



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112162240 A

(43) 申请公布日 2021.01.01

(21) 申请号 202011022836.3

G06F 17/16 (2006.01)

(22) 申请日 2020.09.25

(71) 申请人 五邑大学

地址 529000 广东省江门市蓬江区东成村  
22号

(72) 发明人 麦超云 黄传好 刘子明 曾军英  
翟懿奎

(74) 专利代理机构 广州嘉权专利商标事务所有  
限公司 44205

代理人 孙浩

(51) Int. Cl.

G01S 7/02 (2006.01)

G01S 7/28 (2006.01)

G01S 7/282 (2006.01)

G01S 7/36 (2006.01)

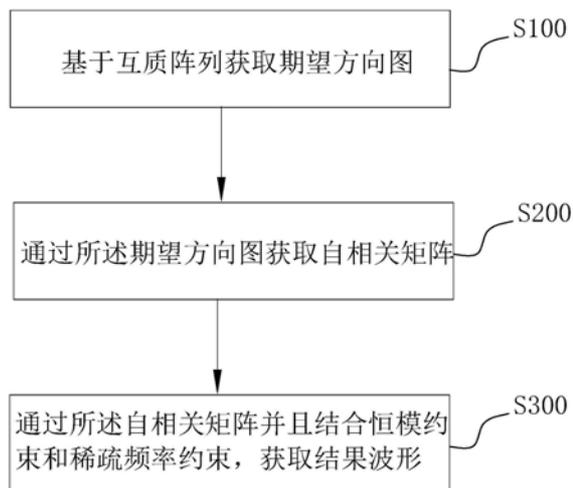
权利要求书2页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法、装置及存储介质

(57) 摘要

本发明公开了基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法、装置及存储介质,包括:基于互质阵列获取期望方向图;通过所述期望方向图获取自相关矩阵;通过所述自相关矩阵并且结合恒模约束和稀疏频率约束,获取结果波形,能够很好地减少波形之间相互干扰的情况,提升检测效果。



1. 一种基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法,其特征在于,包括:  
基于互质阵列获取期望方向图;  
通过所述期望方向图获取自相关矩阵;  
通过所述自相关矩阵并且结合恒模约束和稀疏频率约束,获取结果波形。
2. 根据权利要求1所述的一种基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法,其特征在于,所述基于互质阵列获取期望方向图,包括:  
基于互质阵列结构,得到增广虚拟阵列和协方差矩阵;  
通过所述增广虚拟阵列和所述协方差矩阵,得到空间平滑虚拟域协方差矩阵;  
通过所述空间平滑虚拟域协方差矩阵,利用MUSIC算法计算得到期望方向图。
3. 根据权利要求1所述的一种基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法,其特征在于,所述通过所述期望方向图获取自相关矩阵,包括:  
通过半正定约束由所述期望方向图得到自相关矩阵。
4. 根据权利要求1所述的一种基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法,其特征在于,所述通过所述自相关矩阵并且结合恒模约束和稀疏频率约束,获取结果波形,包括:  
通过自相关矩阵并且结合恒模约束,获得雷达波形矩阵最优解;  
通过所述雷达波形矩阵最优解并且结合稀疏频率约束,构建恒模波形目标函数;  
通过所述恒模波形目标函数结合循环算法,获得结果波形。
5. 根据权利要求2所述的一种基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法,其特征在于,所述空间平滑虚拟域协方差矩阵可表示为:

$$R_{ss} = \frac{1}{MN+1} \sum_{i=1}^{MN+1} R_i$$

其中,MN+1为增广虚拟阵列分割为MN+1个分别包含MN+1个虚拟阵元的线性子阵列, $R_i$ 为第*i*个虚拟子阵列所对应的协方差矩阵。

6. 根据权利要求4所述的一种基于互质阵列的稀疏波形产生方法,其特征在于,所述雷达波形矩阵最优解可表示为:

$$\min_{X,V} \left\| X - \sqrt{NVR}^{1/2} \right\|^2 \quad \begin{array}{l} \text{s.t } X \in Q \\ V^H V = I \end{array}$$

其中, $X$ 表示 $N \times M$ 雷达波形矩阵, $R$ 表示自相关矩阵, $V$ 表示变换矩阵, $N$ 表示发射信号在一个脉冲重复周期的采样数, $V^H V = I$ 为矩阵 $V$ 的单位矩阵约束, $X \in Q$ 为矩阵 $X$ 的恒模约束。

7. 根据权利要求3所述的一种基于互质阵列的稀疏波形产生方法,其特征在于,所述自相关矩阵的目标函数可表示为

$$\min_{\alpha, R} [\alpha \Gamma(\theta) - w^H(\theta) R w(\theta)]^2$$

$$\text{s.t } r_{mm} = 1, m = 1, \dots, M.$$

$$R \geq 0$$

其中,优化变量 $\alpha$ 是与方向图幅度有关的比例值, $r_{mm}, m = 1, \dots, M$ 是自相关矩阵 $R$ 的对角线上的元素, $r_{mm} = 1$ 表示各个发射机通道等功率约束, $R \geq 0$ 表示自相关矩阵的半正定约束, $w(\theta)$ 为阵列导向矢量, $\theta$ 为角度。

