



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110988816 A
(43)申请公布日 2020.04.10

(21)申请号 201911100268.1

(22)申请日 2019.11.12

(71)申请人 西安电子科技大学

地址 710071 陕西省西安市雁塔区太白南路2号

申请人 中国电子科技集团公司第五十四研究所

(72)发明人 曹运合 吴文华 刘玉涛 王胜华
王徐华 王蒙 王从思

(74)专利代理机构 西安睿通知识产权代理事务所(特殊普通合伙) 61218

代理人 惠文轩

(51) Int. Cl.

G01S 7/36(2006.01)

G01S 7/282(2006.01)

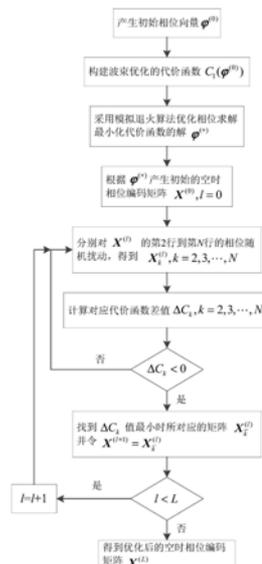
权利要求书3页 说明书5页 附图4页

(54)发明名称

基于空时相位编码的相干MIMO雷达发射波形设计方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于空时相位编码的相干MIMO雷达发射波形设计方法,其实现过程是:首先对第一个子脉冲的空域发射波束进行优化,使得在目标方向形成主波束的同时在干扰方向形成较深的零陷,随机产生初始相位,并采用模拟退火算法对相位进行优化,得到第一个子脉冲最终的发射波形;然后进行空时二维的相位编码波形设计,采用空时相位优化算法对剩余的子脉冲进行空时编码、优化,求解最终的空时相位编码波形矩阵。本发明能够在MIMO雷达发射波束设计的过程中在目标方向形成主波束和在干扰方向形成零陷,同时在目标和干扰方向合成的等效信号均具有在不同子脉冲恒包络的特性,可用于提高雷达的目标检测性能及通信性能。



1. 基于空时相位编码的相干MIMO雷达发射波形设计方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1, 设定相干MIMO雷达发射天线个数为M, 所有发射天线排列成间距为d的均匀线阵; 对应产生一个服从 $[0, 2\pi]$ 均匀分布的初始相位向量 $\boldsymbol{\varphi}^{(0)} = [\varphi_1, \dots, \varphi_m, \dots, \varphi_M]^T$;

其中, $m=1, 2, \dots, M$, $[\cdot]^T$ 表示向量转置;

步骤2, 给定第一个子脉冲的初始相位编码信号向量 $\mathbf{x}_1^{(0)} = e^{j\boldsymbol{\varphi}^{(0)}}$, 构建空域发射波束形成的优化代价函数, 进而确定目标函数; 采用模拟退火迭代算法对目标函数进行优化, 得到优化后的第一个子脉冲的相位向量 $\boldsymbol{\varphi}^{(*)}$, 作为第一个子脉冲的最终相位向量 Φ_1 ;

步骤3, 将第一个子脉冲的最终相位向量 Φ_1 表示成 $\Phi_1 = [\phi_1, \dots, \phi_m, \dots, \phi_M]^T$; 设置一个维度为 $N \times M$ 的空时相位编码矩阵 $X^{(0)}$, 将第一个子脉冲的最终相位向量 Φ_1 作为 $X^{(0)}$ 的第一行信号向量的相位; 随机产生空时相位编码矩阵 $X^{(0)}$ 的第2到N行信号向量的相位;

步骤4, 构建空时编码矩阵的代价函数; 采用空时相位优化迭代算法对空时编码矩阵的代价函数进行优化, 得到优化后的空时相位编码矩阵 $X^{(L)}$, 即为相干MIMO雷达的发射波形。

2. 根据权利要求1所述的基于空时相位编码的相干MIMO雷达发射波形设计方法, 其特征在于, 所述构建空域发射波束形成的优化代价函数, 进而确定目标函数; 其具体为:

首先, 构建空域发射波束形成的优化代价函数为:

$$C_1(\boldsymbol{\varphi}^{(0)}) = \frac{P_{sl}(\boldsymbol{\varphi}^{(0)})}{P_{ml}(\boldsymbol{\varphi}^{(0)})} + \beta P_{nl}(\boldsymbol{\varphi}^{(0)})$$

其中, β 是零陷深度系数, $P_{sl}(\boldsymbol{\varphi}^{(0)}) = \sum_{\theta \in \Theta_{sl}} |\mathbf{a}^T(\theta) \mathbf{x}_1^{(0)}|^2$ 是旁瓣区域的发射功率, 其中 Θ_{sl} 表示旁瓣区域的角度集合, $\mathbf{a}(\theta) = [1, \dots, e^{j2\pi(m-1)d\sin\theta/\lambda}, \dots, e^{j2\pi(M-1)d\sin\theta/\lambda}]^T$ 是发射导向向量, λ 是发射信号的波长, $m=1, 2, \dots, M$, $P_{ml}(\boldsymbol{\varphi}^{(0)}) = \sum_{\theta \in \Theta_{ml}} |\mathbf{a}^T(\theta) \mathbf{x}_1^{(0)}|^2$ 是雷达主瓣区域的发射功率, Θ_{ml} 表示主瓣区域的角度集合, $P_{nl}(\boldsymbol{\varphi}^{(0)}) = |\mathbf{a}^T(\theta_n) \mathbf{x}_1^{(0)}|^2$ 是干扰方向的发射功率, θ_n 表示干扰方向角度;

然后, 确定目标函数为: $\min_{\boldsymbol{\varphi}^{(0)}} C_1(\boldsymbol{\varphi}^{(0)})$ 。

3. 根据权利要求1所述的基于空时相位编码的相干MIMO雷达发射波形设计方法, 其特征在于, 所述采用模拟退火迭代算法对目标函数进行优化, 其具体步骤为:

