



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114706056 A

(43) 申请公布日 2022.07.05

(21) 申请号 202210456884.6

(22) 申请日 2022.04.28

(71) 申请人 珠海微度芯创科技有限责任公司  
地址 519000 广东省珠海市高新区唐家湾镇大学路101号3栋603-3

(72) 发明人 郑春弟 罗俊 刘文冬 周春元  
高伟 张慧

(74) 专利代理机构 广州嘉权专利商标事务所有  
限公司 44205  
专利代理师 郑宏谋

(51) Int. Cl.  
G01S 7/41 (2006.01)

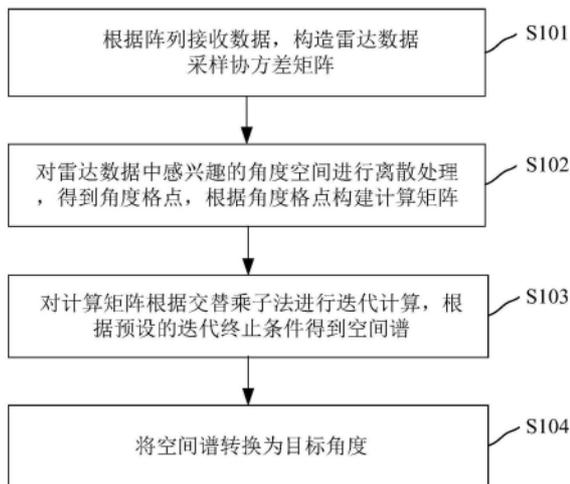
权利要求书2页 说明书9页 附图2页

## (54) 发明名称

基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法、装置和介质

## (57) 摘要

本申请公开了基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法、装置和介质,其中的方法包括:根据阵列接收数据,构造雷达数据采样协方差矩阵;对所述雷达数据中感兴趣的角度空间进行离散处理,得到角度格点,根据所述角度格点构建计算矩阵;对所述计算矩阵根据交替乘法进行迭代计算,根据预设的迭代终止条件得到空间谱;将所述空间谱转换为目标角度。本申请无需事先知道信号个数,计算复杂度比较低,能够有效满足毫米波雷达测角对低复杂度、高分辨力算法的需求。



1. 基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法, 其特征在于, 所述方法包括:

根据阵列接收数据, 构造雷达数据采样协方差矩阵;

对所述雷达数据中感兴趣的角度空间进行离散处理, 得到角度格点, 根据所述角度格点构建计算矩阵;

对所述计算矩阵根据交替乘子法进行迭代计算, 根据预设的迭代终止条件得到空间谱;

将所述空间谱转换为目标角度。

2. 根据权利要求1所述的基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法, 其特征在于, 所述雷达数据采样协方差矩阵的公式为:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathbf{y}(t) \mathbf{y}^H(t)$$

其中,  $\hat{\mathbf{R}}$  为所述采样协方差矩阵,  $\mathbf{y}(t)$  为所述阵列接收数据,  $T$  为采样数,  $\mathbf{y}^H(t)$  为所述阵列接收数据的共轭转置。

3. 根据权利要求1所述的基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法, 其特征在于, 所述根据所述角度格点构建计算矩阵, 包括:

根据所述角度格点构建第一矩阵, 所述超完备基矩阵的公式为:

$$\mathbf{B} = [\mathbf{b}(\theta_1), \dots, \mathbf{b}(\theta_p)]$$

其中,  $\mathbf{B}$  为所述超完备基矩阵,  $\mathbf{b}(\theta_p)$  为第  $p$  个格点上的导向矢量;

构建另一矩阵  $\Phi = [\mathbf{B}, \mathbf{I}_M]$ , 其中,  $\mathbf{I}_M$  为  $M \times M$  的单位矩阵。

4. 根据权利要求1所述的基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法, 其特征在于, 对所述计算矩阵根据交替乘子法进行迭代计算, 所述迭代计算的计算公式包括:

$$\gamma^{k+1} := (\mathbf{Q} + \rho \mathbf{I})^{-1} [\mathbf{w} + \rho (\eta^k - \mathbf{u}^k)]$$

$$\eta^{k+1} := \Theta (\gamma^{k+1} + \mathbf{u}^k)$$

$$\mathbf{u}^{k+1} := \mathbf{u}^k + \gamma^{k+1} - \eta^{k+1}$$

其中,  $\gamma^{k+1}$  为所述空间谱,  $\theta$  为  $0$  与  $\gamma^{k+1} + \mathbf{u}^k$  中的最大值,  $\rho = P + M$ ,  $\mathbf{I}$  为单位阵, 迭代的初始值  $\gamma^0 = \frac{1}{\omega}$ ,  $\eta^0$  和  $\mathbf{u}^0$  均为全零向量。

5. 根据权利要求4所述的基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法, 其特征在于, 对所述计算矩阵根据交替乘子法进行迭代计算后, 当满足预设的迭代次数后停止进行迭代计算, 输出所述空间谱的峰值。

6. 根据权利要求1所述的基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法, 其特征在于, 所述构造雷达数据采样协方差矩阵, 采样得到的数据在所述采样协方差矩阵中表示为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{B} \Gamma \mathbf{B}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_M = \Phi \Pi \Phi^H$$

其中,  $\mathbf{B} \in \mathbb{C}^{M \times P}$  为超完备基矩阵,  $\Gamma = \text{diag}\{\gamma_1, \dots, \gamma_p, \dots, \gamma_p\}$  表示第  $p$  个角度格点上的信号功率。