8. 一种基于互质阵列的稀疏频率波形产生装置,其特征在于,包括:  
处理单元,用于基于互质阵列获取期望方向图;  
运算单元,用于通过所述期望方向图获取自相关矩阵;  
计算单元,用于通过所述自相关矩阵并且结合恒模约束和稀疏频率约束,获取结果波形。

9. 根据权利要求8所述的一种基于互质阵列的稀疏频率波形产生装置,其特征在于,所述处理单元包括:

第一处理单元,用于基于互质阵列结构,得到增广虚拟阵列和协方差矩阵;

第二处理单元,用于通过所述增广虚拟阵列和所述协方差矩阵,得到空间平滑虚拟域协方差矩阵;

第三处理单元,用于通过所述空间平滑虚拟域协方差矩阵,利用MUSIC算法计算得到期望方向图。

10. 一种计算机可读存储介质,其特征在於:所述计算机可读存储介质存储有基于互质阵列的稀疏频率波形产生装置可执行指令,基于互质阵列的稀疏频率波形产生装置可执行指令用于使基于互质阵列的稀疏频率波形产生装置执行如权利要求1至7任一所述的基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法。

## 基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法、装置及存储介质

### 技术领域

[0001] 本发明涉及通信传输领域,特别涉及一种基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法、装置及存储介质。

### 背景技术

[0002] 互质阵列是一种结构稀疏阵列,由一对阵元数满足互质条件的稀疏均匀线性阵列构成。互质阵列相较于传统均匀阵列,能够实现入射信号的欠采样,从而突破奈奎斯特定理对天线阵元间距的限制;可以在相同阵元的条件下比常规的均匀线性阵列拥有更多的孔径,实现更高的分辨率。

[0003] 现今,由雷达、通信系统等电磁波收发设备的增加而导致的频谱拥挤情况已经不容忽视。对于阵列而言,采用传统波形的雷达系统与同频工作的相邻阵元可能会产生互相干扰的情况。

### 发明内容

[0004] 本发明旨在至少解决现有技术中存在的技术问题之一。

[0005] 为此,本发明提出一种基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法,能够很好地减少波形之间相互干扰的情况,提升检测效果。

[0006] 本发明还提出一种应用上述基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法的基于互质阵列的稀疏频率波形产生装置。

[0007] 本发明还提出一种应用上述基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法的计算机可读存储介质。

[0008] 根据本发明第一方面实施例的基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法,包括:基于互质阵列获取期望方向图;

[0009] 通过所述期望方向图获取自相关矩阵;

[0010] 通过所述自相关矩阵并且结合恒模约束和稀疏频率约束,获取结果波形。

[0011] 根据本发明实施例的基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法,至少具有如下有益效果:首先利用互质阵列结构的特点,增加虚拟孔径以获取期望方向图;然后针对期望方向图,获取自相关矩阵,使得发射方向图接近期望方向图;然后针对期望方向图,结合恒模约束和稀疏频率约束,最后获得结果波形,能够很好地减少波形之间相互干扰的情况,提升检测效果。

[0012] 根据本发明的一些实施例,所述基于互质阵列获取期望方向图,包括:基于互质阵列结构,得到增广虚拟阵列和协方差矩阵;

[0013] 通过所述增广虚拟阵列和所述协方差矩阵,得到空间平滑虚拟域协方差矩阵;

[0014] 通过所述空间平滑虚拟域协方差矩阵,利用MUSIC算法计算得到期望方向图。

[0015] 根据本发明的一些实施例,所述通过所述期望方向图获取自相关矩阵,包括:通过半正定约束由所述期望方向图得到自相关矩阵。

[0016] 根据本发明的一些实施例,所述通过所述自相关矩阵并且结合恒模约束和稀疏频率约束,获取结果波形,包括:

[0017] 通过自相关矩阵并且结合恒模约束,获得雷达波形矩阵最优解;

[0018] 通过所述雷达波形矩阵最优解并且结合稀疏频率约束,构建恒模波形目标函数;通过所述恒模波形目标函数结合循环算法,获得结果波形。

[0019] 根据本发明的一些实施例,所述空间平滑虚拟域协方差矩阵可表示为:

$$[0020] \quad R_{ss} = \frac{1}{MN+1} \sum_{i=1}^{MN+1} R_i$$

[0021] 其中,MN+1为增广虚拟阵列分割为MN+1个分别包含MN+1个虚拟阵元的线性子阵列, $R_i$ 为第*i*个虚拟子阵列所对应的协方差矩阵。

[0022] 根据本发明的一些实施例,所述雷达波形矩阵最优解可表示为:

$$[0023] \quad \min_{X,V} \left\| X - \sqrt{NVR}^{1/2} \right\|^2 \quad \begin{array}{l} \text{s.t. } X \in Q \\ V^H V = I \end{array}$$

[0024] 其中, $X$ 表示 $N \times M$ 雷达波形矩阵, $R$ 表示自相关矩阵, $V$ 表示变换矩阵, $N$ 表示发射信号在一个脉冲重复周期的采样数, $V^H V = I$ 为矩阵 $V$ 的单位矩阵约束, $X \in Q$ 为矩阵 $X$ 的恒模约束。

[0025] 根据本发明的一些实施例,所述自相关矩阵的目标函数可表示为

$$[0026] \quad \min_{\alpha,R} [\alpha \Gamma(\theta) - w^H(\theta) R w(\theta)]^2$$

[0027] s.t.  $r_{mm} = 1, m = 1, \dots, M$ .