2.1, 计算代价函数初始值 $C_1(\boldsymbol{\varphi}^{(0)})$, 设置初始温度为 $T_0 = K\sigma_0$ 、扰动相位的个数 N_p 和降温系数 α , 其中, K 为常数因子, σ_0 为初始代价的标准差; 并初始化 N_p 为1;

2.2, 随机选择 $\boldsymbol{\varphi}^{(0)}$ 中的 N_p 个相位进行随机扰动, 亦即把选择的 N_p 个相位的值在 $[0, 2\pi]$ 上随机改变, 得到扰动后的相位向量 $\boldsymbol{\varphi}^{(1)}$;

2.3, 计算扰动后的代价函数 $C_1(\boldsymbol{\varphi}^{(1)})$;

2.4, 计算扰动前后的代价函数之差 ΔC ;

2.5, 判断该次扰动是否满足更新条件: $\Delta C = C_1(\boldsymbol{\varphi}^{(1)}) - C_1(\boldsymbol{\varphi}^{(0)}) < 0$ 或者 $e^{-\Delta C/T_0} < \delta$, 其

中, δ 为常数,且 $\delta \in (0, 1)$;若满足,则更新当前相位向量为扰动后的相位向量,否则,不进行相位向量更新;

2.6,重复步骤2.2-2.5,当连续3次扰动后的相位都不符合更新条件时,跳到步骤2.7;当连续3次扰动后的代价函数值的方差都小于门限 $\varepsilon = 0.01$ 时,跳到步骤2.8;

2.7,判断当前扰动相位的个数是否满足 $N_p < M$,若满足,则令 N_p 的值加1,并跳到步骤2.2;否则,保持当前 N_p 的值不变,并跳到步骤2.2;

2.8,降低温度,即采用降温系数乘以当前温度作为新的温度;判断新的温度是否满足 $T < 10^{-6}$,若满足,则停止迭代,并将步骤2.2中最后一次随机扰动后得到的扰动后的相位向量作为优化后的第一个子脉冲的相位向量 $\boldsymbol{\varphi}^{(*)}$,否则,返回步骤2.2。

4.根据权利要求1所述的基于空时相位编码的相干MIMO雷达发射波形设计方法,其特征在于,所述随机产生空时相位编码矩阵 $\mathbf{X}^{(0)}$ 的第2到N行信号向量的相位,其具体为:

$$\boldsymbol{\phi}_k = [\phi_{i_{k1}} + \frac{2\pi(1-i_{k1})d \sin \theta_n}{\lambda}, \dots, \phi_{i_{km}} + \frac{2\pi(m-i_{km})d \sin \theta_n}{\lambda}, \dots, \phi_{i_{kM}} + \frac{2\pi(M-i_{kM})d \sin \theta_n}{\lambda}]^T;$$

其中, λ 是发射信号的波长, θ_n 表示干扰方向角度; $k = 2, 3, \dots, N, i_{k1}, \dots, i_{km}, \dots, i_{kM}$ 是 $1, \dots, m, \dots, M$ 的随机重排序。

5.根据权利要求4所述的基于空时相位编码的相干MIMO雷达发射波形设计方法,其特征在于,所述空时编码矩阵的代价函数为:

$$C_2(\mathbf{X}^{(0)}) = \frac{\left| (\mathbf{X}^{(0)} \mathbf{a}(\theta_t))^T \mathbf{1}_N \right|^2}{N (\mathbf{X}^{(0)} \mathbf{a}(\theta_t))^H (\mathbf{X}^{(0)} \mathbf{a}(\theta_t))};$$

其中, $|\cdot|$ 是取模操作; θ_t 表示目标方向的角度; $\mathbf{a}(\theta_t)$ 为目标方向的发射导向向量; $\mathbf{1}_N$ 表示长度为N的全1列向量, $[\cdot]^H$ 表示向量共轭转置。

6.根据权利要求1所述的基于空时相位编码的相干MIMO雷达发射波形设计方法,其特征在于,所述采用空时相位优化迭代算法对空时编码矩阵的代价函数进行优化,按照以下步骤进行:

4.1,设置最大迭代次数为L,初始化迭代次数l为0;

4.2,计算当前迭代次数对应的代价函数 $C_2(\mathbf{X}^{(l)})$;

4.3,对当前迭代次数的空时相位编码矩阵 $\mathbf{X}^{(l)}$ 的第2行作相位随机扰动,对应得到扰动后矩阵 $\mathbf{X}_2^{(l)}$,对当前迭代次数的空时相位编码矩阵 $\mathbf{X}^{(l)}$ 的第3行作相位随机扰动,对应得到扰动后矩阵 $\mathbf{X}_3^{(l)}$;依次类推,对当前迭代次数的空时相位编码矩阵 $\mathbf{X}^{(l)}$ 的第4行到第N行分别作相位随机扰动,对应得到扰动后矩阵 $\mathbf{X}_4^{(l)}, \dots, \mathbf{X}_k^{(l)}, \dots, \mathbf{X}_N^{(l)}$;

4.4,分别计算当前迭代次数的每个扰动后矩阵 $\mathbf{X}_k^{(l)}$ 对应的代价函数 $C_2(\mathbf{X}_k^{(l)})$, $k = 2, 3, \dots, N$;

4.5,分别计算当前迭代次数的每个扰动后矩阵 $\mathbf{X}_k^{(l)}$ 对应的代价函数与扰动前的空时相位编码矩阵 $\mathbf{X}^{(l)}$ 对应的代价函数的差值: $\Delta C_k = C_2(\mathbf{X}_k^{(l)}) - C_2(\mathbf{X}^{(l)})$;

