



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102707258 A

(43) 申请公布日 2012. 10. 03

(21) 申请号 201210182172. 6

(22) 申请日 2012. 06. 05

(71) 申请人 西安交通大学苏州研究院

地址 215123 江苏省苏州市工业园区仁爱路
99 号

(72) 发明人 王光敏 辛景民 刘畅农 郑南宁

(74) 专利代理机构 苏州创元专利商标事务所有
限公司 32103

代理人 范晴

(51) Int. Cl.

G01S 3/14(2006. 01)

G01S 3/12(2006. 01)

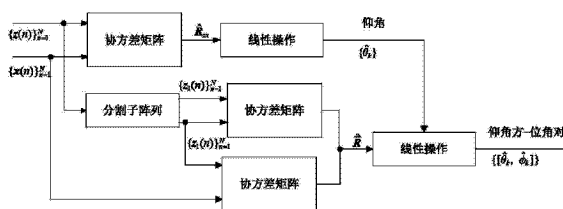
权利要求书 3 页 说明书 9 页 附图 2 页

(54) 发明名称

基于 L 型传感器阵列的信号方位角和仰角联合估计方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于 L 型传感器阵列的信号方位角和仰角联合估计方法,用于估计入射到 L 型传感器阵列上的入射信号到达方向,其中 L 型传感器阵列放置在 x-z 平面,具有两个相互垂直的均匀线阵,且每个均匀线阵沿直线以相同的间隔设置在不同空间位置上的 M 个全向的传感器,其特征在于所述方法包括以下步骤:(1)估计 x 轴和 z 轴上两列均匀线阵接收到的信号的协方差矩阵,然后根据两列均匀线阵接收到的信号的协方差矩阵计算得到 M×2M 的扩展互协方差矩阵;(2)分割 z 轴或 x 轴上的均匀线阵为两列不相重合的前向/后向子阵,然后通过线性操作的一维子空间的方法利用两列均匀线阵接收到的数据的扩展互协方差矩阵估计仰角;(3)联合方位角和仰角的可行域,由 z 轴或 x 轴上的两列子阵以及其中一列子阵和 x 轴或 z 轴上的均匀线阵之间的互协方差通过线性操作估计得到对应的方位角。



1. 一种基于 L 型传感器阵列的信号方位角和仰角联合估计方法,用于估计入射到 L 型传感器阵列上的入射信号到达方向,其中 L 型传感器阵列放置在 x-z 平面,具有两个相互垂直的均匀线阵,且每个均匀线阵沿直线以相同的间隔设置在不同空间位置上的 M 个全向的传感器,其特征在于所述方法包括以下步骤:

(1)估计 x 轴和 z 轴上两列均匀线阵接收到的信号的协方差矩阵,然后根据两列均匀线阵接收到的信号的协方差矩阵计算得到 $M \times 2M$ 的扩展互协方差矩阵;

(2)分割 z 轴或 x 轴上的均匀线阵为两列不相重合的前向 / 后向子阵,然后通过线性操作的一维子空间的方法利用两列均匀线阵接收到的数据的扩展互协方差矩阵估计仰角;

(3)联合方位角和仰角的可行域,由 z 轴或 x 轴上的两列子阵以及其中一列子阵和 x 轴或 z 轴上的均匀线阵之间的互协方差通过线性操作估计得到对应的方位角。

2. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于所述方法中入射信号具有对时间和空间非相关加性噪声环境或无加性噪声环境。

3. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于所述方法中入射信号为多个入射信号或单个入射信号。

4. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于所述方法步骤(1)中传感器的间距为 d,坐标系原点 z_0 处的传感器作为每列均匀线阵的参考, z_0 和 x_1 传感器间距也是 d;假设 p 个不相干的远场窄带信号 $\{s_k(n)\}$, 波长 λ , 从不同的仰角和方位角 $\{\theta_k, \phi_k\}$ 入射到阵列上, $\bar{\phi}_k$ 为方位角 ϕ_k 在 x-y 平面上的投影, $0^\circ \leq \theta_k \leq 180^\circ$, $0^\circ \leq \phi_k \leq 180^\circ$, $0^\circ \leq \bar{\phi}_k \leq 180^\circ$; 两列均匀线阵接收到的信号为:

$$z(n) = A(\theta)s(n) + w_z(n) \quad (\text{I});$$

$$x(n) = A(\phi)s(n) + w_x(n) \quad (\text{II});$$

其中 $\mathbf{z}(n) \triangleq [z_0(n), z_1(n), \dots, z_{M-1}(n)]^T$, $\mathbf{x}(n) \triangleq [x_1(n), x_2(n), \dots, x_M(n)]^T$, z 轴传感器噪声 $\mathbf{w}_z(n) \triangleq [w_{z_0}(n), w_{z_1}(n), \dots, w_{z_{M-1}}(n)]^T$ x 轴传感器噪声 $\mathbf{w}_x(n) \triangleq [w_{x_1}(n), w_{x_2}(n), \dots, w_{x_M}(n)]^T$, $\mathbf{s}(n) \triangleq [s_1(n), s_2(n), \dots, s_p(n)]^T$, 方向矩阵 $A(\theta) \triangleq [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_p)]$, $\mathbf{a}(\theta_k) \triangleq [1, e^{j\alpha_k}, \dots, e^{j(M-1)\alpha_k}]^T$, $A(\phi) \triangleq [\mathbf{a}(\phi_1), \mathbf{a}(\phi_2), \dots, \mathbf{a}(\phi_p)]$, $\mathbf{a}(\phi_k) \triangleq [e^{j\beta_k}, e^{j2\beta_k}, \dots, e^{jM\beta_k}]^T$, $\alpha_k \triangleq 2\pi d \cos \theta_k / \lambda$, $\beta_k \triangleq 2\pi d \cos \phi_k / \lambda$;

假设 $A(\theta)A(\phi)$ 已知,传感器间距 d 满足 $0 < d < \lambda/2$,入射信号 $\{s_k(n)\}$ 为时域白高斯随机过程,具有零均值,其方差给定为 $E\{s_k(n)s_k^*(t)\} = r_{s_k} \delta_{n,t}$, $E\{s_k(n)s_k(t)\} = 0 \quad \forall n, t$, 加性噪声 $\{w_z(n)\}$ 和 $\{w_x(n)\}$ 分别为 z 轴或 x 轴上第 i 个传感器上的噪声,均为时域-空域白高斯随机过程,具有零均值,其协方差矩阵为 $E\{w_z(n)w_z^H(t)\} = E\{w_x(n)w_x^H(t)\} = \sigma^2 \mathbf{I}_M \delta_{n,t}$, $E\{w_z(n)w_z^T(t)\} = E\{w_x(n)w_x^T(t)\} = \mathbf{O}_{M \times M}$, $\forall n, t$, 并且 $E\{w_x(n)w_z^H(t)\} = \mathbf{O}_{M \times M}$;在两列均匀线阵上加性噪声与入射信号 $\{s_k(n)\}$ 互相统计独立;假设入射信号个数 p 已知或者可由一些检测技术提前估计得到,并且满足不等式 $p < M$;则由关系 $\cos \phi_k = \cos \bar{\phi}_k \sin \theta_k$, 得到 θ_k 和 ϕ_k 的可行域以及 θ_k 和 $\bar{\phi}_k$ 的可行域,参数 θ_k 和 ϕ_k 限制在该几何区域内: $-\theta_k + 90^\circ \leq \phi_k \leq \theta_k + 90^\circ$, 其中 $0^\circ \leq \theta_k \leq 90^\circ$; $\theta_k - 90^\circ \leq \phi_k \leq -\theta_k + 270^\circ$, 其中 $90^\circ \leq \theta_k \leq 180^\circ$ 。

5. 根据权利要求4所述的方法,其特征在于所述方法步骤(2)具体按照如下步骤进行:

将沿 z 轴的均匀线阵分割为两个不相重叠的前向子阵列,分别包括 p 个传感器和 M-p 个传感器,则:

$$\mathbf{z}(n) = [\bar{\mathbf{z}}_1^T(n), \bar{\mathbf{z}}_2^T(n)]^T = [\mathbf{A}_1^T(\theta), \mathbf{A}_2^T(\theta)]^T \mathbf{s}(n) + [\bar{\mathbf{w}}_{z_1}^T(n), \bar{\mathbf{w}}_{z_2}^T(n)]^T \quad (\text{III});$$

