



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112816936 B

(45) 授权公告日 2024.04.16

(21) 申请号 202011619778.2

CN 103901417 A, 2014.07.02

(22) 申请日 2020.12.31

CN 106324556 A, 2017.01.11

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 107092004 A, 2017.08.25

申请公布号 CN 112816936 A

CN 107290709 A, 2017.10.24

(43) 申请公布日 2021.05.18

CN 107329108 A, 2017.11.07

(73) 专利权人 中国人民解放军空军工程大学

CN 108344967 A, 2018.07.31

地址 710038 陕西省西安市灞桥区长乐东路甲字一号

CN 109709510 A, 2019.05.03

CN 109917329 A, 2019.06.21

CN 112130111 A, 2020.12.25

(72) 发明人 葛启超 郭艺夺 冯为可 胡晓伟 宫健

US 2005285788 A1, 2005.12.29

US 2008231505 A1, 2008.09.25

US 2019212411 A1, 2019.07.11

(74) 专利代理机构 成都初阳知识产权代理事务所(特殊普通合伙) 51305

宫健等. 相关噪声环境下相干源 2D-DOA 估计方法. 雷达科学与技术. 2017, (第4期), 全文. (续)

专利代理师 邓金涛

审查员 吴莎

(51) Int. Cl.

G01S 3/00 (2006.01)

G01S 7/41 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 106054123 A, 2016.10.26

US 2006208947 A1, 2006.09.21

权利要求书2页 说明书7页 附图3页

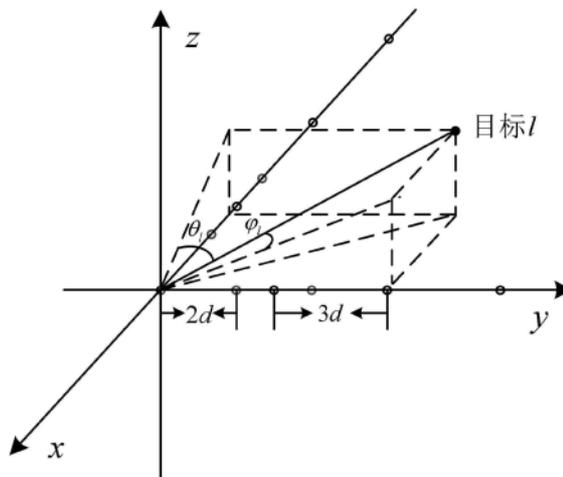
(54) 发明名称

基于矩阵匹配的二维稀疏线阵波达方向估计方法

(57) 摘要

本发明涉及一种波达方向的估计方法,具体涉及一种基于矩阵匹配的二维稀疏线阵波达方向估计方法,包括如下步骤:建立二维稀疏线阵二维波达方向估计的基本模型,定义第1个信号的入射角度为 (θ_1, φ_1) ,假设共有L个远场窄带信号入射到阵列中,得出阵列中两子阵在k时刻的接收数据,根据接收到的数据得出两个子阵的接收数据协方差矩阵,得出两个子阵在x轴和y轴上形成虚拟阵列中连续ULA部分的虚拟接收数据,利用虚拟接收数据构造Toeplitz矩阵,然后通过构造空间谱函数,分别得出二维角度的估计值 $\{\hat{\varphi}_l\}_{l=1}^L$ 和 $\{\hat{\theta}_l\}_{l=1}^L$,假设与估计值 $\{\hat{\theta}_l\}_{l=1}^L$ 中 $\hat{\theta}_l$ 相

对应的另一维角度估计值是 $\{\hat{\varphi}'_l\}_{l=1}^L$,依次进行最小二乘算法、矩阵特征分解得出角度估计值为 $\{(\hat{\theta}_l, \hat{\varphi}'_l)\}_{l=1}^L$ 。



CN 112816936 B

[接上页]

(56) 对比文件

Qichao Ge等.A Low Complexity Algorithm for Direction of Arrival Estimation With Direction-Dependent Mutual Coupling.IEEE COMMUNICATIONS LETTERS.2020,第24卷(第1期),全文.

盘敏容;蒋留兵;车俐;姜兴.基于协方差矩阵重构的互质阵列DOA估计.雷达科学与技术.2020,(第01期),全文.

Hua Chen等.Cumulants-Based Toeplitz Matrices Reconstruction Method for 2-D Coherent DOA Estimation.IEEE SENSORS JOURNAL.2014,第14卷(第8期),全文.

1. 一种基于矩阵匹配的二维稀疏线阵波达方向估计方法,其特征在于包括如下步骤:

S1、建立二维稀疏线阵二维波达方向估计的基本模型,所述二维稀疏线阵二维波达方向估计的基本模型包括 $M_1=2d$ 和 $M_2=3d$ 的两个子阵,其中 d 为半波长,称 x 、 y 轴上的两个子阵为 \mathbb{S}_x 和 \mathbb{S}_y ;

S2、定义第1个信号的入射角度为 (θ_1, φ_1) ,其中 θ_1 、 φ_1 分别为信号入射方向与 xoz 、 $yozy$ 面的夹角,假设共有 L 个远场窄带信号入射到阵列中,得出阵列中两子阵在 k 时刻的接收数据;

S3、根据接收到的数据得出两个子阵的接收数据协方差矩阵;

S4、根据两个子阵的接收数据协方差矩阵在 x 轴和 y 轴上形成虚拟阵列中连续ULA部分的虚拟接收数据;

S5、利用虚拟接收数据构造Toeplitz矩阵,然后通过构造空间谱函数,分别得出二维角度的估计值 $\{\hat{\varphi}_l\}_{l=1}^L$ 和 $\{\hat{\theta}_l\}_{l=1}^L$;

S6、假设与估计值 $\{\hat{\theta}_l\}_{l=1}^L$ 中 $\hat{\theta}_l$ 相对应的另一维角度估计值是 $\{\hat{\varphi}'_l\}_{l=1}^L$,其中 $\{\hat{\varphi}'_l\}_{l=1}^L$ 是对 $\{\hat{\varphi}_l\}_{l=1}^L$ 的重新排序,得 $[\hat{\varphi}'_1, \hat{\varphi}'_2, \dots, \hat{\varphi}'_L] = [\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2, \dots, \hat{\varphi}_L] \mathbf{T}$,其中 $\mathbf{T} \in \{0, 1\}^{L \times L}$,为列变换矩阵;

S7、假设由 $\{\hat{\varphi}'_l\}_{l=1}^L$ 计算得到的阵列流形矩阵为 $\hat{\mathbf{A}}'_{\mathbb{S}_{T,x}}$,由前式可知: $\hat{\mathbf{A}}'_{\mathbb{S}_{T,x}} = \hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,x}} \mathbf{T}$;因此,可以认为矩阵 $\hat{\mathbf{A}}'_{\mathbb{S}_{T,x}}$ 和矩阵 $\hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,y}}$ 的每一列是相匹配的,即有: $\mathbf{R}_{xy} \approx \hat{\mathbf{A}}'^H_{\mathbb{S}_{T,x}} \mathbf{R}_s \hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,y}}$;将

$\hat{\mathbf{A}}'_{\mathbb{S}_{T,x}} = \hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,x}} \mathbf{T}$ 带入到 $\mathbf{R}_{xy} \approx \hat{\mathbf{A}}'^H_{\mathbb{S}_{T,x}} \mathbf{R}_s \hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,y}}$ 中,可得 $\mathbf{R}_{xy} \approx \hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,x}} \mathbf{T} \mathbf{R}_s \hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,y}}^H$;此时角度的匹配问题转化为了变换矩阵的求解问题,对于矩阵 \mathbf{T} 可通过如下最小化优化模型求解:

$$\hat{\mathbf{T}} = \arg \min_{\mathbf{T}} \left\| \mathbf{R}_{xy} - \hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,x}} \mathbf{T} \mathbf{R}_s \hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,y}}^H \right\|_F^2;$$