7. 根据权利要求1所述的基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法, 其特征在于, 所述方法还包括:

根据最小二乘拟合公式获得非负向量, 根据非负元素所在位置得到目标角度, 其中, 所

述最小二乘拟合公式为：

$$\min \gamma^T Q \gamma - 2w^T \gamma \text{ s.t. } \gamma \geq 0$$

其中， $\gamma$  为空间谱， $T$  为采样数， $Q$  为矩阵的Hadamart积， $\omega$  为对角元素组成的列向量。

8. 基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角装置，其特征在于，所述装置包括：

采样模块，用于根据阵列接收数据，构造雷达数据采样协方差矩阵；

构建模块，用于对所述雷达数据中感兴趣的角度空间进行离散处理，得到角度格点，根据所述角度格点构建计算矩阵；

计算模块，用于对所述计算矩阵根据交替乘子法进行迭代计算，根据预设的迭代终止条件得到空间谱；

转换模块，用于将所述空间谱转换为目标角度。

9. 基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角装置，其特征在于，所述装置包括：

至少一个处理器；

至少一个存储器，所述存储器用于存储至少一个程序；

当至少一个所述程序被至少一个所述处理器执行时实现如权利要求1-7中任一项所述的基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法。

10. 介质，其特征在于，所述介质存储有处理器可执行的程序，所述处理器可执行的程序被处理器执行时实现如权利要求1-7中任一项所述的基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法。

## 基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法、装置和介质

### 技术领域

[0001] 本申请涉及毫米波雷达领域,尤其是基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法、装置和介质。

### 背景技术

[0002] 毫米波雷达在智能驾驶、室内检测、智能交通等领域有着广泛的应用。这些应用对于高的角度分辨有着强烈的需求。对于毫米波雷达而言,其角度分辨性能受制于天线的孔径,天线有效孔径越大,则分辨力越高,反之天线孔径越小,则分辨力越差。在常见的应用领域中,天线的孔径不可能非常大,这导致了天线孔径有限和毫米波雷达角度高分辨需求之间存在着较大的矛盾。

[0003] 相关技术中采用快速傅里叶变换(FFT)实现角度的估计,但是FFT的分辨性能受制于瑞利限,导致其无法满足角度高分辨的需求。经典的MUSIC算法,尽管可以实现角度超分辨,但是它需要事先知道目标个数,而在实际中目标个数的确定一直是雷达应用领域中的难题。近些年发展的无需超参数的稀疏恢复算法如SPICE和LIKES等,尽管可以在无需知道信号个数的情况下,实现角度维的超分辨,但是其计算复杂度较高,因而对芯片的算力要求较高,会增加雷达的硬件成本。

[0004] 因此,相关技术存在的上述技术问题亟待解决。

### 发明内容

[0005] 本申请旨在解决相关技术中的技术问题之一。为此,本申请实施例提供基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法、装置和介质,能够基于协方差拟合满足毫米波雷达的高分辨测角。

[0006] 根据本申请实施例一方面,提供基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法,所述方法包括:

[0007] 根据阵列接收数据,构造雷达数据采样协方差矩阵;

[0008] 对所述雷达数据中感兴趣的角度空间进行离散处理,得到角度格点,根据所述角度格点构建计算矩阵;

[0009] 对所述计算矩阵根据交替乘子法进行迭代计算,根据预设的迭代终止条件得到空间谱;

[0010] 将所述空间谱转换为目标角度。

[0011] 在其中一个实施例中,所述采样协方差矩阵的公式为:

$$[0012] \quad \hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathbf{y}(t) \mathbf{y}^H(t)$$

[0013] 其中, $\hat{\mathbf{R}}$ 为所述采样协方差矩阵, $\mathbf{y}(t)$ 为所述阵列接收数据, $T$ 为采样数, $\mathbf{y}^H(t)$ 为所述阵列接收数据的共轭转置。

[0014] 在其中一实施例中,所述根据所述角度格点构建计算矩阵,包括:

[0015] 根据所述角度格点构建第一矩阵,所述超完备基矩阵的公式为:

$$[0016] \quad B = [b(\theta_1), \dots, b(\theta_p)]$$

[0017] 其中,B为所述超完备基矩阵, $b(\theta_p)$ 为第p个格点上的导向矢量;

[0018] 构建另一矩阵 $\Phi = [B, I_M]$ ,其中, $I_M$ 为 $M \times M$ 的单位矩阵。

[0019] 在其中一实施例中,对所述计算矩阵根据交替乘子法进行迭代计算,所述迭代计算的计算公式包括:

$$[0020] \quad \gamma^{k+1} := (Q + \rho I)^{-1} [w + \rho (\eta^k - u^k)]$$

$$[0021] \quad \eta^{k+1} := \Theta (\gamma^{k+1} + u^k)$$

$$[0022] \quad u^{k+1} := u^k + \gamma^{k+1} - \eta^{k+1}$$

[0023] 其中, $\gamma^{k+1}$ 为所述空间谱, $\theta$ 为0与 $\gamma^{k+1} + u^k$ 中的最大值, $\rho = P + M$ ,I为单位阵,迭代的初始值 $\gamma^0 = \frac{1}{\omega}$ , $\eta^0$ 和 $u^0$ 均为全零向量。