其中 $\bar{\mathbf{z}}_1(n) \triangleq [z_0(n), z_1(n), \dots, z_{p-1}(n)]^T$, $\bar{\mathbf{z}}_2(n) \triangleq [z_p(n), z_{p+1}(n), \dots, z_{M-1}(n)]^T$, $\bar{\mathbf{w}}_{z_1}(n) \triangleq [w_{z_0}(n), w_{z_1}(n), \dots, w_{z_{p-1}}(n)]^T$, $\bar{\mathbf{w}}_{z_2}(n) \triangleq [w_{z_p}(n), w_{z_{p+1}}(n), \dots, w_{z_{M-1}}(n)]^T$;

将 $\mathbf{A}(\theta)$ 分割成两个子矩阵 $\mathbf{A}_1(\theta)$ 和 $\mathbf{A}_2(\theta)$, 其列向量为 $\mathbf{a}_1(\theta_k) \triangleq [1, e^{j\alpha_k}, \dots, e^{j(p-1)\alpha_k}]^T$ 和 $\mathbf{a}_2(\theta_k) \triangleq [e^{j(p)\alpha_k}, e^{j(p+1)\alpha_k}, \dots, e^{j(M-1)\alpha_k}]^T$; 由(II)式和(III)式得到 x 轴和 z 轴上两列均匀线阵接收到的信号的协方差矩阵 \mathbf{R}_{zx} :

$$\mathbf{R}_{zx} \triangleq E\{\mathbf{z}(n)\mathbf{x}^H(n)\} = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H(\theta) = [\mathbf{R}_{z_1x}^T, \mathbf{R}_{z_2x}^T]^T \quad (\text{IV});$$

其中 \mathbf{R}_s 为信号协方差矩阵, 定义为 $\mathbf{R}_s \triangleq E\{\mathbf{s}(n)\mathbf{s}^H(n)\}$, $\mathbf{R}_{z_1x} \triangleq E\{\bar{\mathbf{z}}_1(n)\mathbf{x}^H(n)\} = \mathbf{A}_1(\theta)\mathbf{R}_s\mathbf{A}_1^H(\theta)$, $\mathbf{R}_{z_2x} \triangleq E\{\bar{\mathbf{z}}_2(n)\mathbf{x}^H(n)\} = \mathbf{A}_2(\theta)\mathbf{R}_s\mathbf{A}_2^H(\theta)$; 同理分割同一列均匀线阵为两列不相重叠的后向子阵列分别由 p 个阵元和 M-p 个阵元组成, 则这列均匀线阵的联合噪声信号向量 $\tilde{\mathbf{z}}(n)$ 为

$$\tilde{\mathbf{z}}(n) \triangleq [\tilde{\mathbf{z}}_1^T(n), \tilde{\mathbf{z}}_2^T(n)]^T = \mathbf{J}_M \mathbf{z}^*(n) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{D}^{-(M-1)}(\theta)\mathbf{s}^*(n) + \tilde{\mathbf{w}}_z(n) \quad (\text{V});$$

其中, $\tilde{\mathbf{z}}_1(n) \triangleq [z_{M-1}(n), z_{M-2}(n), \dots, z_{M-p}(n)]^H$, $\tilde{\mathbf{z}}_2(n) \triangleq [z_{M-p-1}(n), \dots, z_2(n), z_1(n)]^H$, $\tilde{\mathbf{w}}_z(n) \triangleq [w_{z_{M-1}}(n), \dots, w_{z_1}(n), w_{z_0}(n)]^H$, $\mathbf{D}(\theta) \triangleq \text{diag}(e^{j\alpha}, e^{j2\alpha}, \dots, e^{j(p)\alpha})$; 得到协方差矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}_{zx}$:

$$\tilde{\mathbf{R}}_{zx} \triangleq E\{\tilde{\mathbf{z}}(n)\mathbf{x}^T(n)\} = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{D}^{-(M-1)}(\theta)\mathbf{R}_s^*\mathbf{A}^T(\theta) = \mathbf{J}_M\mathbf{R}_{zx}^T = [\tilde{\mathbf{R}}_{z_1x}^T, \tilde{\mathbf{R}}_{z_2x}^T]^T \quad (\text{VI});$$