特别的是,当满足 $L \leq M_{T,x}$ 时,前式为最小二乘问题,矩阵 $\hat{\mathbf{T}}$ 具有显式表达式:

$$\hat{\mathbf{T}} = \left(\hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,x}} \right)^\dagger \mathbf{R}_{xy} \left(\mathbf{R}_s \hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,y}}^H \right)^\dagger;$$

对于子阵 \mathbb{S}_x 的接收数据协方差矩阵 $\mathbf{R}_{\mathbb{S}_x}$ 进行特征分解可得: $\mathbf{R}_{\mathbb{S}_x} = \mathbf{U}_{x,s} \mathbf{A}_{x,s} \mathbf{U}_{x,s}^H + \mathbf{U}_{x,n} \mathbf{A}_{x,n} \mathbf{U}_{x,n}^H$;

其中, $\mathbf{U}_{x,s} \in \mathbb{C}^{M_x \times L}$ 、 $\mathbf{U}_{x,n} \in \mathbb{C}^{M_x \times (M_x - L)}$ 分别表示矩阵 $\mathbf{R}_{\mathbb{S}_x}$ 的信号子空间和噪声子空间;

$\mathbf{A}_{x,s} \in \mathbb{C}^{L \times L}$ 、 $\mathbf{A}_{x,n} \in \mathbb{C}^{(M_x - L) \times (M_x - L)}$ 则是由对应 $\mathbf{U}_{x,s}$ 、 $\mathbf{U}_{x,n}$ 的特征值组成的对角矩阵;由于子阵 \mathbb{S}_x

的阵列流形矩阵 $\mathbf{A}_{\mathbb{S}_x}$ 同样能够张成子空间,因此入射信号的自相关矩阵 \mathbf{R}_s 可以估计为:

$\hat{\mathbf{R}}_s = \hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_x}^\dagger \mathbf{U}_{x,s} \mathbf{A}_{x,s} \mathbf{U}_{x,s}^H \left(\hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_x}^H \right)^\dagger$;将 $\hat{\mathbf{R}}_s = \hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_x}^\dagger \mathbf{U}_{x,s} \mathbf{A}_{x,s} \mathbf{U}_{x,s}^H \left(\hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_x}^H \right)^\dagger$ 带入 $\hat{\mathbf{T}} = \left(\hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,x}} \right)^\dagger \mathbf{R}_{xy} \left(\mathbf{R}_s \hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,y}}^H \right)^\dagger$ 可得:

$$\hat{\mathbf{T}} = \left(\hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,x}} \right)^\dagger \mathbf{R}_{xy} \left(\hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,x}}^\dagger \mathbf{U}_{x,s} \mathbf{A}_{x,s} \mathbf{U}_{x,s}^H \left(\hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,x}}^H \right)^\dagger \hat{\mathbf{A}}_{\mathbb{S}_{T,y}}^H \right)^\dagger;$$

对于估计得到的矩阵 $\hat{\mathbf{T}}$ 无法保证每行每列只存个1个元素且为1,因此对于估计得到的矩阵 $\hat{\mathbf{T}}$ 需要进一步处理,处理方式如下:

将每行每列的最大元素置1,其余元素置0以满足 $[\hat{\varphi}'_1, \hat{\varphi}'_2, \dots, \hat{\varphi}'_L] = [\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2, \dots, \hat{\varphi}_L] \mathbf{T}$ 中变换

的需求,并且最终得到: $[\hat{\phi}'_1, \hat{\phi}'_2, \dots, \hat{\phi}'_L] = [\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_L] \hat{T}$; 最终得到的角度估计值为 $\{(\hat{\theta}_l, \hat{\phi}'_l)\}_{l=1}^L$ 。

2. 根据权利要求1所述的基于矩阵匹配的二维稀疏线阵波达方向估计方法,其特征在于: 两子阵在k时刻的接收数据分别为: $\mathbf{x}_{S_x}(k) = \sum_{l=1}^L \mathbf{a}_{S_x}(\phi_l) s_l(k) + \mathbf{n}_{S_x}(k) = \mathbf{A}_{S_x} \mathbf{s}(k) + \mathbf{n}_{S_x}(k)$

$$\text{和 } \mathbf{y}_{S_y}(k) = \sum_{l=1}^L \mathbf{a}_{S_y}(\theta_l) s_l(k) + \mathbf{n}_{S_y}(k) = \mathbf{A}_{S_y} \mathbf{s}(k) + \mathbf{n}_{S_y}(k)。$$

3. 根据权利要求2所述的基于矩阵匹配的二维稀疏线阵波达方向估计方法,其特征在于: 两个子阵的接收数据协方差矩阵分别为: $\mathbf{R}_{S_x} = E[\mathbf{x}_{S_x}(k) \mathbf{x}_{S_x}^H(k)] = \mathbf{A}_{S_x} \mathbf{R}_s \mathbf{A}_{S_x}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{S_x}$ 和

$$\mathbf{R}_{S_y} = E[\mathbf{y}_{S_y}(k) \mathbf{y}_{S_y}^H(k)] = \mathbf{A}_{S_y} \mathbf{R}_s \mathbf{A}_{S_y}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{S_y};$$

其中, $\mathbf{R}_s \triangleq E[\mathbf{s}(k) \mathbf{s}^H(k)] \in \mathbb{C}^{L \times L}$ 表示入射信号的自相关矩阵; \mathbf{I}_{S_x} 和 \mathbf{I}_{S_y} 分别为对应维度的单位矩阵。

4. 根据权利要求3所述的基于矩阵匹配的二维稀疏线阵波达方向估计方法,其特征在于: 两个子阵在x轴和y轴上形成虚拟阵列中连续ULA部分的虚拟接收数据分别为:

$$\langle \mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{S_{x,ULA}} \rangle_u = \frac{1}{|\mathbb{U}_x(u)|} \sum_{(m_1, m_2) \in \mathbb{U}_x(u)} \langle \mathbf{R}_{S_x} \rangle_{m_1 m_2} \quad \text{和} \quad \langle \mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{S_{y,ULA}} \rangle_u = \frac{1}{|\mathbb{U}_y(u)|} \sum_{(m_1, m_2) \in \mathbb{U}_y(u)} \langle \mathbf{R}_{S_y} \rangle_{m_1 m_2};$$

其中, $\langle \mathbf{R}_S \rangle_{m_1 m_2}$ 为位于位置 m_1 和 m_2 处实阵元接收数据之间的互相关值, 定义为:

$$\langle \mathbf{R}_S \rangle_{m_1 m_2} \triangleq E[\langle \mathbf{x}_S \rangle_{m_1} \langle \mathbf{x}_S \rangle_{m_2}^*]。$$

5. 根据权利要求4所述的基于矩阵匹配的二维稀疏线阵波达方向估计方法,其特征在于: 利用虚拟接收数据构造的Toeplitz矩阵分别为:

$$\mathbf{R}_{U_x} = \begin{bmatrix} [\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{S_{x,ULA}}]_{U_x} & [\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{S_{x,ULA}}]_{U_x-1} & \cdots & [\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{S_{x,ULA}}]_1 \\ [\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{S_{x,ULA}}]_{U_x+1} & [\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{S_{x,ULA}}]_{U_x} & \cdots & [\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{S_{x,ULA}}]_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{S_{x,ULA}}]_{2U_x-1} & [\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{S_{x,ULA}}]_{2U_x-2} & \cdots & [\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{S_{x,ULA}}]_{U_x} \end{bmatrix} \quad \text{和} \quad \mathbf{R}_{U_y} = \begin{bmatrix} [\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{S_{y,ULA}}]_{U_y} & [\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{S_{y,ULA}}]_{U_y-1} & \cdots & [\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{S_{y,ULA}}]_1 \\ [\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{S_{y,ULA}}]_{U_y+1} & [\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{S_{y,ULA}}]_{U_y} & \cdots & [\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{S_{y,ULA}}]_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{S_{y,ULA}}]_{2U_y-1} & [\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{S_{y,ULA}}]_{2U_y-2} & \cdots & [\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{S_{y,ULA}}]_{U_y} \end{bmatrix};$$