4.6,判断是否存在 $\Delta C_k < 0$,若是,则确定 ΔC_k 值最小时对应的k值,记为 \bar{k} ,并采用 $\mathbf{X}_{\bar{k}}^{(l)}$ 更新空时相位编码矩阵,即令 $\mathbf{X}^{(l+1)} = \mathbf{X}_{\bar{k}}^{(l)}$;否则,转至步骤4.2;

4.7,判断迭代次数 l 是否满足 $1 < l$,若是,则迭代次数加1,转至步骤4.2;否则,将步骤4.6更新后的空时相位编码矩阵作为优化后的空时相位编码矩阵 $X^{(l)}$ 。

7.根据权利要求6所述的基于空时相位编码的相干MIMO雷达发射波形设计方法,其特征在于,步骤4.3中,所述随机扰动为对空时相位编码矩阵 $X^{(0)}$ 的第 k 行的相位中的第 $i_{k1}, \dots, i_{km}, \dots, i_{kM}$ 个元素进行随机重排。

基于空时相位编码的相干MIMO雷达发射波形设计方法

技术领域

[0001] 本发明属于雷达技术领域,特别涉及一种基于空时相位编码的相干MIMO雷达发射波形设计方法。

背景技术

[0002] 随着雷达技术的发展,传统相控阵雷达的性能已经不能满足人们对雷达的要求,因而多输入多输出(MIMO)雷达引起了研究人员极大的兴趣,成为现代雷达的重要发展方向之一。与相控阵雷达相比,MIMO雷达的优势在于其发射波形的自由度,通过发射正交波形可以获得波形增益,从而提高雷达的检测性能和空间分辨率。同时,相干MIMO雷达可以发射部分相关的波形来灵活设计发射波束模式,改善雷达同时跟踪多个运动目标的能力。

[0003] 在传统的MIMO雷达发射波束形成优化中,即使各个天线上的发射波形是在时域恒模的,但是由于各个天线发射的波形是相对独立的,因此在目标方向合成的等效信号一般是包络起伏的。在发射总功率固定的情况下,MIMO雷达系统在目标方向合成的等效信号保持恒模可以减少目标回波的匹配滤波损失,有利于提高雷达目标检测性能。在存在干扰的情况下,MIMO雷达的发射波束需要形成较深的零点从而在空域抑制干扰。

[0004] 相位编码信号是雷达的常用信号之一,其在时域具有恒包络的特性,并且相位编码信号非常适合用于空时二维编码优化设计。基于不同的雷达性能需求,可以灵活的设计空时相位编码方案,使得发射波形具有良好空时特性。

发明内容

[0005] 为了解决上述问题,本发明的目的是提出一种基于空时相位编码的相干MIMO雷达发射波形设计方法。该方法借鉴空时编码技术,在MIMO雷达空域发射波束形成的基础上进一步解决在目标方向合成的等效信号的包络起伏问题,使得雷达系统在目标方向的发射能量在每个子脉冲均保持恒定,从而降低了该等效信号的匹配滤波损失。

[0006] 为了达到上述目的,本发明采用以下技术方案予以解决。

[0007] 基于空时相位编码的相干MIMO雷达发射波形设计方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤1,设定相干MIMO雷达发射天线个数为M,所有发射天线排列成间距为d的均匀线阵;对应产生一个服从 $[0, 2\pi]$ 均匀分布的初始相位向量 $\boldsymbol{\varphi}^{(0)} = [\varphi_1, \dots, \varphi_m, \dots, \varphi_M]^T$;

[0009] 其中, $m=1, 2, \dots, M$, $[\cdot]^T$ 表示向量转置;

[0010] 步骤2,给定第一个子脉冲的初始相位编码信号向量 $\mathbf{x}_1^{(0)} = e^{j\boldsymbol{\varphi}^{(0)}}$,构建空域发射波束形成的优化代价函数,进而确定目标函数;采用模拟退火迭代算法对目标函数进行优化,得到优化后的第一个子脉冲的相位向量 $\boldsymbol{\varphi}^{(*)}$,作为第一个子脉冲的最终相位向量 $\boldsymbol{\varphi}_1$;

[0011] 步骤3,将第一个子脉冲的最终相位向量 $\boldsymbol{\varphi}_1$ 表示成 $\boldsymbol{\varphi}_1 = [\varphi_1, \dots, \varphi_m, \dots, \varphi_M]^T$;设置一个维度为 $N \times M$ 的空时相位编码矩阵 $X^{(0)}$,将第一个子脉冲的最终相位向量 $\boldsymbol{\varphi}_1$ 作为 $X^{(0)}$ 的第一行信号向量的相位;随机产生空时相位编码矩阵 $X^{(0)}$ 的第2到N行信号向量的相位;

[0012] 步骤4,构建空时编码矩阵的代价函数;采用空时相位优化迭代算法对空时编码矩阵的代价函数进行优化,得到优化后的空时相位编码矩阵 $X^{(L)}$,即为相干MIMO雷达的发射波形。

[0013] 与现有技术相比,本发明的有益效果为:

[0014] (1) 本发明采用空时相位编码方法设计MIMO雷达的发射波束,可以在每个子脉冲对波束形状进行约束,使得干扰方向的零陷深度和目标方向的发射功率在每个子脉冲均保持恒定,从而可以使目标方向合成的等效信号获得最小的匹配损失。同时相位编码波形便于空时编码设计,具有时域恒模的特性,可以获得发射机的最大工作效率。

[0015] (2) 本发明的空时编码方法同时考虑单个子脉冲的波束形状以及所有子脉冲的合成波束形状,因此可以推广应用到雷达通信一体化系统的波形设计,如果通信方向的发射功率在每个子脉冲均保持恒定,则能够保证所有子脉冲的通信符号不丢失,从而降低通信误码率,提高通信性能。

附图说明

[0016] 下面结合附图和具体实施例对本发明做进一步详细说明。

[0017] 图1是本发明的实现流程图;