其中, $\tilde{\mathbf{R}}_{z_1x}^T \triangleq E\{\tilde{\mathbf{z}}_1(n)\mathbf{x}^T(n)\} = \mathbf{A}_1(\theta)\mathbf{D}^{-(M-1)}(\theta)\mathbf{R}_s^*\mathbf{A}_1^T(\theta)$, $\tilde{\mathbf{R}}_{z_2x}^T \triangleq E\{\tilde{\mathbf{z}}_2(n)\mathbf{x}^T(n)\} = \mathbf{A}_2(\theta)\mathbf{D}^{-(M-1)}(\theta)\mathbf{R}_s^*\mathbf{A}_2^T(\theta)$;

根据从(IV)式和(VI)式得到 $M \times 2M$ 扩展协方差矩阵 \mathbf{R}_z :

$$\mathbf{R}_z \triangleq [\mathbf{R}_{zx}, \tilde{\mathbf{R}}_{zx}] = \mathbf{A}(\theta)[\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H(\theta), \mathbf{D}^{-(M-1)}(\theta)\mathbf{R}_s^*\mathbf{A}^T(\theta)] \triangleq [\mathbf{R}_{z1}^T, \mathbf{R}_{z2}^T]^T \quad (\text{VII});$$

$\mathbf{A}_1(\theta)$ 满秩, $\mathbf{A}_2(\theta)$ 的行向量为 $\mathbf{A}_1(\theta)$ 独立行的线性组合; 且 $\mathbf{A}_1(\theta)$ 和 $\mathbf{A}_2(\theta)$ 之间 $p \times (M-p)$ 维线性算子 \mathbf{P}_z , 即 $\mathbf{A}_2(\theta) = \mathbf{P}_z^H \mathbf{A}_1(\theta)$; 则 \mathbf{P}_z 为:

$$\mathbf{P}_z = \mathbf{A}_1^{-H}(\theta)\mathbf{A}_2^H(\theta) = (\mathbf{R}_{z1}\mathbf{R}_{z1}^H)^{-1}\mathbf{R}_{z1}\mathbf{R}_{z2}^H \quad (\text{VIII});$$

定义矩阵 $\mathbf{Q}_z \triangleq [\mathbf{P}_z^T, -\mathbf{I}_{M-p}]^T$, 获得 $\mathbf{Q}_z^H \mathbf{A}(\theta) = \mathbf{O}_{(M-p) \times p}$;

向由 $\mathbf{A}(\theta)$ 的列向量张成的子空间的投影为 $\Pi_z \triangleq \mathbf{Q}_z(\mathbf{Q}_z^H \mathbf{Q}_z)^{-1}\mathbf{Q}_z^H$, $\Pi_z \mathbf{a}(\theta) = \mathbf{0}_{M \times 1}$, $\theta = \theta_k$ (IX); 其中 $\mathbf{a}(\theta) \triangleq [1, e^{j\alpha}, \dots, e^{j(M-1)\alpha}]^T$, $\mathbf{0}_{m \times 1}$ 为 $m \times 1$ 维零向量,

通过式(IX)的正交性质, 当快拍数有限时, 仰角 $\{\theta_k\}_{k=1}^p$ 通过最小化消耗函数 $f(\theta)$ 估计得到

$$\hat{\theta}_k = \underset{\theta}{\text{argmin}} f(\theta) \triangleq \underset{\theta}{\text{argmin}} \mathbf{a}^H(\theta) \hat{\Pi}_z \mathbf{a}(\theta) \quad (\text{X});$$

其中 $\hat{\Pi}_z = \hat{\mathbf{Q}}_z(\hat{\mathbf{Q}}_z^H \hat{\mathbf{Q}}_z)^{-1}\hat{\mathbf{Q}}_z^H = \hat{\mathbf{Q}}_z(\mathbf{I}_{M-p} - \hat{\mathbf{P}}_z^H(\hat{\mathbf{P}}_z \hat{\mathbf{P}}_z^H + \mathbf{I}_p)^{-1}\hat{\mathbf{P}}_z)\hat{\mathbf{Q}}_z^H$, $\hat{\mathbf{P}}_z = (\hat{\mathbf{R}}_{z1}\hat{\mathbf{R}}_{z1}^H)^{-1}\hat{\mathbf{R}}_{z1}\hat{\mathbf{R}}_{z2}^H$.