其中, $U_x \triangleq (|\mathbb{S}_{x,diff}^{S_{x,ULA}}| + 1)/2$; $U_y \triangleq (|\mathbb{S}_{y,diff}^{S_{y,ULA}}| + 1)/2$ 。

6. 根据权利要求5所述的基于矩阵匹配的二维稀疏线阵波达方向估计方法,其特征在于:

构造的空间谱函数如下:

$$P_x(\varphi) = \frac{1}{\bar{\mathbf{a}}_{U_x}^H(\varphi) \mathbf{U}_{x,n} \mathbf{U}_{x,n}^H \bar{\mathbf{a}}_{U_x}(\varphi)}, \quad P_y(\theta) = \frac{1}{\bar{\mathbf{a}}_{U_y}^H(\theta) \mathbf{U}_{y,n} \mathbf{U}_{y,n}^H \bar{\mathbf{a}}_{U_y}(\theta)};$$

其中 $\bar{\mathbf{a}}_{U_x}(\varphi)$ 表示 $U_{x,n}$ 上 φ 方向的导向矢量, $\bar{\mathbf{a}}_{U_y}(\theta)$ 表示 $U_{y,n}$ 上 θ 方向的导向矢量。

基于矩阵匹配的二维稀疏线阵波达方向估计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种波达方向的估计方法,具体涉及一种基于矩阵匹配的二维稀疏线阵波达方向估计方法。

背景技术

[0002] 波达方向(DOA,Direction of Arrival)估计是雷达信号处理的重要组成部分,线阵结构只能实现对一维角度的估计,无法同时估计出信号的二维角度信息,因此对于需要同时估计出信号的俯仰和方位信息的情况,通常需要利用二维阵列结构。二维线阵由于其结构简单,因此,二维线阵中的二维DOA估计被广泛研究,为了进一步拓展二维DOA估计的自由度,适用于二维稀疏线阵的二维DOA估计被提出。相较于传统二维DOA估计算法应用到二维稀疏线阵中,现有技术中有提出二维匹配DOA(2Dimensional Paired DOA,2-D PDOA)估计算法利用L型稀疏阵列每维阵列的稀疏特性,提高了二维DOA估计的自由度,利用其中一维阵列估计出一维角度后,利用二维阵列接收数据的互相关矩阵和二维角度相互匹配的特征估计出了另外一维角度,实现了二维DOA的同时估计与匹配。

[0003] 但是,2-D PDOA估计算法估计两维角度是分开估计的,其中一维直接利用稀疏阵列进行角度估计,对另一维的角度估计是建立在该维角度估计的基础上得到的,使得另一维的角度估计误差偏大。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种基于矩阵匹配的二维稀疏线阵波达方向估计方法,解决目前的波达方向二维角度估计中两维角度估算过程相关,使另一维的角度估计误差偏大的问题。

[0005] 为解决上述的技术问题,本发明采用以下技术方案:

[0006] 一种基于矩阵匹配的二维稀疏线阵波达方向估计方法,包括如下步骤:

[0007] S1、建立二维稀疏线阵二维波达方向估计的基本模型,该阵列模型包括 $M_1 = 2d$ 和 $M_2 = 3d$ 的两个子阵,其中 d 为半波长,称 x 、 y 轴上的两个子阵为 S_x 和 S_y ;

[0008] S2、定义第 l 个信号的入射角度为 (θ_l, φ_l) ,其中 θ_l 、 φ_l 分别为信号入射方向与 xoz 、 $yozy$ 面的夹角,假设共有 L 个远场窄带信号入射到阵列中,得出阵列中两子阵在 k 时刻的接收数据;

[0009] S3、根据接收到的数据得出两个子阵的接收数据协方差矩阵;

[0010] S4、根据两个子阵的接收数据协方差矩阵在 x 轴和 y 轴上形成虚拟阵列中连续ULA部分的虚拟接收数据;

[0011] S5、利用虚拟接收数据构造Toeplitz矩阵,然后通过构造空间谱函数,分别得出二维角度的估计值 $\{\hat{\varphi}_l\}_{l=1}^L$ 和 $\{\hat{\theta}_l\}_{l=1}^L$;

[0012] S6、假设与估计值 $\{\hat{\theta}_l\}_{l=1}^L$ 中 $\hat{\theta}_l$ 相对应的另一维角度估计值是 $\{\hat{\varphi}'_l\}_{l=1}^L$,其中 $\{\hat{\varphi}'_l\}_{l=1}^L$ 是对

$\{\hat{\phi}'_l\}_{l=1}^L$ 的重新排序, 得 $[\hat{\phi}'_1, \hat{\phi}'_2, \dots, \hat{\phi}'_L] = [\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_L] \mathbf{T}$, 其中 $\mathbf{T} \in \{0, 1\}^{L \times L}$, 为列变换矩阵;

[0013] S7、依次进行最小二乘算法、矩阵特征分解得到 $[\hat{\phi}'_1, \hat{\phi}'_2, \dots, \hat{\phi}'_L] = [\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_L] \hat{\mathbf{T}}$, 然后得出角度估计值为 $\{(\hat{\theta}_l, \hat{\phi}'_l)\}_{l=1}^L$ 。

[0014] 进一步的技术方案是, 两子阵在k时刻的接收数据分别为:

$$[0015] \quad \mathbf{x}_{S_x}(k) = \sum_{l=1}^L \mathbf{a}_{S_x}(\phi_l) s_l(k) + \mathbf{n}_{S_x}(k) = \mathbf{A}_{S_x} \mathbf{s}(k) + \mathbf{n}_{S_x}(k) \text{ 和}$$

$$[0016] \quad \mathbf{y}_{S_y}(k) = \sum_{l=1}^L \mathbf{a}_{S_y}(\theta_l) s_l(k) + \mathbf{n}_{S_y}(k) = \mathbf{A}_{S_y} \mathbf{s}(k) + \mathbf{n}_{S_y}(k)。$$

[0017] 更进一步的技术方案是, 两个子阵的接收数据协方差矩阵分别为:

$$[0018] \quad \mathbf{R}_{S_x} = E[\mathbf{x}_{S_x}(k) \mathbf{x}_{S_x}^H(k)] = \mathbf{A}_{S_x} \mathbf{R}_s \mathbf{A}_{S_x}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{S_x} \text{ 和 } \mathbf{R}_{S_y} = E[\mathbf{y}_{S_y}(k) \mathbf{y}_{S_y}^H(k)] = \mathbf{A}_{S_y} \mathbf{R}_s \mathbf{A}_{S_y}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{S_y}。$$

[0019] 更进一步的技术方案是, 两个子阵在x轴和y轴上形成虚拟阵列中连续ULA部分的虚拟接收数据分别为:

$$[0020] \quad \left\langle \mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{ULA} \right\rangle_u = \frac{1}{|\mathbb{U}_x(\mathbf{u})|} \sum_{(m_1, m_2) \in \mathbb{U}_x(\mathbf{u})} \left\langle \mathbf{R}_{S_x} \right\rangle_{m_1 m_2} \text{ 和 } \left\langle \mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{ULA} \right\rangle_u = \frac{1}{|\mathbb{U}_y(\mathbf{u})|} \sum_{(m_1, m_2) \in \mathbb{U}_y(\mathbf{u})} \left\langle \mathbf{R}_{S_y} \right\rangle_{m_1 m_2}。$$