[0028]  $R \geq 0$

[0029] 其中,优化变量 $\alpha$ 是与方向图幅度有关的比例值, $r_{mm}, m = 1, \dots, M$ 是自相关矩阵 $R$ 的对角线上的元素, $r_{mm} = 1$ 表示各个发射机通道等功率约束, $R \geq 0$ 表示自相关矩阵的半正定约束, $w(\theta)$ 为阵列导向矢量, $\theta$ 为角度。

[0030] 根据本发明第二方面实施例的基于互质阵列的稀疏频率波形产生装置,包括:处理单元,用于基于互质阵列获取期望方向图;

[0031] 运算单元,用于通过所述期望方向图获取自相关矩阵;

[0032] 计算单元,用于通过所述自相关矩阵并且结合恒模约束和稀疏频率约束,获取结果波形。

[0033] 根据本发明的一些实施例,所述处理单元包括:

[0034] 第一处理单元,用于基于互质阵列结构,得到增广虚拟阵列和协方差矩阵;

[0035] 第二处理单元,用于通过所述增广虚拟阵列和所述协方差矩阵,得到空间平滑虚拟域协方差矩阵;

[0036] 第三处理单元,用于通过所述空间平滑虚拟域协方差矩阵,利用MUSIC算法计算得到期望方向图。

[0037] 根据本发明实施例的基于互质阵列的稀疏频率波形产生装置,至少具有如下有益效果:首先利用互质阵列结构的特点,增加虚拟孔径以获取期望方向图;然后针对期望方向图,获取自相关矩阵,使得发射方向图接近期望方向图;然后针对期望方向图,结合恒模约束和稀疏频率约束,最后获得结果波形,能够很好地减少波形之间相互干扰的情况,提升检

测效果。

[0038] 根据本发明第三方面实施例的计算机可读存储介质,能够应用根据本发明上述第一方面实施例的基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法。

[0039] 根据本发明实施例的计算机可读存储介质,至少具有如下有益效果:首先利用互质阵列结构的特点,增加虚拟孔径以获取期望方向图;然后针对期望方向图,获取自相关矩阵,使得发射方向图接近期望方向图;然后针对期望方向图,结合恒模约束和稀疏频率约束,最后获得结果波形,能够很好地减少波形之间相互干扰的情况,提升检测效果。

[0040] 本发明的附加方面和优点将在下面的描述中部分给出,部分将从下面的描述中变得明显,或通过本发明的实践了解到。

## 附图说明

[0041] 本发明的上述和/或附加的方面和优点从结合下面附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解,其中:

[0042] 图1为本发明实施例一的基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法的工作流程图;

[0043] 图2为本发明实施例一的基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法中的基于互质阵列获取期望方向图的工作流程图;

[0044] 图3为本发明实施例一的基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法中的通过自相关矩阵获取结果波形的工作流程图;

[0045] 图4为本发明实施例二的基于互质阵列的稀疏频率波形产生装置的结构示意图。

## 具体实施方式

[0046] 下面详细描述本发明的实施例,所述实施例的示例在附图中示出,其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的,仅用于解释本发明,而不能理解为对本发明的限制。

[0047] 本发明的描述中,除非另有明确的限定,设置、连接等词语应做广义理解,所属技术领域技术人员可以结合技术方案的具体内容合理确定上述词语在本发明中的具体含义。

[0048] 实施例一

[0049] 参照图1,本发明实施例一提供了一种基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法,其中的一种实施例包括但不限于以下步骤:

[0050] 步骤S100,基于互质阵列获取期望方向图。

[0051] 在本实施例中,本步骤首先基于互质阵列结构特点,利用互质阵列增加虚拟孔径,获取期望方向图,提高了分辨率,为了后续的波形设计做好前提准备。

[0052] 步骤S200,通过期望方向图获取自相关矩阵。

[0053] 在本实施例中,本步骤通过期望方向图获取自相关矩阵,使得发射方向图更加接近期望方向图。

[0054] 步骤S300,通过自相关矩阵并且结合恒模约束和稀疏频率约束,获取结果波形。

[0055] 在本实施例中,本步骤通过自相关矩阵计算结果波形,并且在计算结果波形的过程中结合了恒模约束和稀疏频率约束,最后得到结果波形,能够很好地减少波形之间相互干扰的情况,提升检测效果。

[0056] 参照图2,在步骤S100中,可以包括但不限于以下步骤:

[0057] 步骤S110,基于互质阵列结构,得到增广虚拟阵列和协方差矩阵。

[0058] 在本实施例中,本步骤首先基于互质阵列的结构特点,处理得到增广虚拟阵列和协方差矩阵,为了后续获得期望方向图做好准备。

[0059] 步骤S120,通过增广虚拟阵列和协方差矩阵,得到空间平滑虚拟域协方差矩阵。

[0060] 在本实施例中,本步骤通过对增广虚拟阵列和协方差矩阵进行运算,获得空间平滑虚拟域协方差矩阵。

[0061] 步骤S130,通过空间平滑虚拟域协方差矩阵,利用MUSIC算法计算得到期望方向图。

[0062] 在本实施例中,本步骤通过空间平滑虚拟域协方差矩阵,并且利用MUSIC算法获得期望方向图,在虚拟域匹配奈奎斯特方法实现精确的波达方向估计;其中,MUSIC算法即为传统多重信号分类方法。

