sin(\theta_s)}, \dots, e^{-j2\pi(K-1)\sin(\theta_s)}]^T$, j 表示虚部单位符号, π 表示圆周率, \sin 表示取正弦操作, 上标 T 表示转置操作, \otimes 表示克罗内克乘积操作, $b(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标信号实际接收导向矢量, $\mathbf{b}(\theta_s) = [0, e^{-j2\pi \sin(\theta_s)}, \dots, e^{-j2\pi(N-1)\sin(\theta_s)}]^T$ 。

[0046] 第二步, 将相控阵MIMO接收信号进行 L 次快拍, 将所有快拍信号组成训练样本集, 其中, L 取值大于等于 NK ;

[0047] 步骤2, 获得反对称协方差矩阵:

[0048] 按照下式, 利用实际协方差矩阵的反对称性结构特性, 计算反对称协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_p$:

$$[0049] \quad \hat{\mathbf{R}}_p = \text{real}(\mathbf{T}\mathbf{R}\mathbf{T}^H)$$

[0050] 其中, $\text{real}(\cdot)$ 表示取实部操作, T 表示酉变换矩阵, $\hat{\mathbf{R}}$ 表示对训练样本集进行最大似然估计得到的采样协方差矩阵, 上标 H 表示共轭转置操作。

[0051] 所述的酉变换矩阵如下:

$$[0052] \quad \mathbf{T} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{N/2} & \mathbf{J}_{N/2} \\ j\mathbf{I}_{N/2} & -j\mathbf{J}_{N/2} \end{pmatrix} & \text{当 } N \text{ 是偶数} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{(N-1)/2} & 0 & \mathbf{J}_{(N-1)/2} \\ 0 & \sqrt{2} & 0 \\ j\mathbf{I}_{(N-1)/2} & 0 & -j\mathbf{J}_{(N-1)/2} \end{pmatrix} & \text{当 } N \text{ 是奇数} \end{cases}$$

[0053] 其中, T 表示酉变换矩阵, J 表示副对角线上元素是1其余元素是0的置换矩阵。

[0054] 步骤3, 按照下式, 建立球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成的代价函数:

$$[0055] \quad \min_{u(\theta_s)} \mathbf{u}^H(\theta_s) \hat{\mathbf{R}}_p^{-1} \mathbf{u}(\theta_s)$$

[0056] 约束于 $\|\mathbf{u}(\theta_s) - \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)\|_2^2 \leq \varepsilon$

[0057] 其中, $\min_{u(\theta_s)}$ 表示对 $u(\theta_s)$ 取最小值操作, $\bar{\mathbf{u}}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标信号与实际导向矢量失配的观测导向矢量, 上标 -1 表示取逆操作, $\|\cdot\|_2$ 表示2范数操作, ε 表示球不变约束的最大失配值, ε 取值小于或等于3。

[0058] 所述的观测导向矢量 $\bar{\mathbf{u}}(\theta_s)$ 由如下公式构成:

$$[0059] \quad \bar{\mathbf{u}}(\theta_s) = \bar{\mathbf{a}}(\theta_s) \otimes \bar{\mathbf{b}}(\theta_s)$$

[0060] 其中, $\bar{\mathbf{a}}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标信号观测发射导向矢量,

$\bar{\mathbf{a}}(\theta_s) = [0, e^{-j2\pi\sin(\theta_s+\Delta)}, \dots, e^{-j2\pi(K-1)\sin(\theta_s+\Delta)}]^T$, Δ 表示方位角 θ_s 的误差, $\bar{\mathbf{b}}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标信号观测接收导向矢量, $\bar{\mathbf{b}}(\theta_s) = [0, e^{-j2\pi\sin(\theta_s+\Delta)}, \dots, e^{-j2\pi(N-1)\sin(\theta_s+\Delta)}]^T$ 。

[0061] 步骤4, 求解球不变约束和反对称的相控阵MIO波束形成的代价函数:

[0062] 第一步, 利用拉格朗日乘子法, 构建拉格朗日函数 f 如下:

$$[0063] \quad f = \mathbf{u}^H(\theta_s) \hat{\mathbf{R}}_p^{-1} \mathbf{u}(\theta_s) + \lambda (\|\mathbf{u}(\theta_s) - \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)\|_2^2 - \varepsilon)$$