[0021] 更进一步的技术方案是, 利用虚拟接收数据构造的Toeplitz矩阵分别为:

$$[0022] \quad \mathbf{R}_{U_x} = \begin{bmatrix} \left[\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{ULA} \right]_{U_x} & \left[\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{ULA} \right]_{U_x-1} & \cdots & \left[\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{ULA} \right]_1 \\ \left[\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{ULA} \right]_{U_x+1} & \left[\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{ULA} \right]_{U_x} & \cdots & \left[\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{ULA} \right]_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left[\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{ULA} \right]_{2U_x-1} & \left[\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{ULA} \right]_{2U_x-2} & \cdots & \left[\mathbf{x}_{S_{x,diff}}^{ULA} \right]_{U_x} \end{bmatrix} \text{ 和 } \mathbf{R}_{U_y} = \begin{bmatrix} \left[\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{ULA} \right]_{U_y} & \left[\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{ULA} \right]_{U_y-1} & \cdots & \left[\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{ULA} \right]_1 \\ \left[\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{ULA} \right]_{U_y+1} & \left[\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{ULA} \right]_{U_y} & \cdots & \left[\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{ULA} \right]_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left[\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{ULA} \right]_{2U_y-1} & \left[\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{ULA} \right]_{2U_y-2} & \cdots & \left[\mathbf{y}_{S_{y,diff}}^{ULA} \right]_{U_y} \end{bmatrix}。$$

[0023] 更进一步的技术方案是, 构造的空间谱函数如下:

$$[0024] \quad P_x(\varphi) = \frac{1}{\bar{\mathbf{a}}_{U_x}^H(\varphi) \mathbf{U}_{x,n} \mathbf{U}_{x,n}^H \bar{\mathbf{a}}_{U_x}(\varphi)}, \quad P_y(\theta) = \frac{1}{\bar{\mathbf{a}}_{U_y}^H(\theta) \mathbf{U}_{y,n} \mathbf{U}_{y,n}^H \bar{\mathbf{a}}_{U_y}(\theta)};$$

[0025] 其中 $\bar{\mathbf{a}}_{U_x}(\varphi)$ 表示 $U_{x,n}$ 上 φ 方向的导向矢量, $\bar{\mathbf{a}}_{U_y}(\theta)$ 表示 $U_{y,n}$ 上 θ 方向的导向矢量。

[0026] 与现有技术相比, 本发明的有益效果是: 与现有的2-D PDOA估计算法相比, 本估计方法对两维角度进行分别估计, 避免了一维角度估计误差对另一维角度估计的影响, 实现了二维波达方向估计值匹配, 同时提高了角度估计的精度。

附图说明

[0027] 图1为本发明中二维稀疏线阵二维波达方向估计中阵列接收信号的基本模型。

[0028] 图2为本发明中DOA估计值的RMSE与SNR的关系图, 其中 $K=200$ 。

[0029] 图3为本发明中基于矩阵变换的二维稀疏线阵DOA估计算法性能分析图。

具体实施方式

[0030] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白, 以下结合附图及实施例, 对

本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0031] 实施例1:

[0032] 本实施例中的基于矩阵匹配的二维稀疏线阵波达方向估计方法具体包括如下步骤:

[0033] S1、建立二维稀疏线阵二维波达方向估计的基本模型,该阵列模型包括 $M_1 = 2d$ 和 $M_2 = 3d$ 的两个子阵,其中 d 为半波长;

[0034] S2、定义第1个信号的入射角度为 (θ_l, φ_l) ,其中 θ_l 、 φ_l 分别为信号入射方向与 xoz 、 yoZ 面的夹角,假设共有 L 个远场窄带信号入射到阵列中,得出阵列中两子阵在 k 时刻的接收数据;

[0035] S3、根据接收到的数据得出两个子阵的接收数据协方差矩阵;

[0036] S4、根据两个子阵的接收数据协方差矩阵在 x 轴和 y 轴上形成虚拟阵列中连续ULA部分的虚拟接收数据;

[0037] S5、利用虚拟接收数据构造Toeplitz矩阵,然后通过构造空间谱函数,分别得出二维角度的估计值 $\{\hat{\varphi}_l\}_{l=1}^L$ 和 $\{\hat{\theta}_l\}_{l=1}^L$;

[0038] S6、假设与估计值 $\{\hat{\theta}_l\}_{l=1}^L$ 中 $\hat{\theta}_l$ 相对应的另一维角度估计值是 $\{\hat{\varphi}'_l\}_{l=1}^L$,其中 $\{\hat{\varphi}'_l\}_{l=1}^L$ 是对 $\{\hat{\varphi}_l\}_{l=1}^L$ 的重新排序,得 $[\hat{\varphi}'_1, \hat{\varphi}'_2, \dots, \hat{\varphi}'_L] = [\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2, \dots, \hat{\varphi}_L] \mathbf{T}$,其中 $\mathbf{T} \in \{0, 1\}^{L \times L}$,为列变换矩阵;

[0039] S7、依次进行最小二乘算法、矩阵特征分解得到 $[\hat{\varphi}'_1, \hat{\varphi}'_2, \dots, \hat{\varphi}'_L] = [\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2, \dots, \hat{\varphi}_L] \hat{\mathbf{T}}$,然后得出角度估计值为 $\{(\hat{\theta}_l, \hat{\varphi}'_l)\}_{l=1}^L$ 。

[0040] 其中,两子阵在 k 时刻的接收数据分别为:

$$[0041] \quad \mathbf{x}_{S_x}(k) = \sum_{l=1}^L \mathbf{a}_{S_x}(\varphi_l) s_l(k) + \mathbf{n}_{S_x}(k) = \mathbf{A}_{S_x} \mathbf{s}(k) + \mathbf{n}_{S_x}(k) \text{ 和}$$

$$[0042] \quad \mathbf{y}_{S_y}(k) = \sum_{l=1}^L \mathbf{a}_{S_y}(\theta_l) s_l(k) + \mathbf{n}_{S_y}(k) = \mathbf{A}_{S_y} \mathbf{s}(k) + \mathbf{n}_{S_y}(k)。$$

[0043] 其中,两个子阵的接收数据协方差矩阵分别为:

$$[0044] \quad \mathbf{R}_{S_x} = E[\mathbf{x}_{S_x}(k) \mathbf{x}_{S_x}^H(k)] = \mathbf{A}_{S_x} \mathbf{R}_s \mathbf{A}_{S_x}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{S_x} \text{ 和 } \mathbf{R}_{S_y} = E[\mathbf{y}_{S_y}(k) \mathbf{y}_{S_y}^H(k)] = \mathbf{A}_{S_y} \mathbf{R}_s \mathbf{A}_{S_y}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{S_y}。$$

[0045] 其中,两个子阵在 x 轴和 y 轴上形成虚拟阵列中连续ULA部分的虚拟接收数据分别为:

$$[0046] \quad \left\langle \mathbf{x}_{S_x, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right\rangle_u = \frac{1}{|\mathbb{U}_x(u)|} \sum_{(m_1, m_2) \in \mathbb{U}_x(u)} \left\langle \mathbf{R}_{S_x} \right\rangle_{m_1 m_2} \text{ 和 } \left\langle \mathbf{y}_{S_y, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right\rangle_u = \frac{1}{|\mathbb{U}_y(u)|} \sum_{(m_1, m_2) \in \mathbb{U}_y(u)} \left\langle \mathbf{R}_{S_y} \right\rangle_{m_1 m_2}。$$