[0063] 在步骤S200中,可以包括但不限于以下步骤:

[0064] 通过半正定约束由期望方向图得到自相关矩阵。

[0065] 在本实施例中,本步骤通过半正定约束由期望方向图计算得到自相关矩阵,为了后续的稀疏波形产生做好前提准备。

[0066] 参照图3,在步骤S300中,可以包括但不限于以下步骤:

[0067] 步骤S310,通过自相关矩阵并且结合恒模约束,获得雷达波形矩阵最优解。

[0068] 在本实施例中,本步骤通过自相关矩阵并且结合恒模约束,获得雷达波形矩阵最优解。

[0069] 步骤S320,通过雷达波形矩阵最优解并且结合稀疏频率约束,构建恒模波形目标函数。

[0070] 在本实施例中,本步骤通过雷达波形矩阵最优解并且结合稀疏频率约束,构建恒模波形目标函数。

[0071] 步骤S330,通过恒模波形目标函数结合循环算法,获得结果波形。

[0072] 在本实施例中,本步骤通过恒模波形目标函数结合循环算法,并且在利用循环算法进行计算的过程中,进行迭代更新,多次利用恒模波形目标函数进行计算,直到满足终止条件,最后输出结果波形,结果波形具有稀疏频率特性,其对应的方向图跟期望方向图之间非常接近,并且可以利用目标函数范数的形式来进行衡量,使得雷达波形在频域上满足稀疏频率约束,而且具有良好的自相关特性。

[0073] 在本发明的一些具体实施例中,空间平滑虚拟域协方差矩阵可表示为:

$$[0074] \quad R_{ss} = \frac{1}{MN+1} \sum_{i=1}^{MN+1} R_i$$

[0075] 其中,MN+1为增广虚拟阵列分割为MN+1个分别包含MN+1个虚拟阵元的线性子阵列, $R_i$ 为第*i*个虚拟子阵列所对应的协方差矩阵。

[0076] 在本发明的一些具体实施例中,雷达波形矩阵最优解可表示为:

$$[0077] \quad \min_{X,V} \left\| X - \sqrt{N}VR^{1/2} \right\|^2 \quad \begin{array}{l} \text{s.t. } X \in Q \\ V^H V = I \end{array}$$

[0078] 其中,  $X$ 表示 $N \times M$ 雷达波形矩阵,  $R$ 表示自相关矩阵,  $V$ 表示变换矩阵,  $N$ 表示发射信号在一个脉冲重复周期的采样数,  $V^H V = I$ 为矩阵 $V$ 的单位矩阵约束,  $X \in Q$ 为矩阵 $X$ 的恒模约束。

[0079] 在本发明的一些具体实施例中, 自相关矩阵的目标函数可表示为

$$[0080] \quad \min_{\alpha, R} [\alpha \Gamma(\theta) - w^H(\theta) R w(\theta)]^2$$

$$[0081] \quad \text{s. t. } r_{mm} = 1, m = 1, \dots, M.$$

$$[0082] \quad R \geq 0$$

[0083] 其中, 优化变量 $\alpha$ 是与方向图幅度有关的比例值,  $r_{mm}, m = 1, \dots, M$ 是自相关矩阵 $R$ 的对角线上的元素,  $r_{mm} = 1$ 表示各个发射机通道等功率约束,  $R \geq 0$ 表示自相关矩阵的半正定约束,  $w(\theta)$ 为阵列导向矢量,  $\theta$ 为角度。

[0084] 下面利用一个具体实施例对本发明进行进一步的说明:

[0085] 其中, 基于互质阵列结构, 采用虚拟阵列信号处理方法。该方法通过计算互质阵列差集数组在虚拟域上形成一个增广虚拟阵列, 并利用其2阶等价虚拟域信号的处理, 实现基于互质阵列的有效波达方向估计。因为虚拟阵元个数大于物理阵元个数, 基于虚拟阵列信号处理的方法在自由度性能方面有着显著提升。虚拟域奈奎斯特匹配方法, 通过增广虚拟均匀阵列结构和对应的等价虚拟域信号模型, 引入空间平滑技术和虚拟域多重信号分类处理, 得到超分辨的波达方向估计结果。在该方法中, 互质阵列 $S$ 通过差集数组计算的方式被推导至一个增广虚拟阵列 $Z$ , 该虚拟阵列可表示为

$$[0086] \quad Z = \{x(m, n) | x(m, n) = \pm(Mn - Nm)d\},$$

$$[0087] \quad 0 \leq m \leq 2M-1, 0 \leq n \leq N-1\}$$

[0088] 其中, 该数组中包含了一个虚拟阵元位置由 $-MNd$ 到 $MNd$ 的连续子集, 这就表明物理阵元个数为 $2M+N-1$ , 而扩展互质阵列可以获得 $2MN+1$ 的自由度。对于空间中 $K$ 个来自 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K]^T$ 方向的远场非相关窄带信号, 得到互质阵列在 $t$ 时刻的接收信号 $x(t)$ 及协方差矩阵 $R_S$ ,

$$[0089] \quad x(t) = \sum_{k=1}^K a(\theta_k) s_k(t) + n(t) = A_S s(t) + n(t)$$

$$[0090] \quad R_S = E[x(t)x^H(t)] = \sum_{k=1}^K \sigma_k^2 a(\theta_k) a^H(\theta_k) + \sigma_n^2 I$$