[0018] 图2(a)、图2(b)和图2(c)分别是本发明实施例中第1个子脉冲、第2个子脉冲和第3个子脉冲的波束方向图,横坐标为角度,纵坐标为幅度;

[0019] 图3是本发明实施例的合成波束方向图 and 传统循环算法(CA)产生的合成波束方向图的对比图,横坐标为角度,纵坐标为归一化幅度;

[0020] 图4是本发明方法实施例产生的发射信号在目标方向合成的等效信号的包络起伏曲线和CA方法产生的发射信号在目标方向合成的等效信号的包络起伏曲线的对比图,横坐标为子脉冲序数,纵坐标为信号幅度;

[0021] 图5是本发明方法的匹配损失曲线和CA方法的匹配损失曲线的对比图,横坐标为子脉冲数,纵坐标为匹配损失。

具体实施方式

[0022] 下面结合附图对本发明的实施例及效果作进一步详细描述。

[0023] 参考图1,本发明的一种基于空时相位编码的相干MIMO雷达发射波形设计方法,按照以下步骤实施:

[0024] 步骤1,设定相干MIMO雷达发射天线个数为 M ,所有发射天线排列成间距为 d 的均匀线阵;对应产生一个服从 $[0, 2\pi]$ 均匀分布的初始相位向量 $\boldsymbol{\varphi}^{(0)} = [\varphi_1, \dots, \varphi_m, \dots, \varphi_M]^T$;

[0025] 其中, $m=1, 2, \dots, M$, $[\cdot]^T$ 表示向量转置;

[0026] 步骤2,给定第一个子脉冲的初始相位编码信号向量 $\mathbf{x}_1^{(0)} = e^{j\boldsymbol{\varphi}^{(0)}}$,构建空域发射波束形成的优化代价函数,进而确定目标函数;采用模拟退火迭代算法对目标函数进行优化,得到优化后的第一个子脉冲的相位向量 $\boldsymbol{\varphi}^{(*)}$,作为第一个子脉冲的最终相位向量 $\boldsymbol{\varphi}_1$;

[0027] 具体地,空域发射波束形成的优化代价函数为 $C_1(\boldsymbol{\varphi}^{(0)}) = \frac{P_{sl}(\boldsymbol{\varphi}^{(0)})}{P_{ml}(\boldsymbol{\varphi}^{(0)})} + \beta P_{nl}(\boldsymbol{\varphi}^{(0)})$, 其

中, β 是零陷深度系数, $P_{sl}(\boldsymbol{\varphi}^{(0)}) = \sum_{\theta \in \Theta_{sl}} |\mathbf{a}^T(\theta) \mathbf{x}_1^{(0)}|^2$ 是旁瓣区域的发射功率, 其中 Θ_{sl} 表示旁瓣

区域的角度集合, $\mathbf{a}(\theta) = [1, \dots, e^{j2\pi(m-1)d \sin\theta/\lambda}, \dots, e^{j2\pi(M-1)d \sin\theta/\lambda}]^T$ 是发射导向向量, 其中 λ 是

发射信号的波长, $m=1, 2, \dots, M$, $P_{ml}(\boldsymbol{\varphi}^{(0)}) = \sum_{\theta \in \Theta_{ml}} |\mathbf{a}^T(\theta) \mathbf{x}_1^{(0)}|^2$ 是雷达主瓣区域的发射功率,

Θ_{ml} 表示主瓣区域的角度集合, $P_{nl}(\boldsymbol{\varphi}^{(0)}) = |\mathbf{a}^T(\theta_n) \mathbf{x}_1^{(0)}|^2$ 是干扰方向的发射功率, 其中 θ_n 表示

干扰方向角度。因此, 确定的目标函数为 $\min_{\boldsymbol{\varphi}^{(0)}} C_1(\boldsymbol{\varphi}^{(0)})$ 。

[0028] 上述采用模拟退火迭代算法对目标函数进行优化, 其具体步骤为:

[0029] 2.1, 计算代价函数初始值 $C_1(\boldsymbol{\varphi}^{(0)})$, 设置初始温度为 $T_0 = K\sigma_0$ 、扰动相位的个数 N_p 和降温系数 α , 其中, K 为常数因子, σ_0 为初始代价的标准差; 并初始化 N_p 为 1;

[0030] 2.2, 随机选择 $\boldsymbol{\varphi}^{(0)}$ 中的 N_p 个相位进行随机扰动, 亦即把选择的 N_p 个相位的值在 $[0, 2\pi]$ 上随机改变, 得到扰动后的相位向量 $\boldsymbol{\varphi}^{(1)}$;

[0031] 2.3, 计算扰动后的代价函数 $C_1(\boldsymbol{\varphi}^{(1)})$;

[0032] 2.4, 计算扰动前后的代价函数之差 ΔC ;

[0033] 2.5, 判断该次扰动是否满足更新条件: $\Delta C = C_1(\boldsymbol{\varphi}^{(1)}) - C_1(\boldsymbol{\varphi}^{(0)}) < 0$ 或者 $e^{-\Delta C/T_0} < \delta$, 其中, δ 为常数, 且 $\delta \in (0, 1)$; 若满足, 则更新当前相位向量为扰动后的相位向量, 否则, 不进行相位向量更新;

[0034] 2.6, 重复步骤 2.2-2.5, 当连续 3 次扰动后的相位都不符合更新条件时, 跳到步骤 2.7; 当连续 3 次扰动后的代价函数值的方差都小于门限 $\varepsilon = 0.01$ 时, 跳到步骤 2.8;

[0035] 2.7, 判断当前扰动相位的个数是否满足 $N_p < M$, 若满足, 则令 N_p 的值加 1, 并跳到步骤 2.2; 否则, 保持当前 N_p 的值不变, 并跳到步骤 2.2;