[0047] 其中,利用虚拟接收数据构造的Toeplitz矩阵分别为:

$$[0048] \quad \mathbf{R}_{U_x} = \begin{bmatrix} \left[\mathbf{x}_{S_x, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_{U_x} & \left[\mathbf{x}_{S_x, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_{U_x-1} & \cdots & \left[\mathbf{x}_{S_x, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_1 \\ \left[\mathbf{x}_{S_x, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_{U_x+1} & \left[\mathbf{x}_{S_x, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_{U_x} & \cdots & \left[\mathbf{x}_{S_x, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left[\mathbf{x}_{S_x, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_{2U_x-1} & \left[\mathbf{x}_{S_x, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_{2U_x-2} & \cdots & \left[\mathbf{x}_{S_x, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_{U_x} \end{bmatrix} \text{ 和 } \mathbf{R}_{U_y} = \begin{bmatrix} \left[\mathbf{y}_{S_y, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_{U_y} & \left[\mathbf{y}_{S_y, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_{U_y-1} & \cdots & \left[\mathbf{y}_{S_y, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_1 \\ \left[\mathbf{y}_{S_y, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_{U_y+1} & \left[\mathbf{y}_{S_y, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_{U_y} & \cdots & \left[\mathbf{y}_{S_y, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left[\mathbf{y}_{S_y, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_{2U_y-1} & \left[\mathbf{y}_{S_y, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_{2U_y-2} & \cdots & \left[\mathbf{y}_{S_y, \text{diff}}^{\text{ULA}} \right]_{U_y} \end{bmatrix}。$$

[0049] 其中,构造的空间谱函数如下:

$$[0050] \quad P_x(\varphi) = \frac{1}{\bar{\mathbf{a}}_{U_x}^H(\varphi) \mathbf{U}_{x,n} \mathbf{U}_{x,n}^H \bar{\mathbf{a}}_{U_x}(\varphi)} \text{ 和 } P_y(\theta) = \frac{1}{\bar{\mathbf{a}}_{U_y}^H(\theta) \mathbf{U}_{y,n} \mathbf{U}_{y,n}^H \bar{\mathbf{a}}_{U_y}(\theta)};$$

[0051] 其中 $\bar{\mathbf{a}}_{U_x}(\varphi)$ 表示 $U_{x,n}$ 上 φ 方向的导向矢量, $\bar{\mathbf{a}}_{U_y}(\theta)$ 表示 $U_{y,n}$ 上 θ 方向的导向矢量。

[0052] 实施例2:

[0053] 如图1所示,以L型Coprime阵为例建立二维稀疏线阵二维DOA估计的基本模型,是一个由两个阵列结构相同的Coprime阵构成的L型Coprime阵,两个阵列模型包括 $M_1 = 2d$ 和 $M_2 = 3d$ 的阵列,其中 d 为半波长,然后定义第1个信号的入射角度为 (θ_1, φ_1) ,其中 θ_1 、 φ_1 分别为信号入射方向与 xoz 、 yoZ 面的夹角,为了标识方便,分别称 x 、 y 轴上的两个Coprime阵为 \mathbb{S}_x 和 \mathbb{S}_y ,其中, $\mathbb{S}_x \triangleq \{u_m\}_{m=1}^{M_x}$ 为 x 轴上Coprime阵阵元位置分布的集合, M_x 为 x 轴上Coprime阵的阵元总数; $\mathbb{S}_y \triangleq \{v_m\}_{m=1}^{M_y}$ 为 y 轴上Coprime阵阵元位置分布的集合, M_y 为 y 轴上Coprime阵的阵元总数。假设共有 L 个远场窄带信号入射到阵列中,得出阵列中两子阵在 k 时刻的接收数据分别为:

$$[0054] \quad \mathbf{x}_{\mathbb{S}_x}(k) = \sum_{l=1}^L \mathbf{a}_{\mathbb{S}_x}(\varphi_l) s_l(k) + \mathbf{n}_{\mathbb{S}_x}(k) = \mathbf{A}_{\mathbb{S}_x} \mathbf{s}(k) + \mathbf{n}_{\mathbb{S}_x}(k) \text{ 以及}$$

$$[0055] \quad \mathbf{y}_{\mathbb{S}_y}(k) = \sum_{l=1}^L \mathbf{a}_{\mathbb{S}_y}(\theta_l) s_l(k) + \mathbf{n}_{\mathbb{S}_y}(k) = \mathbf{A}_{\mathbb{S}_y} \mathbf{s}(k) + \mathbf{n}_{\mathbb{S}_y}(k)。$$

[0056] 其中, $\mathbf{a}_{\mathbb{S}_x}(\varphi_l) = \left[1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} u_2 \sin \varphi_l}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} u_{M_x} \sin \varphi_l} \right]^T \in \mathbb{C}^{M_x \times 1}$ 表示 \mathbb{S}_x 上 φ_l 方向的导向矢量;

[0057] $\mathbf{A}_{\mathbb{S}_x} \triangleq \left[\mathbf{a}_{\mathbb{S}_x}(\varphi_1), \mathbf{a}_{\mathbb{S}_x}(\varphi_2), \dots, \mathbf{a}_{\mathbb{S}_x}(\varphi_L) \right] \in \mathbb{C}^{M_x \times L}$ 表示 \mathbb{S}_x 的阵列流形矩阵;

[0058] $\mathbf{a}_{\mathbb{S}_y}(\theta_l) = \left[1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} v_2 \sin \theta_l}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} v_{M_y} \sin \theta_l} \right]^T \in \mathbb{C}^{M_y \times 1}$ 表示 \mathbb{S}_y 上 θ_l 方向的导向矢量;

[0059] $\mathbf{A}_{\mathbb{S}_y} \triangleq \left[\mathbf{a}_{\mathbb{S}_y}(\theta_1), \mathbf{a}_{\mathbb{S}_y}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}_{\mathbb{S}_y}(\theta_L) \right] \in \mathbb{C}^{M_y \times L}$ 表示 \mathbb{S}_y 的阵列流形矩阵;

[0060] $\mathbf{s}(k) \triangleq \left[s_1(k), s_2(k), \dots, s_L(k) \right]^T \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 表示入射信号波形;

[0061] $\mathbf{n}_{\mathbb{S}_x}(k) \in \mathbb{C}^{M_x \times 1}$ 和 $\mathbf{n}_{\mathbb{S}_y}(k) \in \mathbb{C}^{M_y \times 1}$ 分别表示 \mathbb{S}_x 和 \mathbb{S}_y 上接收到的噪声信号。

[0062] 两个Coprime阵的接收数据协方差矩阵分别为:

$$[0063] \quad \mathbf{R}_{\mathbb{S}_x} = E \left[\mathbf{x}_{\mathbb{S}_x}(k) \mathbf{x}_{\mathbb{S}_x}^H(k) \right] = \mathbf{A}_{\mathbb{S}_x} \mathbf{R}_s \mathbf{A}_{\mathbb{S}_x}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{\mathbb{S}_x} \text{ 以及}$$

$$[0064] \quad \mathbf{R}_{\mathbb{S}_y} = E \left[\mathbf{y}_{\mathbb{S}_y}(k) \mathbf{y}_{\mathbb{S}_y}^H(k) \right] = \mathbf{A}_{\mathbb{S}_y} \mathbf{R}_s \mathbf{A}_{\mathbb{S}_y}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{\mathbb{S}_y}。$$

[0065] 其中, $\mathbf{R}_s \triangleq E[\mathbf{s}(k)\mathbf{s}^H(k)] \in \mathbb{C}^{L \times L}$ 表示入射信号的自相关矩阵; \mathbf{I}_{S_x} 和 \mathbf{I}_{S_y} 分别为对应维度的单位矩阵。

[0066] 定义 \mathbb{S}_x 和 \mathbb{S}_y 形成虚拟阵列中的连续ULA部分分别为 $\mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}$ 和 $\mathbb{S}_{y,diff}^{ULA}$, 可知 $\mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}$ 和 $\mathbb{S}_{y,diff}^{ULA}$ 上的虚拟接收数据可分别表示为:

$$[0067] \quad \left\langle \mathbf{x}_{\mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}} \right\rangle_u = \frac{1}{|\mathbb{U}_x(u)|} \sum_{(m_1, m_2) \in \mathbb{U}_x(u)} \langle \mathbf{R}_{S_x} \rangle_{m_1 m_2} \quad \text{和} \quad \left\langle \mathbf{y}_{\mathbb{S}_{y,diff}^{ULA}} \right\rangle_u = \frac{1}{|\mathbb{U}_y(u)|} \sum_{(m_1, m_2) \in \mathbb{U}_y(u)} \langle \mathbf{R}_{S_y} \rangle_{m_1 m_2};$$