[0091] 推导实际接收信号 $x(t)$ 与构造的虚拟阵列等价信号 $y$ 之间的数学映射关系

$$[0092] \quad y = \text{vec}(R_S) = A_Z p + \sigma_n^2 i$$

[0093] 其中 $A_Z \in C^{(2MN+1) \times K}$ 是对应于增广虚拟阵列 $Z$ 的导引矩阵,  $p = [\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_K^2]^T$

包含了 $K$ 个入射信号源的功率,  $i = \text{vec}(I)$ 。互质阵列接收信号协方差矩阵 $R_S$ 向量化后得到的向量 $y$ 和互质阵列接收信号 $x(t)$ 具有类似的信号建模结构, 故将2阶统计量 $y$ 视为对应于增广虚拟阵列的等价虚拟域信号。但由于直接从等价虚拟信号 $y$ 计算获得的虚拟域信号协方差矩阵为单秩矩阵, 无法实现多个信源的同时估计。为此, 将增广虚拟线性阵列分割为 $MN$

+1个分别包含MN+1个虚拟阵元的线性子阵列,采用空间平滑的方法得到扩展虚拟阵列的满秩空间平滑协方差矩阵,表示为

$$[0094] \quad R_{ss} = \frac{1}{MN+1} \sum_{i=1}^{MN+1} R_i$$

[0095] 其中, $R_i$ 为第*i*个虚拟子阵列所对应的协方差矩阵。最后将传统多重信号分类(MUSIC)方法应用于空间平滑后得到虚拟域协方差矩阵,通过在虚拟域匹配奈奎斯特方法实现精确的波达方向估计。

[0096] 其中,对稀疏频率波形研究的基本方法是对功率谱密度(PSD)和波形自相关函数(ACF)进行约束。针对雷达方向图设计的扩展应用和波形设计的频谱需求,提出了一种互质阵列雷达方向图与稀疏频率波形联合设计方法。首先通过半正定规划由期望方向获得自相关矩阵;然后由自相关矩阵可以求得相应的波形,在求解波形的过程中考虑恒模约束与稀疏频率约束;最后当满足终止条件时循环迭代结束,输出结果波形。得到的具有稀疏频率特性的恒模波形,其对应的方向图跟期望方向图之间的接近程度,用目标函数范数的形式来衡量。雷达波形在频域上满足稀疏频率约束,而且具有良好的自相关特性。

[0097] 假设互质阵列的均匀部分载频相同为 $f_0$ ,波长为 $\lambda_0 = c/f_0$ 那么相邻阵元的相位差 $\Delta\Psi$ 可计算为

$$[0098] \quad \Delta\Psi = 2\pi(R_1 \frac{1}{\lambda_0} - R_2 \frac{1}{\lambda_0}) = -2\pi \frac{d}{\lambda_0} \sin\theta$$

[0099] 对于互质阵列均匀阵元部分,发射信号在一个脉冲重复周期的采样数为N,用 $x_m(n)$ 表示雷达发射的离散时间基带信号 $x_m = [x_m(1) \ x_m(2) \ \cdots \ x_m(N)]^T$ 那么某一时刻的互质阵列均匀部分的波形为 $x(n) = [x_1(n) \ x_2(n) \ \cdots \ x_M(n)]^T$ 。用 $N \times M$ 矩阵X表示互质阵列雷达波形矩阵为

$$[0100] \quad X = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_2(1) & \cdots & x_M(1) \\ x_1(2) & x_2(2) & \cdots & x_M(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1(N) & x_2(N) & \cdots & x_M(N) \end{bmatrix}$$

[0101] 可得一个脉冲重复周期内辐射到目标 $\theta$ 处的功率为

$$[0102] \quad P(\theta) = w(\theta)^H R w(\theta)$$

[0103] 其中, $w(\theta)$ 为阵列导向矢量, $w(\theta) = [1 \ e^{j\Delta\Psi(\theta)} \ \cdots \ e^{j(M-1)\Delta\Psi(\theta)}]^T$ ,当雷达载波频率 $f_0$ 确定时, $w(\theta)$ 只与角度 $\theta$ 有关。因此 $P(\theta)$ 是 $\theta$ 的函数,表示信号功率跟空间方位有关,它反映了雷达发射能量在空间上的分布,因此称之为发射方向图。

[0104] 对于互质阵列,如果获得期望方向图功率分布,通过设计自相关矩阵R,可以使得发射方向接近期望方向图。其中目标函数为

$$[0105] \quad \min_{\alpha, R} [\alpha \Gamma(\theta) - w^H(\theta) R w(\theta)]^2$$

$$[0106] \quad \text{s.t. } r_{mm} = 1, m = 1, \cdots, M.$$

$$[0107] \quad R \geq 0$$

[0108] 优化变量 $\alpha$ 是与方向图幅度有关的比例值, $r_{mm}, m = 1, \cdots, M$ 是矩阵R的对角线上的元

素。 $r_{mm}=1$ 表示各个发射机通道等功率约束, $R \geq 0$ 表示自相关矩阵的半正定约束。

[0109] 由  $R = \frac{1}{N} X^H X$ ,  $R = RV^H V$  可得  $X = \sqrt{NVR}^{1/2}$  所以,在已知自相关矩阵R的前提下,通过引入变换矩阵V,可以找到一种波形矩阵X的方法。同时变换矩阵的选择决定了雷达信号X的特性。在实际雷达系统中,需要考虑的约束为雷达波型满足恒模特性。用Q表示X满足恒模的约束。那么通过自相关矩阵R求解雷达波形矩阵X的最优化问题可以表示为

$$[0110] \quad \min_{X,V} \left\| X - \sqrt{NVR}^{1/2} \right\|^2 \quad \text{s.t. } X \in Q \\ V^H V = I$$