[0064] 其中, λ 表示拉格朗日乘子;

[0065] 第二步, 对所构建的拉格朗日函数 f 关于 $\mathbf{u}(\theta_s)$ 求导, 并置导数为零, 得到实际导向矢量的最优估计值 $\hat{\mathbf{u}}(\theta_s)$:

$$[0066] \quad \hat{\mathbf{u}}(\theta_s) = \bar{\mathbf{u}}(\theta_s) - (\mathbf{I} + \lambda \hat{\mathbf{R}}_p)^{-1} \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)$$

[0067] 其中, \mathbf{I} 表示单位矩阵;

[0068] 步骤5, 按照下式, 构建用来形成球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束的权矢量:

$$[0069] \quad \hat{\mathbf{w}}_0 = \frac{(\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I})^{-1} \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)}{\mathbf{u}^H(\theta_s) (\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I})^{-1} \hat{\mathbf{R}}_p (\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I}) (\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I})^{-1} \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)}$$

[0070] 其中, $\hat{\mathbf{w}}_0$ 表示相控阵MIMO波束的权矢量。

[0071] 步骤1, 设置相控阵MIMO雷达结构, 获得训练样本。

[0072] 设置相控阵MIMO雷达结构为发射阵列由 K 个子阵构成, 每个子阵包括 M 个阵元, 接收阵列由 N 个阵元构成。

$$[0073] \quad \mathbf{y} = \sqrt{\frac{M}{K}} \beta_s \mathbf{u}(\theta_s) + \sum_{i=1}^D \sqrt{\frac{M}{K}} \beta_i \mathbf{u}(\theta_i) + \tilde{\mathbf{n}}$$

[0074] 其中, \mathbf{y} 表示大小为 $NK \times 1$ 的接收发射阵列发射的由目标信号、干扰信号和噪声信号构成的回波信号, $\sqrt{\quad}$ 表示开平方根, β_s 表示由传播损耗造成的目标信号的反射系数, $\mathbf{u}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 目标的实际导向矢量, Σ 表示开平方根, β_i 表示由传播损耗造成的第 i 个干扰信号的反射系数, $\mathbf{u}(\theta_i)$ 表示回波信号中方位角为 θ_i 的第 i 个干扰的导向矢量, D 表示回波信号中干扰的总数, $\tilde{\mathbf{n}}$ 表示回波信号中的白噪声; 其中,

$$[0075] \quad \mathbf{u}(\theta_s) = \mathbf{a}(\theta_s) \otimes \mathbf{b}(\theta_s)$$

[0076] 其中, $\mathbf{a}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标实际发射导向矢量,

$\mathbf{a}(\theta_s) = [0, e^{-j2\pi\sin(\theta_s)}, \dots, e^{-j2\pi(K-1)\sin(\theta_s)}]^T$, \otimes 表示克罗内克乘积操作, $\mathbf{b}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标实际接收导向矢量, $\mathbf{b}(\theta_s) = [0, e^{-j2\pi\sin(\theta_s)}, \dots, e^{-j2\pi(N-1)\sin(\theta_s)}]^T$, \sin 表示正弦函数, j 表示虚部单位符号, 上标 T 表示转置操作。

[0077] 再将所述相控阵MIMO接收信号取 L 次快拍, 组成训练样本, 其中, L 大于等于 NK ;

[0078] 步骤2, 获得反对称协方差矩阵。

[0079] 利用实际协方差矩阵 \mathbf{R} 的反对称性结构特性, 计算反对称协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_p$:

[0080] $\hat{\mathbf{R}}_p = \text{real}(\mathbf{T}\hat{\mathbf{R}}\mathbf{T}^H)$

[0081] 其中, $\text{real}(\cdot)$ 表示取实部操作, $\hat{\mathbf{R}}$ 表示对步骤1所得的训练样本进行最大似然估计得到的采样协方差矩阵, 上标H表示共轭转置操作, T表示如下酉变换矩阵:

[0082]
$$\mathbf{T} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{N/2} & \mathbf{J}_{N/2} \\ j\mathbf{I}_{N/2} & -j\mathbf{J}_{N/2} \end{pmatrix} & \text{当N是偶数} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{(N-1)/2} & 0 & \mathbf{J}_{(N-1)/2} \\ 0 & \sqrt{2} & 0 \\ j\mathbf{I}_{(N-1)/2} & 0 & -j\mathbf{J}_{(N-1)/2} \end{pmatrix} & \text{当N是奇数} \end{cases}$$