[0068] 其中, $\left\langle \mathbf{x}_{\mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}} \right\rangle_u$ 表示 $\mathbf{x}_{\mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}}$ 中位于阵元 u 处的元素。(例如: 当阵元位置分布 $\mathbb{S} = \{1, 3, 5\}$, 接收数据为 $\mathbf{z}_S = [0.2, 0.5, 0.4]^T$ 时, 有 $\langle \mathbf{z}_S \rangle_1 = 0.2$ 、 $\langle \mathbf{z}_S \rangle_3 = 0.5$ 、 $\langle \mathbf{z}_S \rangle_5 = 0.4$ 。)

[0069] 其中, $\mathbb{U}_x(u)$ 和 $\mathbb{U}_y(u)$ 分别定义为:

$$[0070] \quad \mathbb{U}_x(u) = \{(m_1, m_2) \in \mathbb{S}_x^2 \mid m_1 - m_2 = u \in \mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}\} \text{ 以及}$$

$$[0071] \quad \mathbb{U}_y(u) = \{(m_1, m_2) \in \mathbb{S}_y^2 \mid m_1 - m_2 = u \in \mathbb{S}_{y,diff}^{ULA}\}。$$

[0072] 其中, $\langle \mathbf{R}_S \rangle_{m_1 m_2}$ 为位于位置 m_1 和 m_2 处实阵元接收数据之间的互相关值, 定义为:

$$[0073] \quad \langle \mathbf{R}_S \rangle_{m_1 m_2} \triangleq E[\langle \mathbf{x}_S \rangle_{m_1} \langle \mathbf{x}_S \rangle_{m_2}^*]。$$

[0074] 利用虚拟接收数据构造Toeplitz矩阵得到:

$$[0075] \quad \mathbf{R}_{U_x} = \begin{bmatrix} \left[\mathbf{x}_{\mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}} \right]_{U_x} & \left[\mathbf{x}_{\mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}} \right]_{U_x-1} & \cdots & \left[\mathbf{x}_{\mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}} \right]_1 \\ \left[\mathbf{x}_{\mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}} \right]_{U_x+1} & \left[\mathbf{x}_{\mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}} \right]_{U_x} & \cdots & \left[\mathbf{x}_{\mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}} \right]_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left[\mathbf{x}_{\mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}} \right]_{2U_x-1} & \left[\mathbf{x}_{\mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}} \right]_{2U_x-2} & \cdots & \left[\mathbf{x}_{\mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}} \right]_{U_x} \end{bmatrix} \text{ 以及}$$

$$[0076] \quad \mathbf{R}_{U_y} = \begin{bmatrix} \left[\mathbf{y}_{\mathbb{S}_{y,diff}^{ULA}} \right]_{U_y} & \left[\mathbf{y}_{\mathbb{S}_{y,diff}^{ULA}} \right]_{U_y-1} & \cdots & \left[\mathbf{y}_{\mathbb{S}_{y,diff}^{ULA}} \right]_1 \\ \left[\mathbf{y}_{\mathbb{S}_{y,diff}^{ULA}} \right]_{U_y+1} & \left[\mathbf{y}_{\mathbb{S}_{y,diff}^{ULA}} \right]_{U_y} & \cdots & \left[\mathbf{y}_{\mathbb{S}_{y,diff}^{ULA}} \right]_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left[\mathbf{y}_{\mathbb{S}_{y,diff}^{ULA}} \right]_{2U_y-1} & \left[\mathbf{y}_{\mathbb{S}_{y,diff}^{ULA}} \right]_{2U_y-2} & \cdots & \left[\mathbf{y}_{\mathbb{S}_{y,diff}^{ULA}} \right]_{U_y} \end{bmatrix}。$$

[0077] 其中, $U_x \triangleq (|\mathbb{S}_{x,diff}^{ULA}| + 1)/2$; $U_y \triangleq (|\mathbb{S}_{y,diff}^{ULA}| + 1)/2$ 。

[0078] 通过构造如下空间谱函数, 可分别估计出 $\{\hat{\phi}_l\}_{l=1}^L$ 和 $\{\hat{\theta}_l\}_{l=1}^L$:

$$[0079] \quad P_x(\varphi) = \frac{1}{\bar{\mathbf{a}}_{U_x}^H(\varphi) \mathbf{U}_{x,n} \mathbf{U}_{x,n}^H \bar{\mathbf{a}}_{U_x}(\varphi)} \quad \text{和} \quad P_y(\theta) = \frac{1}{\bar{\mathbf{a}}_{U_y}^H(\theta) \mathbf{U}_{y,n} \mathbf{U}_{y,n}^H \bar{\mathbf{a}}_{U_y}(\theta)};$$

[0080] 其中 $\bar{a}_{U_x}(\varphi)$ 表示 $U_{x,n}$ 上 φ 方向的导向矢量, $\bar{a}_{U_y}(\theta)$ 表示 $U_{y,n}$ 上 θ 方向的导向矢量。

[0081] 对前两式进行谱峰搜索可分别得到二维角度的估计值 $\{\hat{\phi}_l\}_{l=1}^L$ 和 $\{\hat{\theta}_l\}_{l=1}^L$, 但由于并不知道 $\{\hat{\phi}_l\}_{l=1}^L$ 和 $\{\hat{\theta}_l\}_{l=1}^L$ 的对应关系, 因此还需要对两个角度进行匹配。

[0082] 匹配方式如下:

[0083] 假设已估计出的角度分别为 $\{\hat{\theta}_l\}_{l=1}^L$ 和 $\{\hat{\phi}_l\}_{l=1}^L$, 且与 $\{\hat{\theta}_l\}_{l=1}^L$ 中 $\hat{\theta}_l$ 一一对应的另一维角度的排列顺序是 $\{\hat{\phi}'_l\}_{l=1}^L$, 显然可以认为 $\{\hat{\phi}'_l\}_{l=1}^L$ 是对 $\{\hat{\phi}_l\}_{l=1}^L$ 进行了重新排序, 也即可以写做:

$$[\hat{\phi}'_1, \hat{\phi}'_2, \dots, \hat{\phi}'_L] = [\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_L] \mathbf{T};$$

[0085] 其中, $\mathbf{T} \in \{0, 1\}^{L \times L}$ 为列变换矩阵, 即每行每列只有一个元素为1, 其余均为0。

[0086] 假设由 $\{\hat{\phi}'_l\}_{l=1}^L$ 计算得到的阵列流形矩阵为 $\hat{\mathbf{A}}'_{S_{T,x}}$, 由前式可知: $\hat{\mathbf{A}}'_{S_{T,x}} = \hat{\mathbf{A}}_{S_{T,x}} \mathbf{T}$;

[0087] 因此, 可以认为矩阵 $\hat{\mathbf{A}}'_{S_{T,x}}$ 和矩阵 $\hat{\mathbf{A}}_{S_{T,y}}$ 的每一列是相匹配的, 即有: $\mathbf{R}_{xy} \approx \hat{\mathbf{A}}'^H_{S_{T,x}} \mathbf{R}_s \hat{\mathbf{A}}_{S_{T,y}}$;

[0088] 将 $\hat{\mathbf{A}}'_{S_{T,x}} = \hat{\mathbf{A}}_{S_{T,x}} \mathbf{T}$ 代入到 $\mathbf{R}_{xy} \approx \hat{\mathbf{A}}'^H_{S_{T,x}} \mathbf{R}_s \hat{\mathbf{A}}_{S_{T,y}}$ 中, 可得 $\mathbf{R}_{xy} \approx \hat{\mathbf{A}}_{S_{T,x}} \mathbf{T} \mathbf{R}_s \hat{\mathbf{A}}_{S_{T,y}}^H$;