[0024] 在其中一实施例中,对所述计算矩阵根据交替乘子法进行迭代计算后,当满足预设的迭代次数后停止进行迭代计算,输出所述空间谱的峰值。

[0025] 在其中一实施例中,所述构造采样协方差矩阵进行雷达数据采样,采样得到的数据在所述采样协方差矩阵中表示为:

$$[0026] \quad R = B \Gamma B^H + \sigma^2 I_M = \Phi \Pi \Phi^H$$

[0027] 其中, $B \in C^{M \times P}$ 为超完备基矩阵, $\Gamma = \text{diag}\{\gamma_1, \dots, \gamma_p, \dots, \gamma_p\}$ 表示第p个角度格点上的信号功率。

[0028] 在其中一实施例中,所述方法还包括:

[0029] 根据最小二乘拟合公式获得非负向量,根据非负元素所在位置得到目标角度,其中,所述最小二乘拟合公式为:

$$[0030] \quad \min \gamma^T Q \gamma - 2w^T \gamma \quad \text{s.t.} \quad \gamma \geq 0$$

[0031] 其中, $\gamma$ 为空间谱,T为采样数,Q为矩阵的Hadamart积, $\omega$ 为对角元素组成的列向量。

[0032] 根据本申请实施例一方面,提供基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角装置,所述装置包括:

[0033] 采样模块,用于根据阵列接收数据,构造采样协方差矩阵进行雷达数据采样;

[0034] 构建模块,用于对所述雷达数据中感兴趣的角度空间进行离散处理,得到角度格点,根据所述角度格点构建计算矩阵;

[0035] 计算模块,用于对所述计算矩阵根据交替乘子法进行迭代计算,根据预设的迭代终止条件得到空间谱;

[0036] 转换模块,用于将所述空间谱转换为目标角度。

[0037] 根据本申请实施例一方面,提供基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角装置,所述装置包括:

[0038] 至少一个处理器;

[0039] 至少一个存储器,所述存储器用于存储至少一个程序;

[0040] 当至少一个所述程序被至少一个所述处理器执行时实现如前面实施例所述的基

于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法。

[0041] 根据本申请实施例一方面,提供介质,所述介质存储有处理器可执行的程序,所述处理器可执行的程序被处理器执行时实现如前面实施例所述的基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法。

[0042] 本申请实施例提供的基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法、装置和介质的有益效果为:本申请根据阵列接收数据,构造采样协方差矩阵进行雷达数据采样;对所述雷达数据中感兴趣的角度空间进行离散处理,得到角度格点,根据所述角度格点构建计算矩阵;对所述计算矩阵根据交替乘子法进行迭代计算,根据预设的迭代终止条件得到空间谱;将所述空间谱转换为目标角度。本申请无需事先知道信号个数,计算复杂度比较低,能够有效满足毫米波雷达测角对低复杂度、高分辨力算法的需求。

[0043] 本申请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,或通过本申请的实践了解到。

### 附图说明

[0044] 为了更清楚地说明本申请实施例中的技术方案,下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本申请的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0045] 图1为本申请实施例提供的一种基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法的流程图;

[0046] 图2为本申请实施例提供的一种基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法得到的目标角度估计结果图;

[0047] 图3为传统FFT方法得到的目标角度估计结果图;

[0048] 图4为本申请实施例提供的一种基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角装置的示意图;

[0049] 图5为本申请实施例提供的一种基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角装置的另一示意图。

### 具体实施方式

[0050] 为了使本技术领域的人员更好地理解本申请方案,下面将结合本申请实施例中的附图,对本申请实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本申请一部分的实施例,而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都应当属于本申请保护的范围。

[0051] 本申请的说明书和权利要求书及附图中的术语“第一”、“第二”、“第三”和“第四”等是用于区别不同对象,而不是用于描述特定顺序。此外,术语“包括”和“具有”以及它们任何变形,意图在于覆盖不排他的包含。例如包含了一系列步骤或单元的过程、方法、系统、产品或设备没有限定于已列出的步骤或单元,而是可选地还包括没有列出的步骤或单元,或可选地还包括对于这些过程、方法、产品或设备固有的其它步骤或单元。

[0052] 在本文中提及“实施例”意味着,结合实施例描述的特定特征、结构或特性可以包含在本申请的至少一个实施例中。在说明书中的各个位置出现该短语并不一定均是指相同的实施例,也不是与其它实施例互斥的独立的或备选的实施例。本领域技术人员显式地和隐式地理解的是,本文所描述的实施例可以与其它实施例相结合。

[0053] 毫米波雷达在智能驾驶、室内检测、智能交通等领域有着广泛的应用。这些应用对于高的角度分辨有着强烈的需求。对于毫米波雷达而言,其角度分辨性能受制于天线的孔径,天线有效孔径越大,则分辨力越高,反之天线孔径越小,则分辨力越差。在常见的应用领域中,天线的孔径不可能非常大,这导致了天线孔径有限和毫米波雷达角度高分辨需求之间存在着较大的矛盾。

[0054] 相关技术中采用快速傅里叶变换(FFT)实现角度的估计,但是FFT的分辨性能受制于瑞利限,导致其无法满足角度高分辨的需求。经典的MUSIC算法,尽管可以实现角度超分辨,但是它需要事先知道目标个数,而在实际中目标个数的确定一直是雷达应用领域中的难题。近些年发展的无需超参数的稀疏恢复算法如SPICE和LIKES等,尽管可以在无需知道信号个数的情况下,实现角度维的超分辨,但是其计算复杂度较高,因而对芯片的算力要求较高,会增加雷达的硬件成本。