[0036] 2.8, 降低温度, 即采用降温系数乘以当前温度作为新的温度; 判断新的温度是否满足 $T < 10^{-6}$, 若满足, 则停止迭代, 并将步骤 2.2 中最后一次随机扰动后得到的扰动后的相位向量作为第一个子脉冲的相位向量 $\boldsymbol{\varphi}^{(*)}$, 否则, 返回步骤 2.2。

[0037] 步骤 3, 将第一个子脉冲的最终相位向量 $\boldsymbol{\varphi}_1$ 表示成 $\boldsymbol{\varphi}_1 = [\varphi_{11}, \dots, \varphi_{1m}, \dots, \varphi_{1M}]^T$; 设置一个维度为 $N \times M$ 的空时相位编码矩阵 $X^{(0)}$, 将第一个子脉冲的最终相位向量 $\boldsymbol{\varphi}_1$ 作为 $X^{(0)}$ 的第一行信号向量的相位; 随机产生空时相位编码矩阵 $X^{(0)}$ 的第 2 到 N 行信号向量的相位;

[0038] 具体地, 随机产生空时相位编码矩阵 $X^{(0)}$ 的第 2 到 N 行信号向量的相位的过程如下:

$$[0039] \quad \boldsymbol{\varphi}_k = [\varphi_{k1} + \frac{2\pi(1-i_{k1})d \sin \theta_n}{\lambda}, \dots, \varphi_{km} + \frac{2\pi(m-i_{km})d \sin \theta_n}{\lambda}, \dots, \varphi_{kM} + \frac{2\pi(M-i_{kM})d \sin \theta_n}{\lambda}]^T;$$

[0040] 其中, $k=2, 3, \dots, N$, 而 $i_{k1}, \dots, i_{km}, \dots, i_{kM}$ 是 $1, \dots, m, \dots, M$ 的随机重排序。

[0041] 步骤 4, 构建空时编码矩阵的代价函数; 采用空时相位优化迭代算法对空时编码矩

阵的代价函数进行优化,得到优化后的空时相位编码矩阵 $X^{(l)}$,即为相干MIMO雷达的发射波形。

[0042] 具体地,所述空时编码矩阵的代价函数为:

$$[0043] \quad C_2(X^{(0)}) = \frac{\left| (X^{(0)} \mathbf{a}(\theta_t))^T \mathbf{1}_N \right|^2}{N (X^{(0)} \mathbf{a}(\theta_t))^H (X^{(0)} \mathbf{a}(\theta_t))};$$

[0044] 其中, $|\cdot|$ 是取模操作; θ_t 表示目标方向的角度; $\mathbf{1}_N$ 表示长度为N的全1列向量, $[\cdot]^H$ 表示向量共轭转置。

[0045] 所述采用空时相位优化迭代算法对空时编码矩阵的代价函数进行优化,按照以下步骤进行:

[0046] 4.1,设置最大迭代次数为L,初始化迭代次数1为0;

[0047] 4.2,计算当前迭代次数对应的代价函数 $C_2(X^{(1)})$,

[0048] 4.3,对当前迭代次数的空时相位编码矩阵 $X^{(1)}$ 的第2行作相位随机扰动,对应得到扰动后矩阵 $X_2^{(1)}$,对当前迭代次数的空时相位编码矩阵 $X^{(1)}$ 的第3行作相位随机扰动,对应得到扰动后矩阵 $X_3^{(1)}$;依次类推,对当前迭代次数的空时相位编码矩阵 $X^{(1)}$ 的第4行到第N行分别作相位随机扰动,对应得到扰动后矩阵 $X_4^{(1)}, \dots, X_k^{(1)}, \dots, X_N^{(1)}$;

[0049] 4.4,分别计算当前迭代次数的每个扰动后矩阵 $X_k^{(1)}$ 对应的代价函数

$$C_2(X_k^{(1)}), \quad k = 2, 3, \dots, N;$$

[0050] 4.5,分别计算当前迭代次数的每个扰动后矩阵 $X_k^{(1)}$ 对应的代价函数与扰动前的空时相位编码矩阵 $X^{(1)}$ 对应的代价函数的差值: $\Delta C_k = C_2(X_k^{(1)}) - C_2(X^{(1)})$;

[0051] 4.6,判断是否存在 $\Delta C_k < 0$,若是,则确定 ΔC_k 值最小时对应的k值,记为 \bar{k} ,并采用 $X_{\bar{k}}^{(1)}$ 更新空时相位编码矩阵,即令 $X^{(l+1)} = X_{\bar{k}}^{(1)}$;否则,转至步骤4.2;

[0052] 4.7,判断迭代次数1是否满足 $1 < L$,若是,则迭代次数加1,转至步骤4.2;否则,将步骤4.6更新后的空时相位编码矩阵作为优化后的空时相位编码矩阵 $X^{(l)}$ 。

[0053] 得到优化后的空时相位编码矩阵 $X^{(l)}$,即为相干MIMO雷达的发射波形,也就完成了发射波形的设计。

[0054] 仿真实验

[0055] 下面通过点目标仿真成像实验进一步说明本发明的正确性和有效性。

[0056] (1) 仿真条件:

[0057] 设定相干MIMO雷达系统的发射天线个数为 $M=10$,雷达探测目标方向为 $\theta_t = -10^\circ$,干扰方向为 $\theta_n = 30^\circ$,模拟退火算法的常数因子 $K=10^3$,降温系数 $\alpha=0.8$,迭代算法的总次数为 $L=30$ 。

[0058] (2) 仿真内容:

[0059] 仿真1,采用本发明方法对MIMO雷达的发射波束方向图进行仿真,结果如图2和图3所示,其中图2a、图2b和图2c分别是第1个子脉冲、第2个子脉冲和第3个子脉冲期间的发射波束方向图;从图2a、图2b和图2c中可以看出,本发明方法所设计的发射波束在目标方向形