[0089] 此时角度的匹配问题转化为了变换矩阵的求解问题, 对于矩阵 \mathbf{T} 可通过如下最小化优化模型求解: $\hat{\mathbf{T}} = \arg \min_{\mathbf{T}} \left\| \mathbf{R}_{xy} - \hat{\mathbf{A}}_{S_{T,x}} \mathbf{T} \mathbf{R}_s \hat{\mathbf{A}}_{S_{T,y}}^H \right\|_F^2$;

[0090] 特别的是, 当满足 $L \leq M_{T,x}$ 时, 前式为最小二乘问题, 矩阵 $\hat{\mathbf{T}}$ 具有显式表达式:

$$\hat{\mathbf{T}} = \left(\hat{\mathbf{A}}_{S_{T,x}} \right)^\dagger \mathbf{R}_{xy} \left(\mathbf{R}_s \hat{\mathbf{A}}_{S_{T,y}}^H \right)^\dagger;$$

[0092] 对矩阵 \mathbf{R}_{S_x} 进行特征分解可得: $\mathbf{R}_{S_x} = \mathbf{U}_{x,s} \mathbf{A}_{x,s} \mathbf{U}_{x,s}^H + \mathbf{U}_{x,n} \mathbf{A}_{x,n} \mathbf{U}_{x,n}^H$;

[0093] 其中, $\mathbf{U}_{x,s} \in \mathbb{C}^{M_x \times L}$ 、 $\mathbf{U}_{x,n} \in \mathbb{C}^{M_x \times (M_x - L)}$ 分别表示矩阵 \mathbf{R}_{S_x} 的信号子空间和噪声子空间; $\mathbf{A}_{x,s} \in \mathbb{C}^{L \times L}$ 、 $\mathbf{A}_{x,n} \in \mathbb{C}^{(M_x - L) \times (M_x - L)}$ 则是由对应 $U_{x,s}$ 、 $U_{x,n}$ 的特征值组成的对角矩阵。

[0094] 由于 \mathbf{A}_{S_x} 同样能够张成子空间, 因此矩阵 \mathbf{R}_s 可以估计为: $\hat{\mathbf{R}}_s = \hat{\mathbf{A}}_{S_x}^\dagger \mathbf{U}_{x,s} \mathbf{A}_{x,s} \mathbf{U}_{x,s}^H \left(\hat{\mathbf{A}}_{S_x}^H \right)^\dagger$;

[0095] 将 $\hat{\mathbf{R}}_s = \hat{\mathbf{A}}_{S_x}^\dagger \mathbf{U}_{x,s} \mathbf{A}_{x,s} \mathbf{U}_{x,s}^H \left(\hat{\mathbf{A}}_{S_x}^H \right)^\dagger$ 代入 $\hat{\mathbf{T}} = \left(\hat{\mathbf{A}}_{S_{T,x}} \right)^\dagger \mathbf{R}_{xy} \left(\mathbf{R}_s \hat{\mathbf{A}}_{S_{T,y}}^H \right)^\dagger$ 可得:

$$\hat{\mathbf{T}} = \left(\hat{\mathbf{A}}_{S_{T,x}} \right)^\dagger \mathbf{R}_{xy} \left(\hat{\mathbf{A}}_{S_{T,x}}^\dagger \mathbf{U}_{x,s} \mathbf{A}_{x,s} \mathbf{U}_{x,s}^H \left(\hat{\mathbf{A}}_{S_{T,x}}^H \right)^\dagger \hat{\mathbf{A}}_{S_{T,y}}^H \right)^\dagger;$$

[0097] 对于估计得到的矩阵 $\hat{\mathbf{T}}$ 无法保证每行每列只存个1个元素且为1, 因此对于估计得到的矩阵 $\hat{\mathbf{T}}$ 需要进一步处理, 处理方式如下:

[0098] 将每行每列的最大元素置1, 其余元素置0以满足 $[\hat{\phi}'_1, \hat{\phi}'_2, \dots, \hat{\phi}'_L] = [\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_L] \mathbf{T}$ 中变换的需求, 并且最终得到: $[\hat{\phi}'_1, \hat{\phi}'_2, \dots, \hat{\phi}'_L] = [\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_L] \hat{\mathbf{T}}$;

[0099] 最终得到的角度估计值为 $\{(\hat{\theta}_l, \hat{\phi}'_l)\}_{l=1}^L$ 。

[0100] 如图2和图3所示, 与现有估计算法相比, 其中一维的估计算法结果完全重合, 与现有算法是一致的, 而另一位的偏差小于现有算法, 即本算法和2-D PDOA估计算法相比, 对两

维角度进行了分别估计,避免了一维角度估计误差对另一维角度估计的影响,实现了二维DOA估计值匹配的同时提高了角度估计的精度。

[0101] 利用来波方向两维角度匹配的特征构造优化问题计算变换矩阵实现了先估计后匹配的过程,避免了一维角度估计的误差增大另一维角度的估计误差。

[0102] 尽管这里参照本发明的多个解释性实施例对本发明进行了描述,但是,应该理解,本领域技术人员可以设计出很多其他的修改和实施方式,这些修改和实施方式将落在本申请公开的原则范围和精神之内。更具体地说,在本申请公开、附图和权利要求的范围内,可以对主题组合布局的组成部件和/或布局进行多种变型和改进。除了对组成部件和/或布局进行的变形和改进外,对于本领域技术人员来说,其他的用途也将是明显的。