[0055] 为了解决上述问题,本申请提出了一种基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法、装置和介质。

[0056] 为了便于理解,本说明书对相关名词进行解释:

[0057] 毫米波:毫米波(millimeter wave):波长为1~10毫米的电磁波称毫米波,位于微波与远红外波相交叠的波长范围,因而兼有两种波谱的特点。毫米波的理论和技术分别是微波向高频的延伸和光波向低频的发展。

[0058] 毫米波雷达:毫米波雷达是工作在毫米波波段(millimeter wave)探测的雷达。通常毫米波是指30~300GHz频段(波长为1~10mm)的。毫米波的波长介于微波和厘米波之间,因此毫米波雷达兼有微波雷达和光电雷达的一些优点。同厘米波导引头相比,毫米波导引头具有体积小、质量轻和空间分辨率高的特点。与红外、激光、电视等光学导引头相比,毫米波导引头穿透雾、烟、灰尘的能力强,具有全天候(大雨天除外)全天时的特点。另外,毫米波导引头的抗干扰、反隐身能力也优于其他微波导引头。毫米波雷达能分辨识别很小的目标,而且能同时识别多个目标;具有成像能力,体积小、机动性和隐蔽性好,在战场上生存能力强。

[0059] 协方差:协方差(Covariance)在概率论和统计学中用于衡量两个变量的总体误差。而方差是协方差的一种特殊情况,即当两个变量是相同的情况。协方差表示的是两个变量的总体的误差,这与只表示一个变量误差的方差不同。如果两个变量的变化趋势一致,也就是说如果其中一个大于自身的期望值,另外一个也大于自身的期望值,那么两个变量之间的协方差就是正值。如果两个变量的变化趋势相反,即其中一个大于自身的期望值,另外一个却小于自身的期望值,那么两个变量之间的协方差就是负值。

[0060] 本申请提出的基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法、装置和介质的原理和推导过程包括:对于毫米波雷达的角度估计问题,考虑如下线性模型:

[0061]  $y(t) = Ax(t) + n(t), t = 1, \dots, T.$

[0062] 其中 $y(t) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 、 $x(t) \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 和 $n(t) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 分别表示观测向量、信号和噪声向量;

$\mathbf{A}=[\mathbf{a}_1(\varphi_1), \dots, \mathbf{a}_K(\varphi_K)] \in \mathbf{C}^{M \times K}$ ,  $\mathbf{a}_k(\varphi_k)$ 为第k个目标的导向矢量,  $\|\mathbf{a}_k\|_2 = \sqrt{M}$  ( $k=1, \dots, K$ ),  $\varphi_k$ 为第k个信号的角度,  $\|\cdot\|_2$ 表示向量的2范数;  $M$ 表示实际阵元个数,  $T$ 表示采样数,  $K$ 表示信号个数。模型中假设噪声  $n(t)$  是均值为零、方差为  $\sigma^2$  的复高斯白噪声, 且噪声与信号不相关。

[0063] 在不相关信号假设下, 上述公式的协方差矩阵可以表示为:

$$[0064] \quad \mathbf{R} = \mathbf{E}\{y(t)y^H(t)\} = \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I}_M$$

[0065] 其中  $\mathbf{R}_s = \text{diag}\{\delta_1, \dots, \delta_K\}$ ,  $\delta_k = \mathbf{E}\{s_k(t)s_k^H(t)\}$ ;  $\mathbf{I}_M$ 、 $\mathbf{E}\{\cdot\}$ 、 $(\cdot)^H$ 、 $\text{diag}\{\cdot\}$  分别表示  $M \times M$  的单位阵、数学期望、共轭转置和对角阵。在实际处理中, 通常用采样协方差矩阵  $\hat{\mathbf{R}}$  替代  $\mathbf{R}$ , 其中采样协方差矩阵可以表示为:

$$[0066] \quad \hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathbf{y}(t)\mathbf{y}^H(t)$$

[0067] 基于上述原理和推导过程, 本申请提出了基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法, 如图1所示, 本申请的基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法具体包括:

[0068] S101、根据阵列接收数据, 构造雷达数据采样协方差矩阵。

[0069] 在本实施例中, 步骤S101中采用的所述采样协方差矩阵的公式为:

$$[0070] \quad \hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathbf{y}(t)\mathbf{y}^H(t)$$

[0071] 其中,  $\hat{\mathbf{R}}$  为所述采样协方差矩阵,  $y(t)$  为所述阵列接收数据,  $T$  为采样数,  $y^H(t)$  为所述阵列接收数据的共轭转置。

[0072] S102、对所述雷达数据中感兴趣的角度空间进行离散处理, 得到角度格点, 根据所述角度格点构建计算矩阵。

[0073] S103、对所述计算矩阵根据交替乘法进行迭代计算, 根据预设的迭代终止条件得到空间谱。

[0074] S104、将所述空间谱转换为目标角度。

[0075] 本实施例将感兴趣的角度空间离散化成  $p$  个格点, 在稀疏表征框架下, 可以将上述原理中的协方差矩阵表示为:

$$[0076] \quad \mathbf{R} = \mathbf{B}\mathbf{\Gamma}\mathbf{B}^H + \sigma^2\mathbf{I}_M = \mathbf{\Phi}\mathbf{\Pi}\mathbf{\Phi}^H$$