成主波束,在干扰方向形成零陷,并且在目标方向和干扰方向的发射功率在不同的子脉冲期间均保持恒定。

[0060] 图3是采用本发明方法所获得的合成波束与采用传统循环算法(CA)所获得的合成波束的对比图;从图3中可以看出,本发明方法与传统CA方法相比,所得的合成波束在干扰方向有着更深的零陷深度,因此有更好的干扰抑制能力。

[0061] 仿真2,采用本发明方法对MIMO雷达在目标方向合成的等效信号包络起伏进行仿真,并与采用CA方法的情况进行比较,结果如图4所示;从图4中可以看出,本发明方法所设计的MIMO雷达发射波束在目标方向合成的等效信号在时域具有恒模特性,而采用CA方法的情况下在目标方向合成的等效信号的包络在不同子脉冲之间是起伏的,该起伏会导致等效信号有一定程度的匹配损失。

[0062] 仿真3,采用本发明方法对在目标方向合成的等效信号的匹配损失进行仿真,并与采用CA方法的情况进行比较,结果如图5所示;从图5中可以看出,本发明方法所设计的MIMO雷达发射波形在目标方向合成的等效信号的匹配损失为0dB,也就是说没有匹配损失,相比之下,采用传统的CA方法的情况下,在目标方向合成的等效信号的匹配损失大约为1.18dB,可见采用本发明的空时相位编码方法优化约束每个子脉冲的发射波束,能够使得目标方向的等效信号在时域上是恒包络的,从而使得等效信号的匹配损失降到0dB,同时,等效信号的时域恒包络特性可以使得本发明方法在扩展到雷达通信一体化系统应用的时候,保证每个子脉冲的通信符号不丢失,从而获得更好的通信性能。

[0063] 以上所述,仅为本发明的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,可轻易想到变化或替换,都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此,本发明的保护范围应以所述权利要求的保护范围为准。