[0083] 所述的反对称协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_p$ 的反对称性结构特性如下:

[0084] $\hat{\mathbf{R}}_p = \mathbf{J}\hat{\mathbf{R}}_p^* \mathbf{J}$

[0085] 其中, J表示副对角线上元素是1其余元素是0的置换矩阵, *表示共轭操作。

[0086] 步骤3, 建立球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成的代价函数:

[0087] $\min_{\mathbf{u}(\theta_s)} \mathbf{u}^H(\theta_s) \hat{\mathbf{R}}_p^{-1} \mathbf{u}(\theta_s)$

[0088] 约束于 $\|\mathbf{u}(\theta_s) - \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)\|_2^2 \leq \varepsilon$

[0089] 其中, min表示取最小值操作, 上标-1表示取逆操作, $\|\cdot\|_2$ 表示2范数操作, $\bar{\mathbf{u}}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标与实际导向矢量失配的观测导向矢量, ε 表示球不变约束的最大失配值, ε 小于或等于3; 其中, 观测导向矢量 $\bar{\mathbf{u}}(\theta_s)$ 由如下公式构成:

[0090] $\bar{\mathbf{u}}(\theta_s) = \bar{\mathbf{a}}(\theta_s) \otimes \bar{\mathbf{b}}(\theta_s)$

[0091] 其中, $\bar{\mathbf{a}}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标观测发射导向矢量, $\bar{\mathbf{a}}(\theta_s) = [0, e^{-j2\pi\sin(\theta_s+\Delta)}, \dots, e^{-j2\pi(K-1)\sin(\theta_s+\Delta)}]^T$, Δ 表示方位角的误差, $\bar{\mathbf{b}}(\theta_s)$ 表示回波信号中方位角为 θ_s 的目标观测接收导向矢量, $\bar{\mathbf{b}}(\theta_s) = [0, e^{-j2\pi\sin(\theta_s+\Delta)}, \dots, e^{-j2\pi(N-1)\sin(\theta_s+\Delta)}]^T$ 。

[0092] 步骤4, 求解相控阵MIMO波束形成的代价函数, 计算实际导向矢量的最优估计值。

[0093] 第一步, 利用拉格朗日乘子法, 构建拉格朗日函数f如下:

[0094] $f = \mathbf{u}^H(\theta_s) \hat{\mathbf{R}}_p^{-1} \mathbf{u}(\theta_s) + \lambda (\|\mathbf{u}(\theta_s) - \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)\|_2^2 - \varepsilon)$

[0095] 其中, λ 表示拉格朗日乘子;

[0096] 第二步, 对所构建的拉格朗日函数f关于 $\mathbf{u}(\theta_s)$ 求导, 并置导数为零, 得到实际导向矢量的最优估计值 $\hat{\mathbf{u}}(\theta_s)$:

[0097] $\hat{\mathbf{u}}(\theta_s) = \bar{\mathbf{u}}(\theta_s) - (\mathbf{I} + \lambda \hat{\mathbf{R}}_p)^{-1} \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)$

[0098] 其中, I表示单位矩阵;

[0099] 步骤5, 构建用来形成球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束的权矢量:

$$[0100] \quad \hat{\mathbf{w}}_0 = \frac{(\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I})^{-1} \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)}{\mathbf{u}^H(\theta_s) (\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I})^{-1} \hat{\mathbf{R}}_p (\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I}) (\hat{\mathbf{R}}_p + \frac{1}{\lambda} \mathbf{I})^{-1} \bar{\mathbf{u}}(\theta_s)}$$

[0101] 其中, $\hat{\mathbf{w}}_0$ 表示相控阵MIMO波束的权矢量。

[0102] 下面结合仿真实验对本发明的效果做进一步的说明:

[0103] 1. 仿真实验条件:

[0104] 本发明的仿真实验的硬件平台为:处理器为Intel i5-6500 CPU,主频为3.2GHz,内存8GB。

[0105] 本发明的仿真实验的软件平台为:Windows 10操作系统和matlab R2017a。

[0106] 本发明的仿真实验的发射阵列设置为10个阵元构成的均匀线阵,阵元间距为半波长,划分子阵个数为5,接收阵列设置为10个阵元构成的均匀线阵,训练样本数为10,设置目标方向为12.2度,方位角误差 Δ 为2度,2个干扰的方位角为[-30-10]度;设置所有干扰信号功率一致,干噪比设为50dB。

[0107] 2. 仿真内容及其结果分析:

[0108] 本发明仿真实验是采用本发明和三个现有技术(相控阵波束形成方法、MIMO波束形成方法、相控阵MIMO波束形成方法)进行波束形成,最终得到方向图扫描方位角的结果及输出信干噪比随输入信干噪比变化的结果。

[0109] 在仿真实验中,采用的三个现有技术是指:

[0110] 现有技术相控阵波束形成方法是指,Skolnik等人在“Introduction to Radar Systems,3rd ed.New York:Mc-Graw-Hill,2001”中提出的相控阵自适应波束形成方法,简称相控阵波束形成方法。

[0111] 现有技术MIMO波束形成方法是指,Jian等人在“MIMO radar with colocated antennas,IEEE Signal Process.Mag.,vol.24pp.:110,2007”中提出的集中式MIMO自适应波束形成方法,简称MIMO波束形成方法。

[0112] 现有技术相控阵MIMO波束形成方法是指,Hassanien等人在“Phased-MIMO Radar ATradeoff Between Phased-Array and MIMO Radars,IEEE Trans.Signal Process.,vol.58(6),pp.:3139,2010”中的提出的相控阵MIMO自适应波束形成方法,简称相控阵MIMO波束形成方法。

[0113] 下面结合图2与图3的仿真图对本发明的效果做进一步的描述。

[0114] 图2是本发明与现有技术相控阵波束形成方法、现有技术MIMO波束形成方法、现有技术相控阵MIMO波束形成方法的方向图扫描方位角的结果图。图2中的横坐标表示方位角,物理单位为度,纵坐标表示方向图,物理单位均为dB。图2中以直线标示的曲线代表本发明方法的方向图,以虚线标志的曲线代表相控阵波束形成方法的方向图,以点线标志的曲线代表MIMO波束形成方法的方向图,以点划线标志的曲线代表相控阵MIMO波束形成方法的方向图。

[0115] 由图2可以看出,本方法的方向图的曲线角度位于约0至20度区间的主瓣最窄、目标方向指向准确、位于其他度数区间的副瓣信号都低于其他方法的方向图曲线的副瓣,采用本发明的波束形成方法得到的方向图优于现有技术方法,性能改善明显。

[0116] 图3是本发明与现有技术相控阵波束形成方法、现有技术MIMO波束形成方法、现有技术相控阵MIMO波束形成方法的输出信干噪比随输入信噪比变化曲线图。图3中的横坐标表示输入信干噪比,纵坐标表示输出信干噪比,物理单位均为dB。图3中以方形标示的曲线代表本发明方法的输出信干噪比随输入信干噪比变化曲线,以星号标示的曲线代表相控阵波束形成方法的输出信干噪比随输入信噪比变化曲线,以圆圈标示的曲线代表MIMO波束形成方法的输出信干噪比随输入信噪比变化曲线,以菱形标示的曲线代表相控阵MIMO波束形成方法的输出信干噪比随输入信干噪比变化曲线。

[0117] 由图3可明显看出,本方法的输出信干噪比随输入信干噪比变化曲线稳定且在大部分输入信干噪比条件下都在其他三条曲线上方,说明采用本发明的波束形成方法得到的输出信干噪比优于现有技术方法,性能改善明显。

[0118] 以上仿真实验表明:本发明方法利用实际协方差矩阵的反对称性结构特性,计算反对称协方差矩阵,建立了球不变约束和反对称的相控阵MIMO波束形成的代价函数,从而得到实际导向矢量的最优估计值,解决了现有技术方法中要求用于计算协方差矩阵的训练样本数必须大于两倍的系统维数的问题,克服了现有技术由于波形分裂、目标非相关散射、阵列误差等因素引起导向矢量失配,是一种有效、稳健的波束形成方法。