[0077] 其中  $\mathbf{B} \in \mathbf{C}^{M \times P}$  为超完备基矩阵, 即它的第  $p$  ( $p=1, \dots, P$ ) 列可以认为是离散角度  $\theta_p$  的函数的导向矢量, 且有  $\mathbf{A} \subseteq \mathbf{B}$ ;  $\mathbf{\Gamma} = \text{diag}\{\gamma_1, \dots, \gamma_p, \dots, \gamma_p\}$ ,  $\gamma_p \geq 0$  表示第  $p$  个格点上的信号功率;  $\mathbf{\Phi} = [\mathbf{B}, \mathbf{I}_M]$ ,  $\mathbf{\Pi} = \text{diag}\{\gamma_1, \dots, \gamma_p, \dots, \gamma_p, \underbrace{\sigma^2, \dots, \sigma^2}_M\}$ 。根据稀疏表征理论, 当且仅当  $\theta_p \in$

$\{\psi_k, k=1, \dots, K\}$  时,  $\gamma_p > 0$ , 否则  $\gamma_p = 0$ 。即通过寻找空间谱  $\gamma$  中非零元素的位置, 可获得对角度  $\varphi_k$  的估计。需要解释的是, 稀疏表征理论即通过最小数量的系数尽可能更多的描述信号的能量。不同类型的信号, 其在不同变换下系数的分布会不同。

[0078] 在本实施例中, 可以考虑如下加权协方差拟合问题:

$$[0079] \quad \min \|\hat{\mathbf{R}}^{-1}(\hat{\mathbf{R}} - \mathbf{R})\|_F^2$$

[0080] 式中  $\|\cdot\|_F$  表示矩阵的Frobenius范数。根据Frobenius范数和矩阵迹之间的关

系,可得:

$$\begin{aligned} [0081] \quad & \|\hat{\mathbf{R}}^{-1}(\hat{\mathbf{R}} - \mathbf{R})\|_F^2 = \text{trace} \left[ (\mathbf{I}_M - \hat{\mathbf{R}}^{-1}\mathbf{R})(\mathbf{I}_M - \hat{\mathbf{R}}^{-1}\mathbf{R})^H \right] \\ & = \text{trace}(\mathbf{I}_M) - \text{trace}(2\hat{\mathbf{R}}^{-1}\mathbf{R}) + \text{trace}(\hat{\mathbf{R}}^{-1}\mathbf{R}\hat{\mathbf{R}}^{-1}\mathbf{R}) \end{aligned}$$

[0082] 式中 $\text{trace}(\cdot)$ 表示矩阵的迹。将公式(4),带入公式(6)可得:

$$\begin{aligned} [0083] \quad & \|\hat{\mathbf{R}}^{-1}(\hat{\mathbf{R}} - \mathbf{R})\|_F^2 = \text{trace}(\mathbf{I}_M) - 2\text{trace}(\hat{\mathbf{R}}^{-1}\Phi\Pi\Phi^H) + \text{trace}(\hat{\mathbf{R}}^{-1}\Phi\Pi\Phi^H\hat{\mathbf{R}}^{-1}\Phi\Pi\Phi^H) \\ & = \text{trace}(\mathbf{I}_M) - 2\text{trace}(\Phi^H\hat{\mathbf{R}}^{-1}\Phi\Pi) + \text{trace}(\Phi^H\hat{\mathbf{R}}^{-1}\Phi\Pi\Phi^H\hat{\mathbf{R}}^{-1}\Phi\Pi) \\ & = \text{trace}(\mathbf{I}_M) - 2\mathbf{w}^T\boldsymbol{\gamma} + \boldsymbol{\gamma}^T\mathbf{Q}\boldsymbol{\gamma} \end{aligned}$$

$$[0084] \quad \text{式中 } \boldsymbol{\gamma} = \left[ \gamma_1, \dots, \gamma_p, \dots, \gamma_P, \underbrace{\sigma^2, \dots, \sigma^2}_M \right]^T, \quad \mathbf{Q} = (\Phi^H\hat{\mathbf{R}}^{-1}\Phi) \cdot * (\Phi^H\hat{\mathbf{R}}^{-1}\Phi)^T, \quad () \cdot * () \text{ 代表}$$

矩阵的Hadamart积, $\mathbf{w}$ 为 $\Phi^H\hat{\mathbf{R}}^{-1}\Phi$ 的对角元素组成的列向量。

[0085] 因此,本实施例中获得目标角度的方法还包括:根据最小二乘拟合公式获得非负向量,根据非负元素所在位置得到目标角度,其中,所述最小二乘拟合公式为:

$$[0086] \quad \min \boldsymbol{\gamma}^T\mathbf{Q}\boldsymbol{\gamma} - 2\mathbf{w}^T\boldsymbol{\gamma} \quad \text{s.t. } \boldsymbol{\gamma} \geq 0$$

[0087] 其中, $\boldsymbol{\gamma}$ 为空间谱, $T$ 为采样数, $\mathbf{Q}$ 为矩阵的Hadamart积, $\boldsymbol{\omega}$ 为对角元素组成的列向量。需要说明的是,尽管非负最小二乘问题有大量的求解方法,但它们的复杂度、稳健性、精确性在稀疏恢复中并不令人满意。本实施例结合了交替方向乘子法(ADMM),对最小二乘拟合进行求解,能够在复杂度与稳健性之间寻求折中处理,使复杂度在合理水平内提高计算结果的准确性。