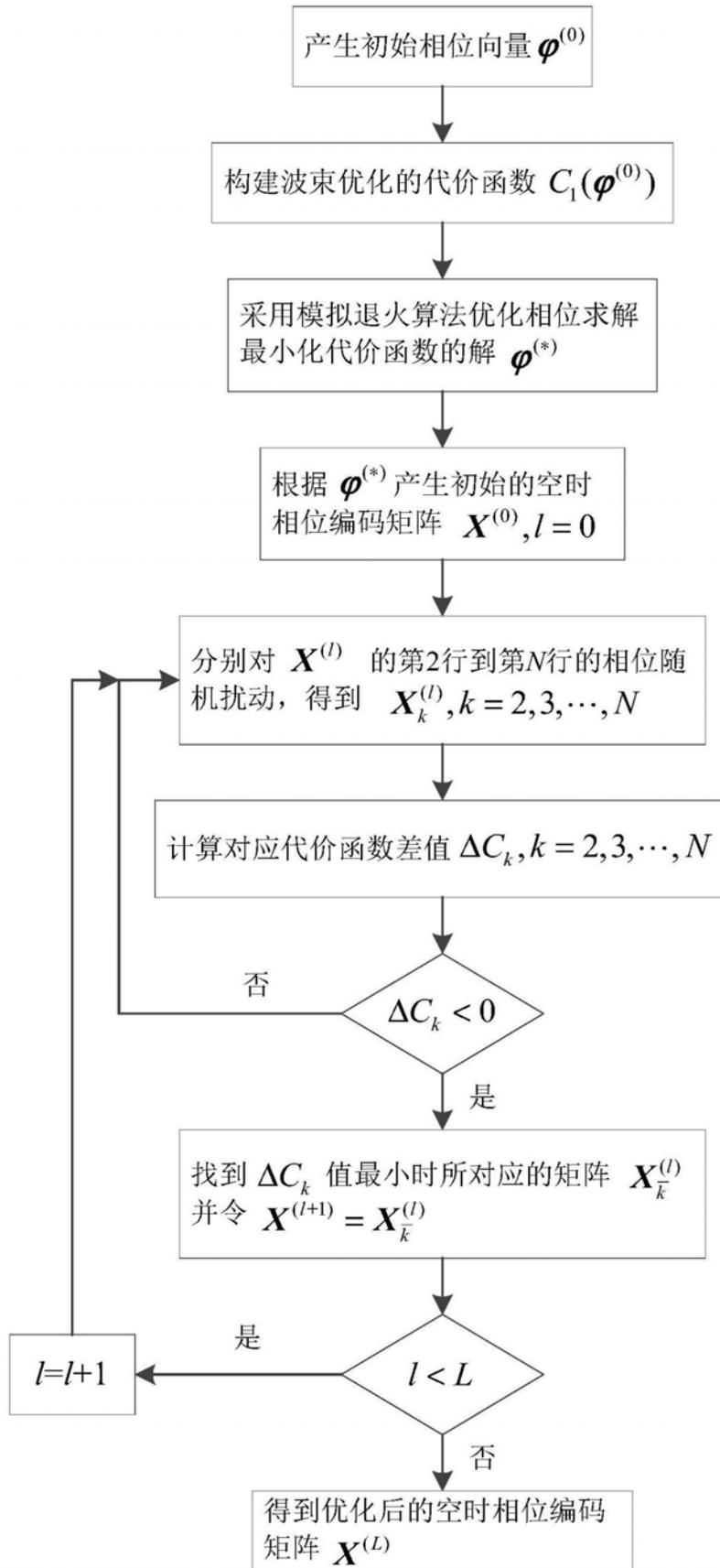


图1

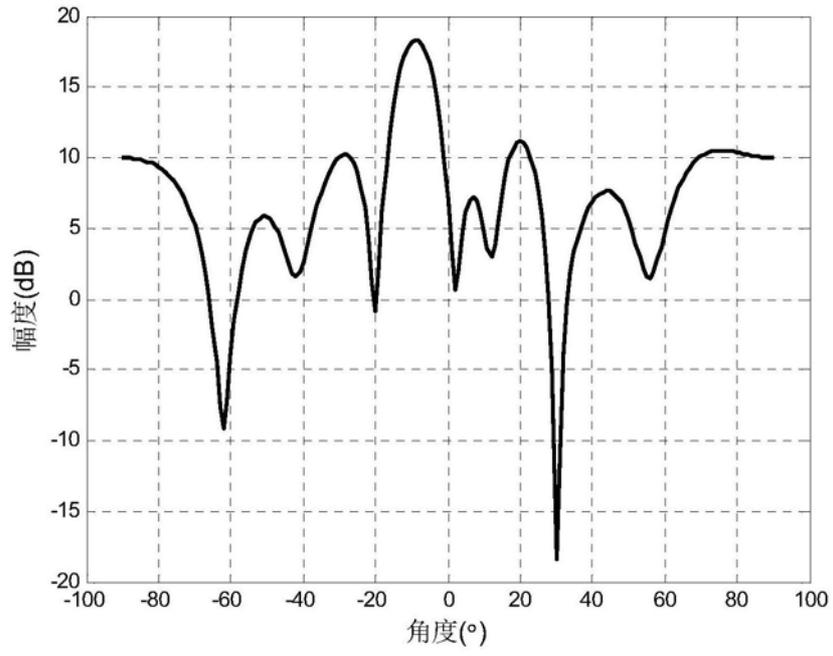


图2 (a)

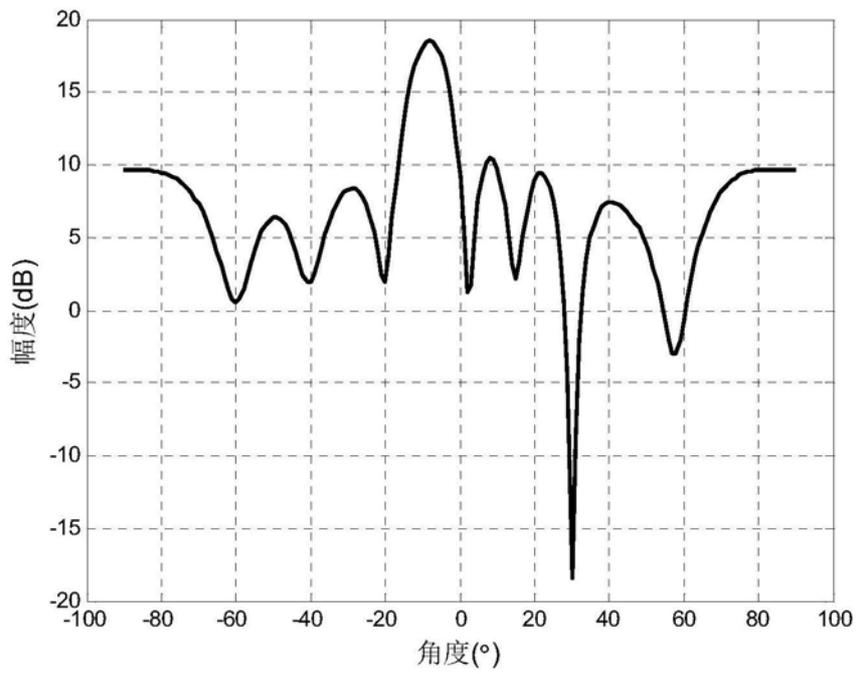


图2 (b)

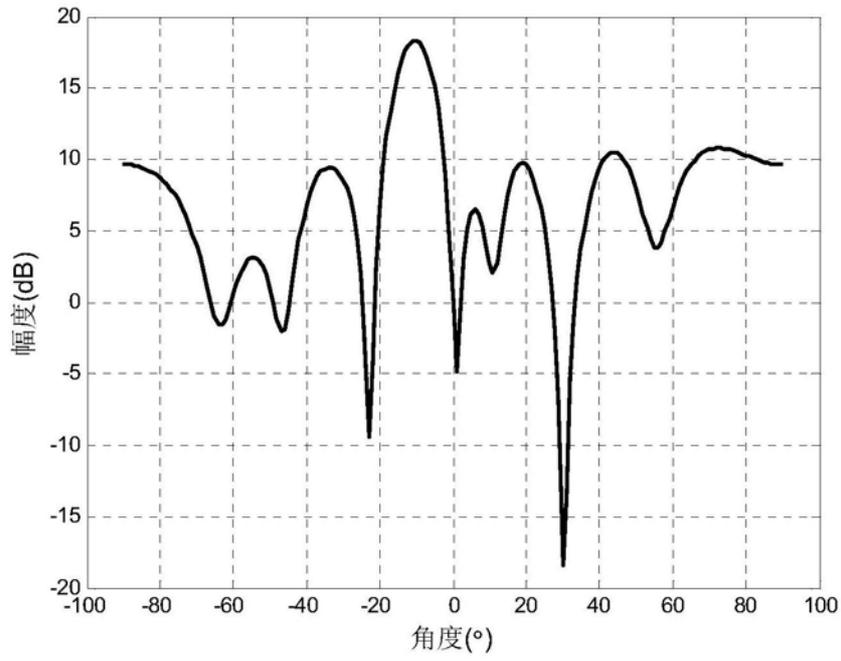


图2(c)