6. 根据权利要求 5 所述的方法,其特征在于所述方法步骤(3)方位角通过如下步骤进行估计:

构建 $(2M-p) \times 1$ 维的连接信号向量由 x 轴上的均匀线阵和 z 轴上的子阵 $\bar{\mathbf{z}}_2(n)$ 所接收,则 $\bar{\mathbf{y}}(n) \triangleq [\bar{\mathbf{z}}_2^T(n), \mathbf{x}^T(n)]^T = \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi) \mathbf{s}(n) + \bar{\mathbf{w}}_y(n)$, 其中 $\bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi) \triangleq [\mathbf{A}_2^T(\theta), \mathbf{A}^T(\phi)]$, 其列向量 $\bar{\mathbf{a}}(\theta_k, \phi_k) \triangleq [\mathbf{a}_2^T(\theta_k), \mathbf{a}^T(\phi_k)]^T$, $\bar{\mathbf{w}}_y(n) \triangleq [\bar{\mathbf{w}}_{z2}^T(n), \mathbf{w}_x^T(n)]^T$; 则数据阵列 $\bar{\mathbf{y}}(n)$ 和 z 轴子阵列 $\bar{\mathbf{z}}_2(n)$ 的 $(2M-p) \times p$ 维互协方差矩阵 $\bar{\mathbf{R}}$ 为:

$$\bar{\mathbf{R}} \triangleq E\{\bar{\mathbf{y}}(n)\bar{\mathbf{z}}_1^H(n)\} = \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi) \mathbf{R}_s \mathbf{A}_1^H(\theta) = [\bar{\mathbf{R}}_{z2z1}^T, \mathbf{R}_{z1x}^*]^T \quad (\text{XI}) ; \quad \text{其中}$$

$$\bar{\mathbf{R}}_{z2z1}^T \triangleq E\{\bar{\mathbf{z}}_2(n)\bar{\mathbf{z}}_1^H(n)\} = \mathbf{A}_2(\theta) \mathbf{R}_s \mathbf{A}_1^H(\theta);$$

根据 (IX) 式得到 $\bar{\mathbf{\Pi}} \bar{\mathbf{a}}(\theta, \phi) = \mathbf{0}_{(2M-p) \times 1}$, $\theta = \theta_k$ 且 $\phi = \phi_k$ (XII); 其中 $k = 1, 2, \dots, p$, 在零空间 $\mathcal{N}(\bar{\mathbf{R}})$ 上的投影 $\hat{\mathbf{\Pi}}$ 为 $\hat{\mathbf{\Pi}} \triangleq \mathbf{I}_{2M-p} - \bar{\mathbf{R}}(\bar{\mathbf{R}}^H \bar{\mathbf{R}})^{-1} \bar{\mathbf{R}}^H$;

当有限的阵列数据可变时,从 (XII) 式估计仰角、方位角 $\{\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k\}$;

$$\{\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k\} = \underset{\theta, \phi}{\operatorname{argmin}} f(\theta, \phi) \triangleq \underset{\theta, \phi}{\operatorname{argmin}} \bar{\mathbf{a}}^H(\theta, \phi) \hat{\mathbf{\Pi}} \bar{\mathbf{a}}(\theta, \phi)$$

$$s.t. \begin{cases} -\theta_k + 90^\circ \leq \phi_k \leq \theta_k + 90^\circ & 0^\circ \leq \theta_k \leq 90^\circ \\ \theta_k - 90^\circ \leq \phi_k \leq -\theta_k + 270^\circ & 90^\circ \leq \theta_k \leq 180^\circ \end{cases} \quad (\text{XIII});$$

根据 (X) 和 (XIII) 式得到方位角估计为

$$\hat{\phi}_k = \underset{\phi}{\operatorname{argmin}} f_k(\phi) \triangleq \underset{\phi}{\operatorname{argmin}} \bar{\mathbf{a}}^H(\phi) \mathbf{\Gamma}(\hat{\theta}_k) \bar{\mathbf{a}}(\phi)$$

$$s.t. \begin{cases} -\hat{\theta}_k + 90^\circ \leq \phi_k \leq \hat{\theta}_k + 90^\circ & 0^\circ \leq \hat{\theta}_k \leq 90^\circ \\ \hat{\theta}_k - 90^\circ \leq \phi_k \leq -\hat{\theta}_k + 270^\circ & 90^\circ \leq \hat{\theta}_k \leq 180^\circ \end{cases} \quad (\text{XIV});$$