[0088] 具体地,本实施例中所述根据所述角度格点构建计算矩阵,包括:根据所述角度格点构建第一矩阵,所述超完备基矩阵的公式为:

$$[0089] \quad \mathbf{B} = [b(\theta_1), \dots, b(\theta_p)]$$

[0090] 其中, $\mathbf{B}$ 为所述超完备基矩阵, $b(\theta_p)$ 为第 $p$ 个格点上的导向矢量;构建另一矩阵 $\Phi = [\mathbf{B}, \mathbf{I}_M]$ ,其中, $\mathbf{I}_M$ 为 $M \times M$ 的单位矩阵。

[0091] 在本实施例的步骤S103中,对所述计算矩阵根据交替乘子法进行迭代计算,所述迭代计算的计算公式包括:

$$[0092] \quad \boldsymbol{\gamma}^{k+1} := (\mathbf{Q} + \rho\mathbf{I})^{-1} [\mathbf{w} + \rho(\boldsymbol{\eta}^k - \mathbf{u}^k)]$$

$$[0093] \quad \boldsymbol{\eta}^{k+1} := \Theta(\boldsymbol{\gamma}^{k+1} + \mathbf{u}^k)$$

$$[0094] \quad \mathbf{u}^{k+1} := \mathbf{u}^k + \boldsymbol{\gamma}^{k+1} - \boldsymbol{\eta}^{k+1}$$

[0095] 其中, $\boldsymbol{\gamma}^{k+1}$ 为所述空间谱, $\theta$ 为0与 $\boldsymbol{\gamma}^{k+1} + \mathbf{u}^k$ 中的最大值, $\rho = P + M$ , $\mathbf{I}$ 为单位阵,迭代的初始值 $\boldsymbol{\gamma}^0 = \frac{1}{\boldsymbol{\omega}}$ , $\boldsymbol{\eta}^0$ 和 $\mathbf{u}^0$ 均为全零向量。

[0096] 在本实施例对所述计算矩阵根据交替乘子法进行迭代计算后,当满足预设的迭代次数后停止进行迭代计算,输出所述空间谱的峰值。预设的迭代次数可以是有技术人员自主设置,也可以根据实际需要进行变更,在合理范围内迭代次数越多则对于目标角度的计算越准确。

[0097] 在本实施例中,所述构造采样协方差矩阵进行雷达数据采样,采样得到的数据在

所述采样协方差矩阵中表示为：

$$[0098] \quad R = B \Gamma B^H + \sigma^2 I_M = \Phi \Pi \Phi^H$$

[0099] 其中,  $B \in C^{M \times P}$  为超完备基矩阵,  $\Gamma = \text{diag}\{\gamma_1, \dots, \gamma_p, \dots, \gamma_p\}$  表示第  $p$  个角度格点上的信号功率。

[0100] 针对本申请提供的基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法的效果,如图2和图3所示,图2为本申请实施例提供的一种基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法得到的目标角度估计结果图,图3为传统FFT方法得到的目标角度估计结果图。在一次实验中两个角反射器距离雷达约2.8米,两个角反射器之间的横向距离(即方位角)为0.8米,雷达为工作在77GHz的毫米波雷达,共有4个等效阵元,阵元间距为0.5倍的波长。在本实验条件下,这两个角反射器的方位角相隔约为0.49倍的瑞利限。分别为本申请提出方法和传统FFT方法得到的方位角估计结果,通过对比分析图2和图3可以发现,在相同的横向距离实验中,显然本申请提出的方法能够实现超分辨角度估计,其分辨性能明显优于传统的FFT方法。因此本申请无需事先知道信号个数,计算复杂度比较低,能够有效满足毫米波雷达测角对低复杂度、高分辨力算法的需求。

[0101] 此外,如图4所示,本申请还提供了基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角装置,包括:采样模块401,用于根据阵列接收数据,构造雷达数据采样协方差矩阵;构建模块402,用于对所述雷达数据中感兴趣的角度空间进行离散处理,得到角度格点,根据所述角度格点构建计算矩阵;计算模块403,用于对所述计算矩阵根据交替乘子法进行迭代计算,根据预设的迭代终止条件得到空间谱;转换模块404,用于将所述空间谱转换为目标角度。

[0102] 此外,如图5所示,本申请还提供了基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角装置,所述装置包括:

[0103] 至少一个处理器501;

[0104] 至少一个存储器502,所述存储器502用于存储至少一个程序;

[0105] 当至少一个所述程序被至少一个所述处理器501执行时实现如前面实施例所述的基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法。

[0106] 上述方法实施例中的内容均适用于本装置中,本装置所具体实现的功能与上述方法实施例相同,并且达到的有益效果与上述方法实施例所达到的有益效果也相同。

[0107] 本申请还提供了介质,所述介质存储有处理器可执行的程序,所述处理器可执行的程序被处理器执行时实现如前面实施例所述的基于协方差拟合的毫米波雷达高分辨测角方法。

[0108] 同理,上述方法实施例中的内容均适用于本介质实施例中,本介质实施例所具体实现的功能与上述方法实施例相同,并且达到的有益效果与上述方法实施例所达到的有益效果也相同。

[0109] 在一些可选择的实施例中,在方框图中提到的功能/操作可以不按照操作示意图提到的顺序发生。例如,取决于所涉及的功能/操作,连续示出的两个方框实际上可以被大体上同时地执行或方框有时能以相反顺序被执行。此外,在本申请的流程图中所呈现和描述的实施例以示例的方式被提供,目的在于提供对技术更全面的理解。所公开的方法不限于本文所呈现的操作和逻辑流程。可选择的实施例是可预期的,其中各种操作的顺序被改变以及其中被描述为较大操作的一部分的子操作被独立地执行。