[0111]  $V^H V = I$ 为矩阵V的单位矩阵约束, $X \in Q$ 为矩阵X的恒模约束。对单个阵元进行功率谱密度匹配的稀疏频率波形设计可以表示为

$$[0112] \quad \min_{y(t)} \int_{-\infty}^{\infty} \left| F(y(t)) - g_{opt}(f) \right|^2 df \quad \text{s.t. } |y(t)| = 1, t \in [0, T]$$

[0113] 对应离散信号表示为

$$[0114] \quad \min_{\Theta} \left\| (Ay(\Theta)) \odot (Ay(\Theta))^* - u \right\|^2$$

[0115] A为离散傅里叶变换矩阵所以加上稀疏频率条件后,互质阵列第m个阵元的发射波形  $x_m = y_m(\Theta^{(m)})$ ,由自相关矩阵R求得具有稀疏频谱特性的恒模波形的目标函数为

$$[0116] \quad \min_{X,V,\Theta^{(1)}, \Theta^{(2)}, \dots, \Theta^{(M)}} \left\| X - \sqrt{NVR}^{1/2} \right\|^2 + \sum_{m=1}^M \left\| (Ay_m(\Theta^{(m)})) \odot (Ay_m(\Theta^{(m)}))^* - u \right\|^2$$

$$[0117] \quad \text{s.t. } s_m = y_m(\Theta^{(m)}), m = 1, 2, \dots, M$$

$$[0118] \quad X \in Q \quad V^H V = I$$

[0119] 然后利用循环算法求得波形矩阵X,即获得结果波形。

[0120] 通过上述方案可知,首先利用互质阵列结构的特点,增加虚拟孔径以获取期望方向图;然后针对期望方向图,获取自相关矩阵,使得发射方向图接近期望方向图;然后针对期望方向图,结合恒模约束和稀疏频率约束,最后获得结果波形,能够很好地减少波形之间相互干扰的情况,提升检测效果。

[0121] 实施例二

[0122] 参照图4,本发明实施例二提供了一种基于互质阵列的稀疏频率波形产生装置1000,包括:

[0123] 处理单元1100,用于基于互质阵列获取期望方向图;

[0124] 运算单元1200,用于通过所述期望方向图获取自相关矩阵;

[0125] 计算单元1300,用于通过所述自相关矩阵并且结合恒模约束和稀疏频率约束,获取结果波形。

[0126] 在本发明的一些具体实施例中,处理单元1100包括:

[0127] 第一处理单元1110,用于基于互质阵列结构,得到增广虚拟阵列和协方差矩阵;

[0128] 第二处理单元1120,用于通过所述增广虚拟阵列和所述协方差矩阵,得到空间平滑虚拟域协方差矩阵;

[0129] 第三处理单元1130,用于通过所述空间平滑虚拟域协方差矩阵,利用MUSIC算法计

算得到期望方向图。

[0130] 需要说明的是,由于本实施例中的互质阵列的稀疏频率波形产生装置与上述实施例一中的互质阵列的稀疏频率波形产生方法基于相同的发明构思,因此,方法实施例一中的相应内容同样适用于本系统实施例,此处不再详述。

[0131] 通过上述方案可知,首先利用互质阵列结构的特点,增加虚拟孔径以获取期望方向图;然后针对期望方向图,获取自相关矩阵,使得发射方向图接近期望方向图;然后针对期望方向图,结合恒模约束和稀疏频率约束,最后获得结果波形,能够很好地减少波形之间相互干扰的情况,提升检测效果。

[0132] 实施例三

[0133] 本发明实施例三还提供了一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质存储有基于互质阵列的稀疏频率波形产生装置可执行指令,基于互质阵列的稀疏频率波形产生装置可执行指令用于使基于互质阵列的稀疏频率波形产生装置执行上述的基于互质阵列的稀疏频率波形产生方法,例如,执行以上描述的图1中的方法步骤S100至S300,实现图4中的单元1000-1300的功能。

[0134] 在本说明书的描述中,参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示意性实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不一定指的是相同的实施例或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任何一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。

[0135] 尽管已经示出和描述了本发明的实施例,本领域的普通技术人员可以理解:在不脱离本发明的原理和宗旨的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型,本发明的范围由权利要求及其等同物限定。