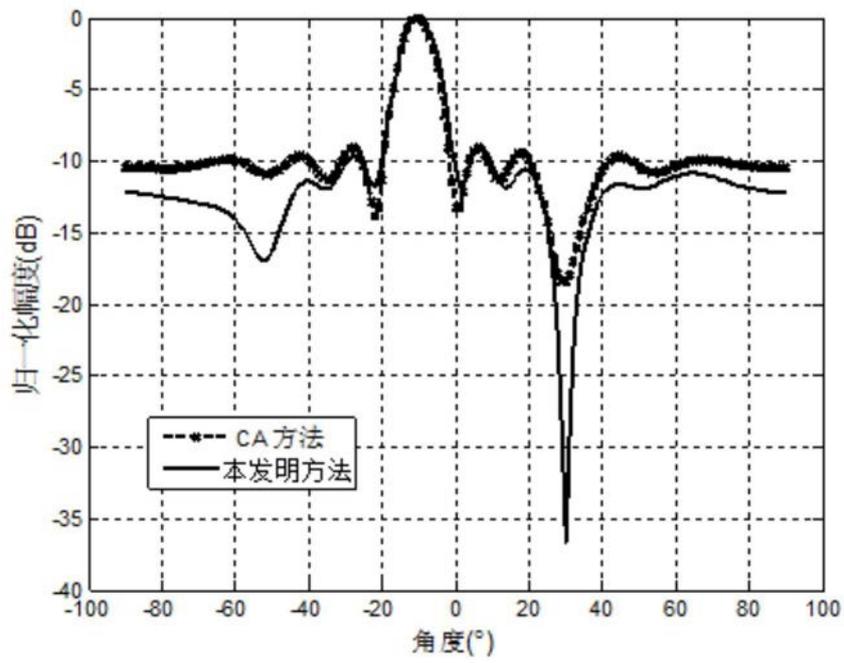


图3

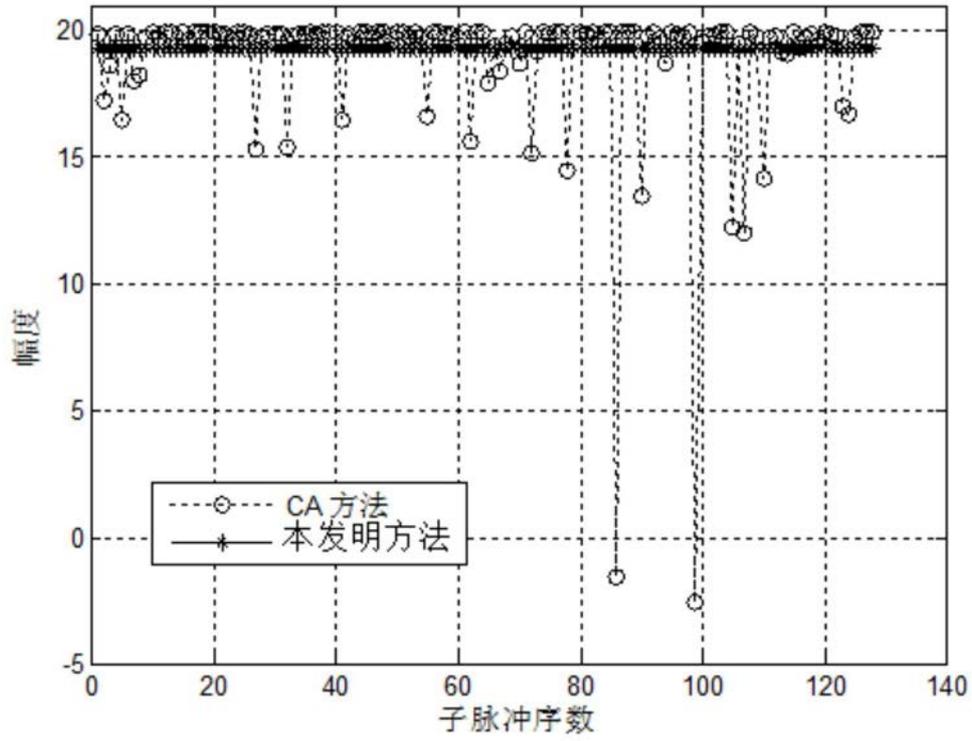


图4

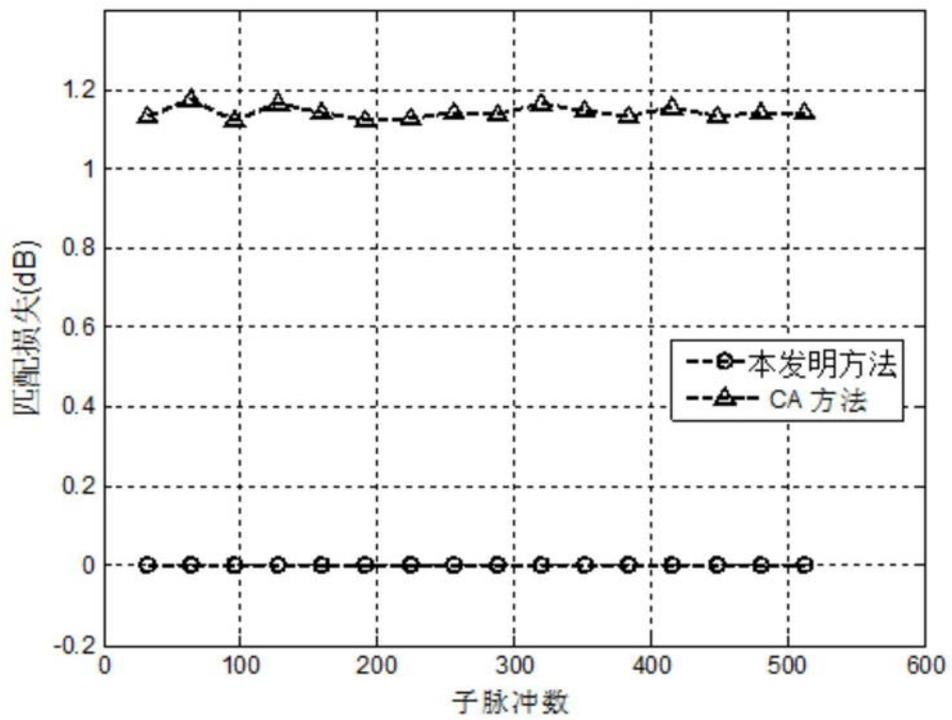


图5