[0110] 此外,虽然在功能性模块的背景下描述了本申请,但应当理解的是,除非另有相反说明,功能和/或特征中的一个或多个可以被集成在单个物理装置和/或软件模块中,或者一个或多个功能和/或特征可以在单独的物理装置或软件模块中被实现。还可以理解的是,有关每个模块的实际实现的详细讨论对于理解本申请是不必要的。更确切地说,考虑到在本文中公开的装置中各种功能模块的属性、功能和内部关系的情况下,在工程师的常规技术内将会了解该模块的实际实现。因此,本领域技术人员运用普通技术就能够在无需过度试验的情况下实现在权利要求书中所阐明的本申请。还可以理解的是,所公开的特定概念仅仅是说明性的,并不意在限制本申请的范围,本申请的范围由所附权利要求书及其等同方案的全部范围来决定。

[0111] 功能如果以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用,可以存储在一个计算机可读取存储介质中。基于这样的理解,本申请的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品存储在一个存储介质中,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备)执行本申请各个实施例方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括:U盘、移动硬盘、只读存储器(ROM,Read-Only Memory)、随机存取存储器(RAM,Random Access Memory)、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0112] 在流程图中表示或在此以其他方式描述的逻辑和/或步骤,例如,可以被认为用于实现逻辑功能的可执行指令的定序列表,可以具体实现在任何计算机可读介质中,以供指令执行系统、装置或设备(如基于计算机的系统、包括处理器的系统或其他可以从指令执行系统、装置或设备取指令并执行指令的系统)使用,或结合这些指令执行系统、装置或设备而使用。就本说明书而言,“计算机可读介质”可以是任何可以包含、存储、通信、传播或传输程序以供指令执行系统、装置或设备或结合这些指令执行系统、装置或设备而使用的装置。

[0113] 计算机可读介质的更具体的示例(非穷尽性列表)包括以下:具有一个或多个布线的电连接部(电子装置),便携式计算机盘盒(磁装置),随机存取存储器(RAM),只读存储器(ROM),可擦除可编程只读存储器(EEPROM或闪速存储器),光纤装置,以及便携式光盘只读存储器(CDROM)。另外,计算机可读介质甚至可以是可在其上打印程序的纸或其他合适的介质,因为可以例如通过对纸或其他介质进行光学扫描,接着进行编辑、解译或必要时以其他合适方式进行处理来以电子方式获得程序,然后将其存储在计算机存储器中。

[0114] 应当理解,本申请的各部分可以用硬件、软件、固件或它们的组合来实现。在上述实施方式中,多个步骤或方法可以用存储在存储器中且由合适的指令执行系统执行的软件或固件来实现。例如,如果用硬件来实现,和在另一实施方式中一样,可用本领域公知的下列技术中的任一项或他们的组合来实现:具有用于对数据信号实现逻辑功能的逻辑门电路的离散逻辑电路,具有合适的组合逻辑门电路的专用集成电路,可编程门阵列(PGA),现场可编程门阵列(FPGA)等。

[0115] 在本说明书的上述描述中,参考术语“一个实施方式/实施例”、“另一实施方式/实施例”或“某些实施方式/实施例”等的描述意指结合实施方式或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本申请的至少一个实施方式或示例中。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方式或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或

者特点可以在任何的一个或多个实施方式或示例中以合适的方式结合。

[0116] 尽管已经示出和描述了本申请的实施方式,本领域的普通技术人员可以理解:在不脱离本申请的原理和宗旨的情况下可以对这些实施方式进行多种变化、修改、替换和变型,本申请的范围由权利要求及其等同物限定。

[0117] 以上,以上实施例仅用以说明本申请的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本申请进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本申请各实施例技术方案的精神和范围。