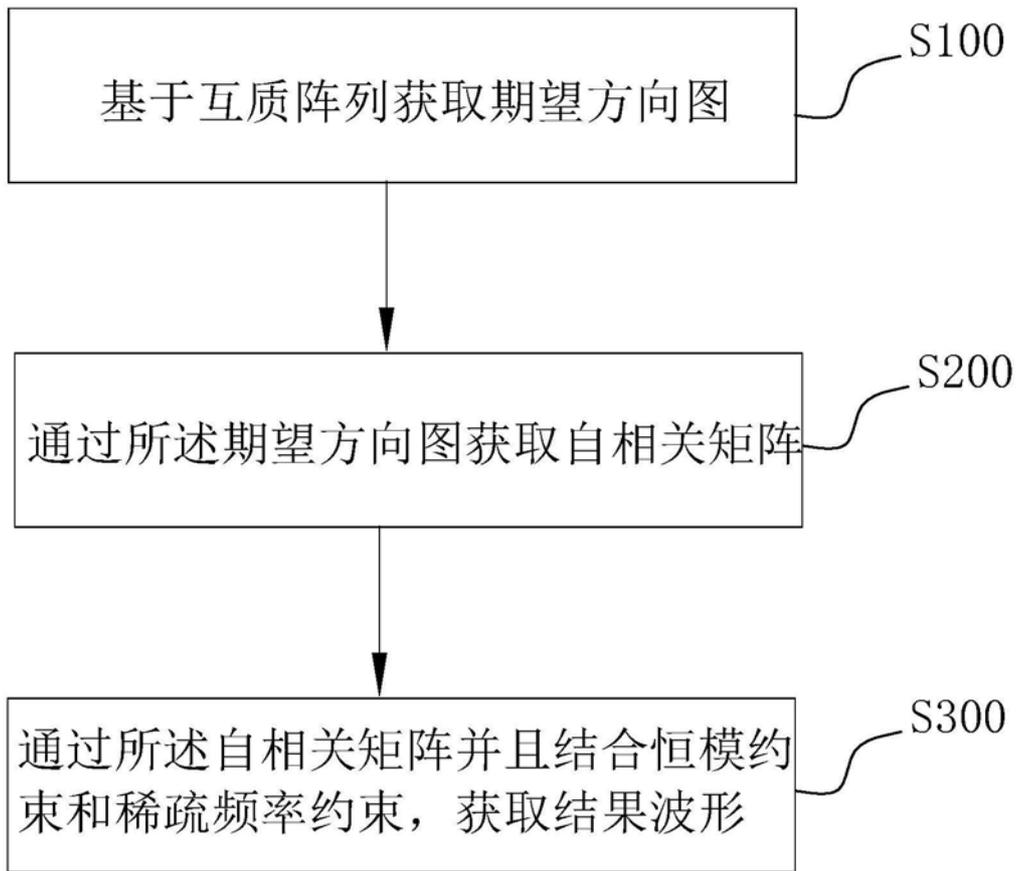


图1

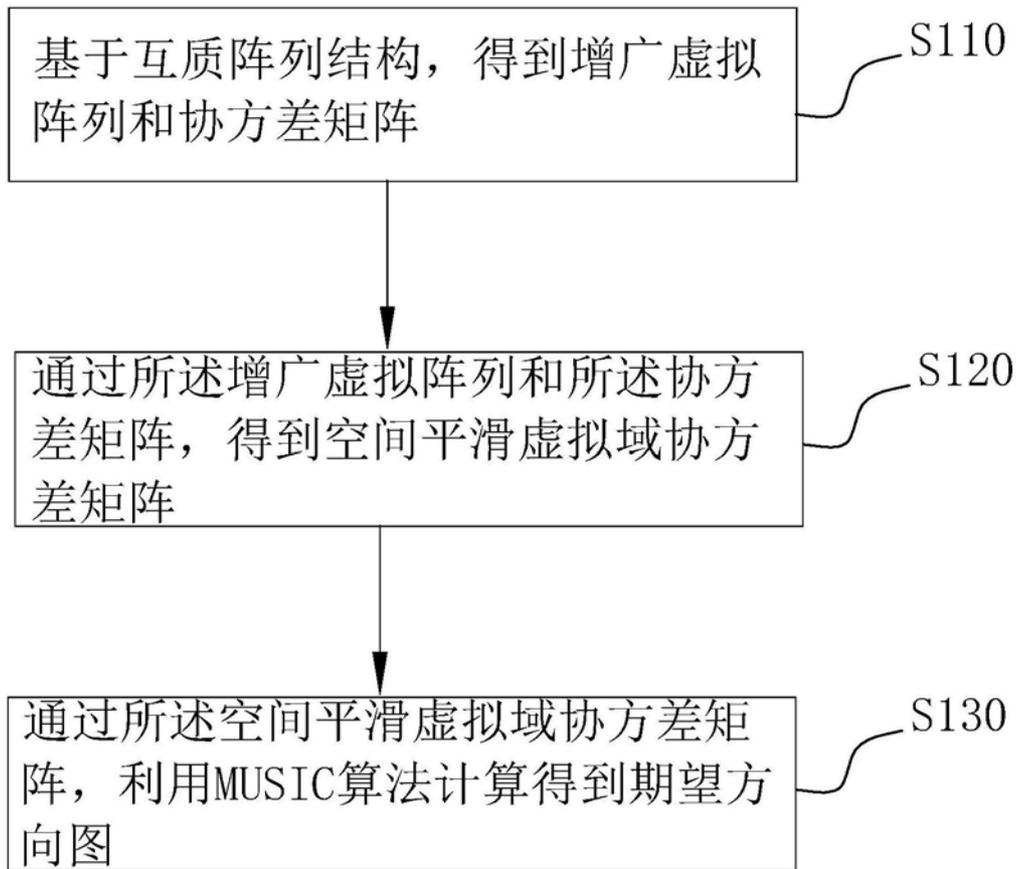


图2