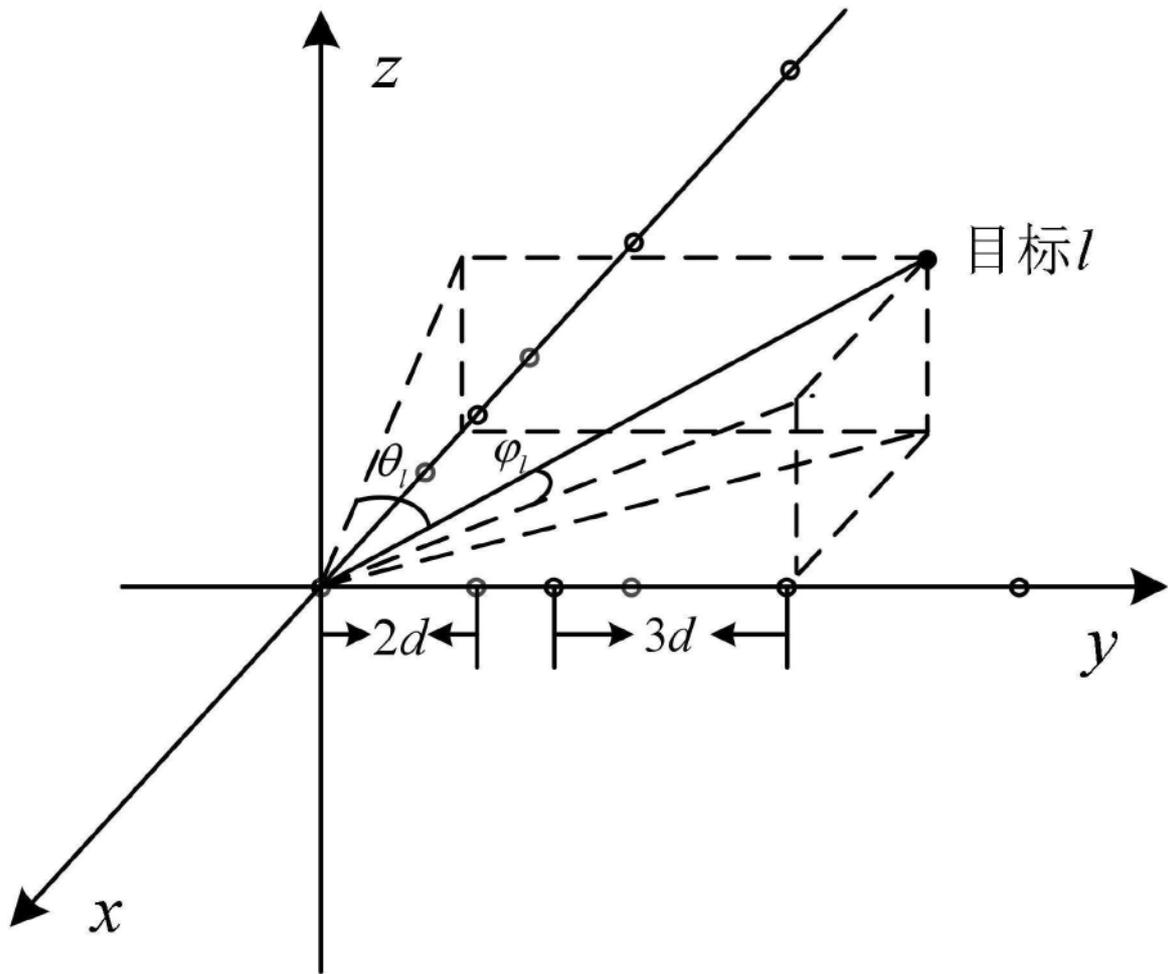


图1

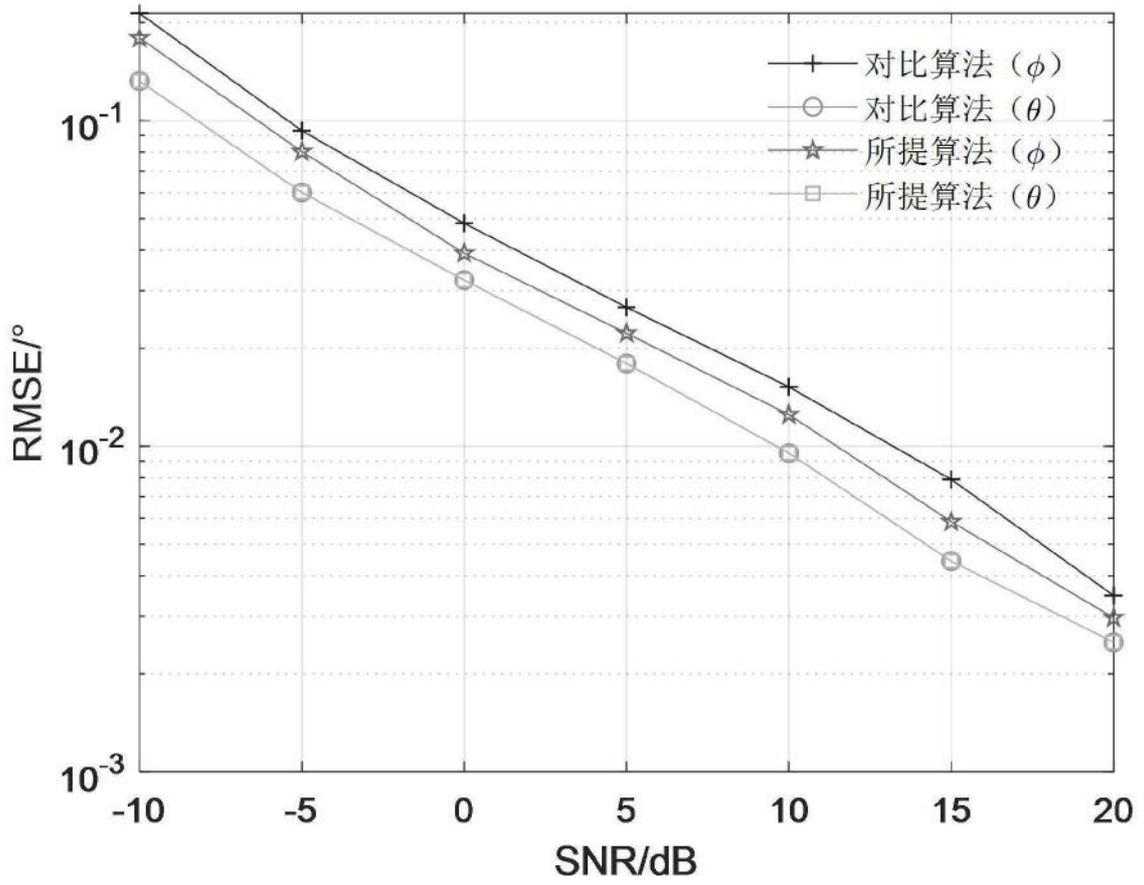


图2

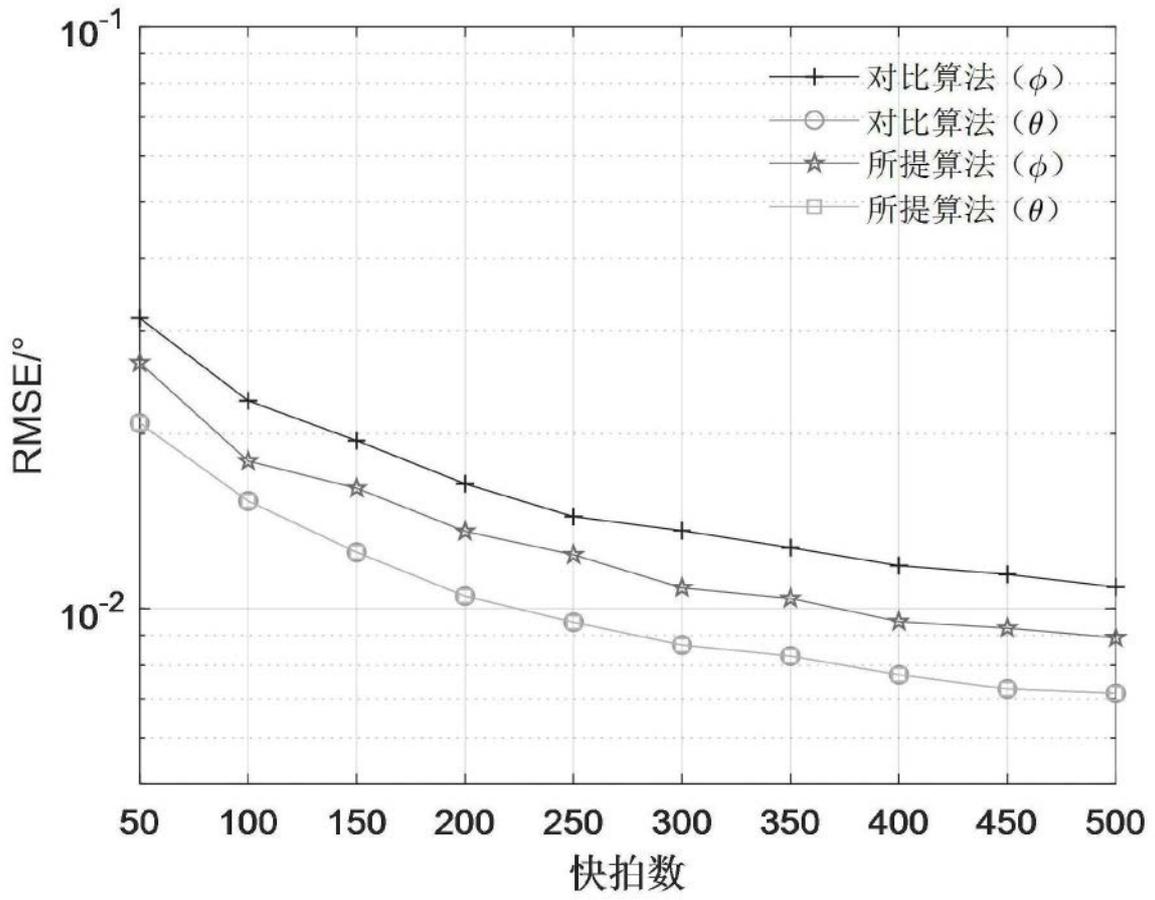


图3