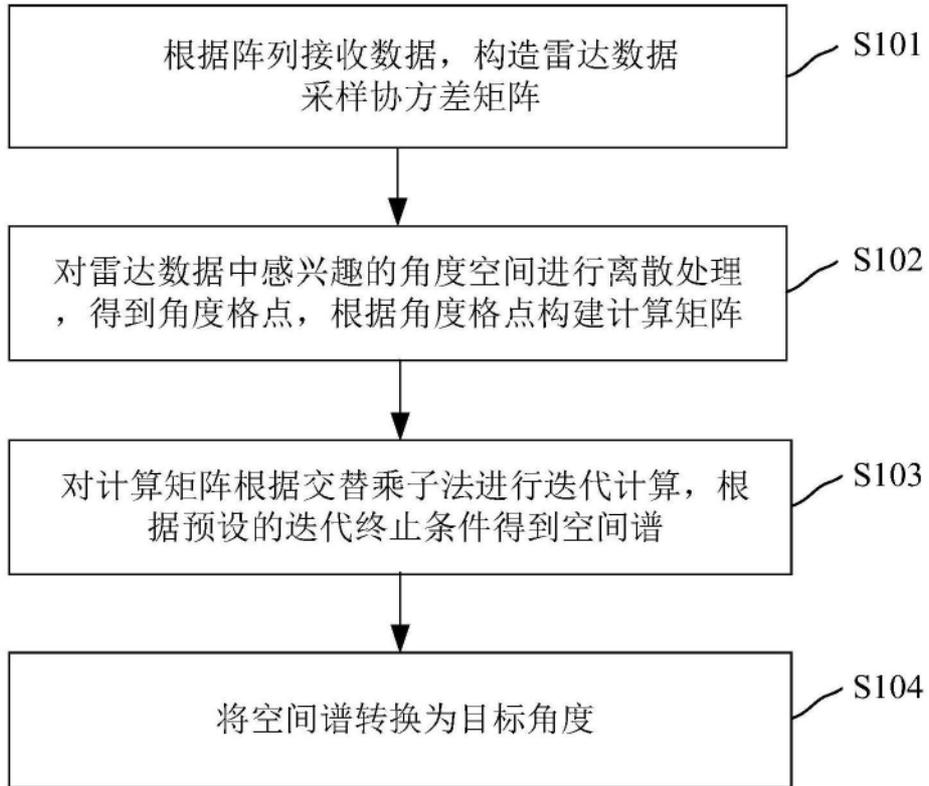


图1

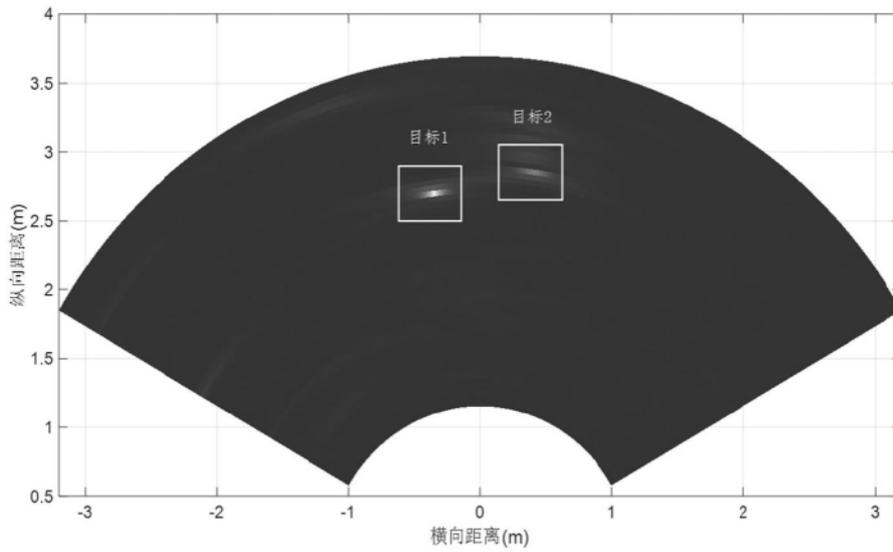


图2

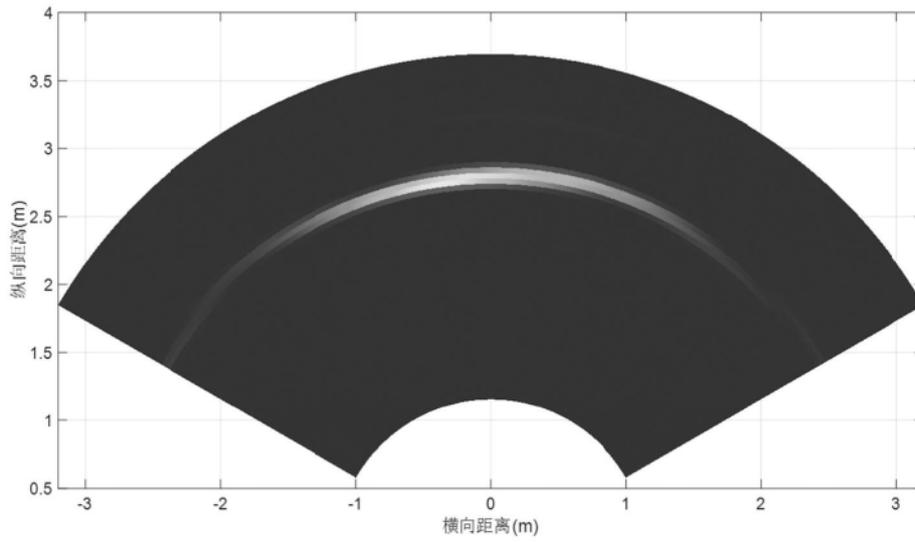


图3

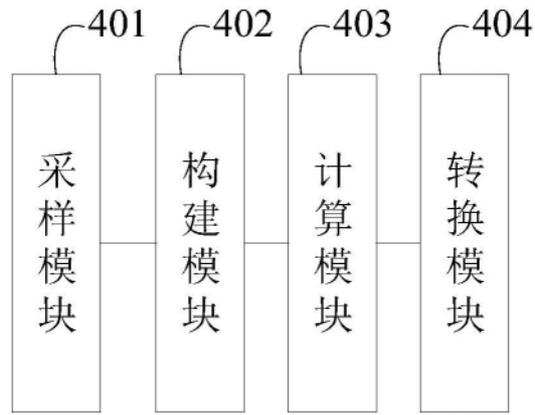


图4

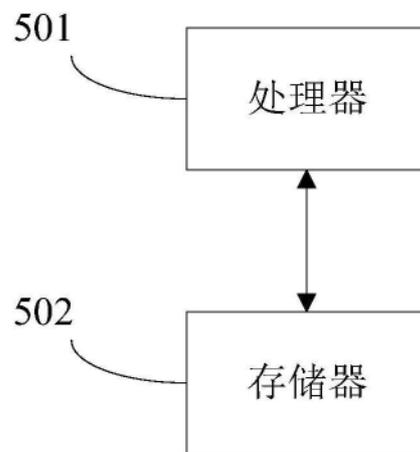


图5