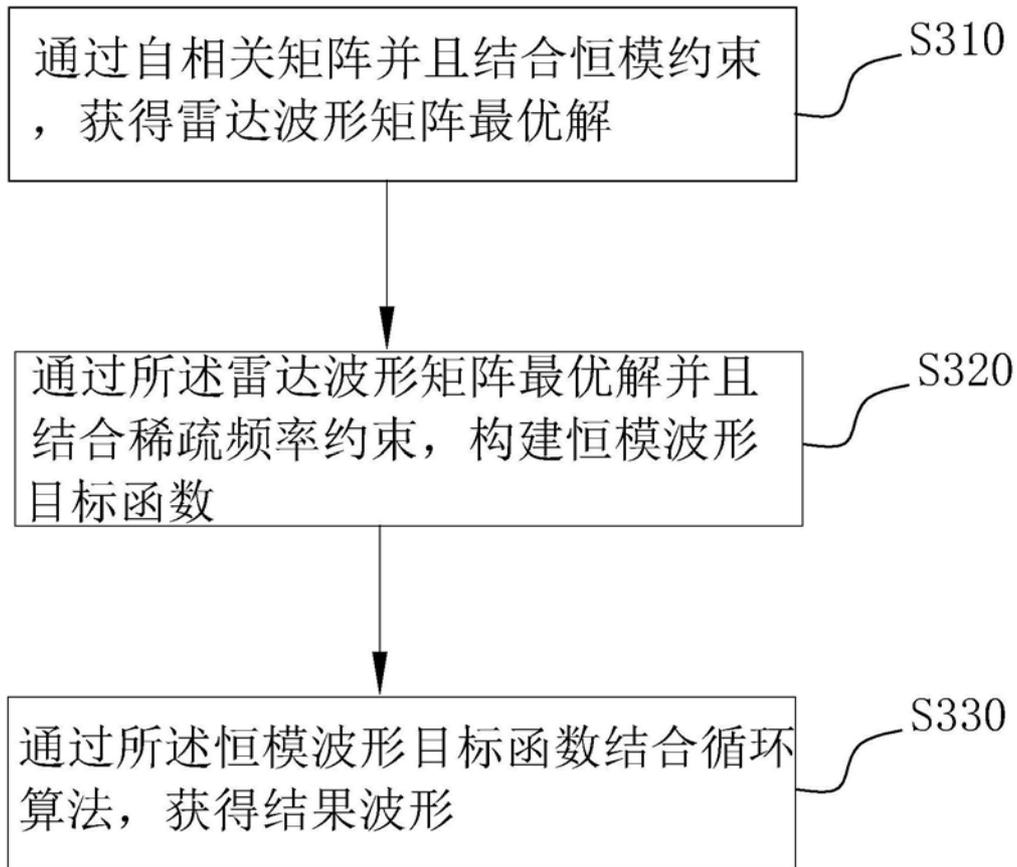


图3

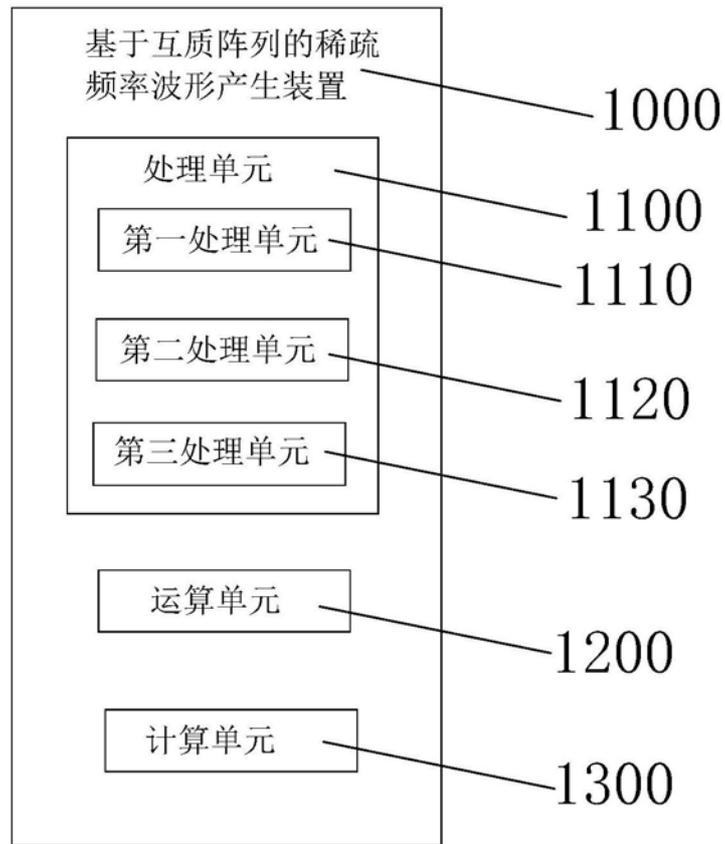


图4