图1

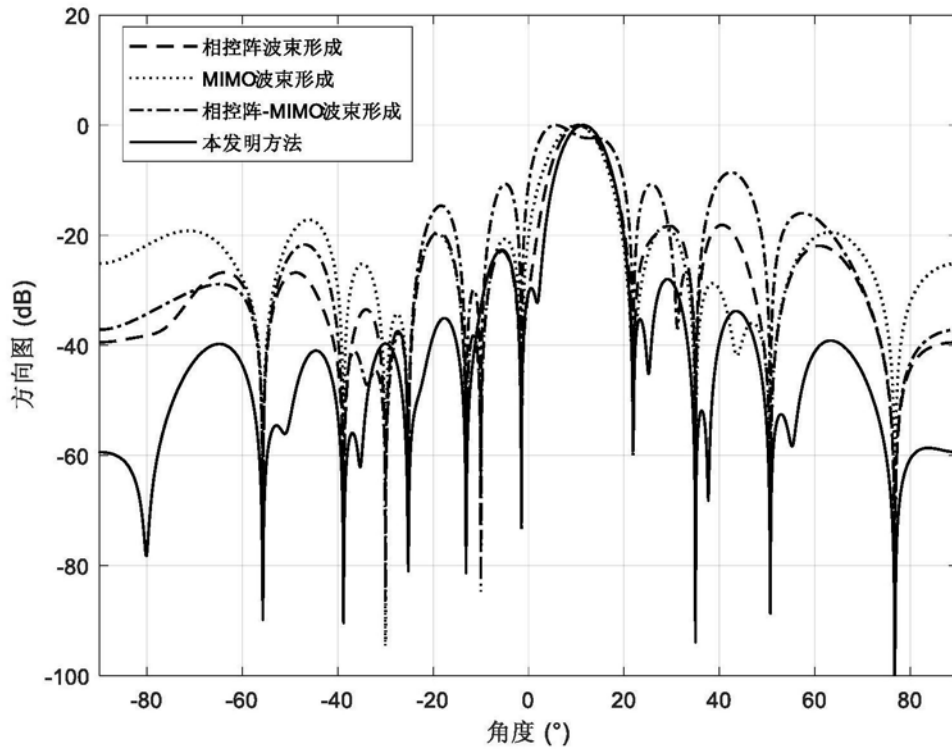


图2

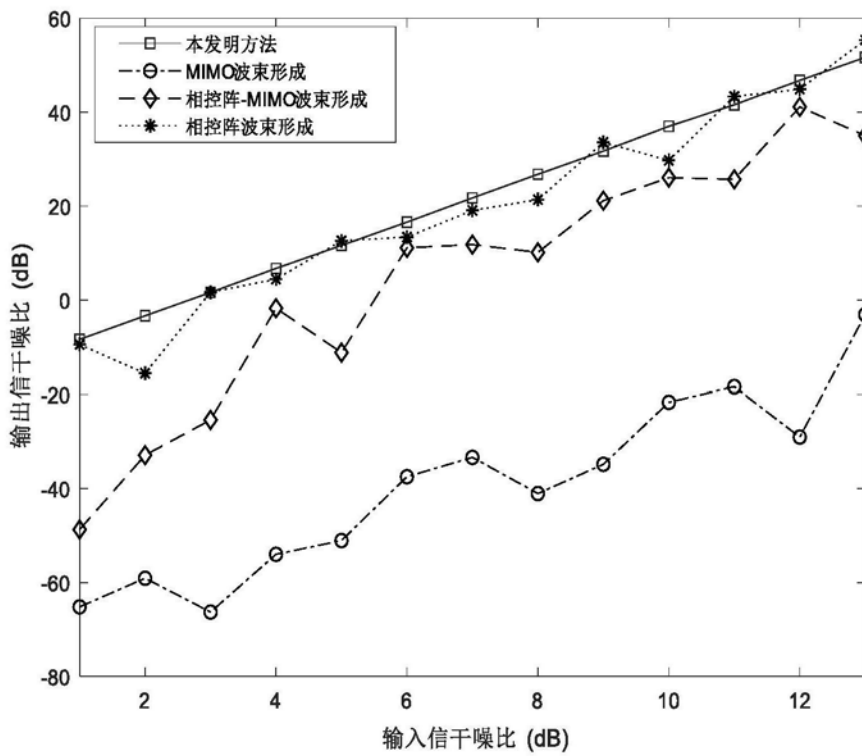


图3