其中 $\bar{\mathbf{a}}(\phi) \triangleq [1, \mathbf{a}^T(\phi)]^T$, 且 $\mathbf{\Gamma}(\hat{\theta}_k) \triangleq \mathbf{B}^H(\hat{\theta}_k) \hat{\mathbf{\Pi}} \mathbf{B}(\hat{\theta}_k) = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_2^H(\hat{\theta}_k) \hat{\mathbf{\Pi}}_{11} \mathbf{a}_2(\hat{\theta}_k) & \mathbf{a}_2^H(\hat{\theta}_k) \hat{\mathbf{\Pi}}_{12} \\ \hat{\mathbf{\Pi}}_{21} \mathbf{a}_2(\hat{\theta}_k) & \hat{\mathbf{\Pi}}_{22} \end{pmatrix}$, 其中

$\mathbf{B}(\theta) = \operatorname{diag}(\mathbf{a}_2(\theta), \mathbf{I}_M)$, $\hat{\mathbf{\Pi}}_{ik}$ 是 $\hat{\mathbf{\Pi}}$ 第 ik 个块元素, 并且 $\bar{\mathbf{a}}(\theta, \phi) = \mathbf{B}(\theta) \bar{\mathbf{a}}(\phi)$ 。

7. 一种基于 L 型传感器阵列的信号方向估计与跟踪装置,包括 L 型传感器阵列,其中 L 型传感器阵列放置在 x-z 平面,具有两个相互垂直的均匀线阵,且每个均匀线阵沿直线以相同的间隔设置在不同空间位置上的 M 个全向的传感器,其特征在于所述装置还包括:

线阵相关性计算模块,用于计算两列天线阵子所接收的所有数据之间的相关性;

子阵相关性计算模块,用于计算一列均匀线阵所分割的两列子阵之间的所接收的数据的相关性以及其中一列子阵与另一天线阵列所接收的数据之间的相关性;

扩展相关性矩阵计算模块,用于根据所述相关性来计算扩展相关性矩阵;

仰角估计模块,用于利用所述扩展相关性矩阵,通过线性运算来估计仰角;

方位角估计模块,用于子阵之间的相关性矩阵结合可行域估计方位角。

基于 L 型传感器阵列的信号方位角和仰角联合估计方法

技术领域

[0001] 本发明属于信号处理技术领域,具体涉及一种二维波达方向的估计,一种分割 L 型阵列,利用互相关估计仰角,再利用估计到的仰角计算对应的方位角。

背景技术

[0002] 阵列信号处理是信号处理的一个重要分支,与参数估计、系统辨识、自适应滤波、统计信号处理以及矩阵理论等有密切的联系,并在雷达、声纳、通信、地震数据处理和医用成像等众多领域得到广泛的应用。阵列信号处理的实际应用包括雷达、声纳、通信等,多入射信号的二维(2-D)波达方向(DOA)(例如,方位角和仰角)必须从众多的测量中估计得到。随着维数的增加,二维估计问题比一维更加复杂,并且估计的方位角必须与同一入射信号的仰角对应起来。最大似然法(ML)为二维问题提供了一种最优解,但是在参数空间计算繁重的多维搜索常常需要获得似然函数的全局最大值。由于全局最大值比最大似然法的实现简单,许多基于特征结构和平面阵列(如,均匀圆形阵列和矩形阵列)的次优的方法已经由解决一维问题发展为解决二维波达角度估计问题。

[0003] 二维波达方向估计的计算复杂度通常会受到阵列几何构造的影响,这些特殊的构造可以经过研究发展为计算高效的 DOA 估计方法。近年来,一种 L 型传感器阵列受到了很大的关注,这种阵列由两列均匀线性阵列(ULA)直角连接组成,与传统的平面阵列相比它具有一些几何结构和实现方面的优势,且比其他具有两列或更多 ULA 的简单结构的平面阵列具有更高的估计精确度。很多需要特征分解的二维 DOA 估计方法都是使用的 L 阵,其中阵列放置在 x - y 平面或者 x - z 平面。

[0004] 传统的二维估计问题可分解为两个独立的一维估计问题,并且经过深入研究的一维基于子空间的方法可以直接应用于避免计算复杂的多维搜索与优化。ESPRIT 这类方法提供了通过矩阵的特征值对方位角和仰角自配对的封闭型的估计,其它方法都是通过配对过程。然而,现存的配对技术的计算代价很高,并且经常不能提供正确的配对结果,所以,配对失败会造成估计失败。对于上述估计失败的措施在上面提到的二维估计方法中还没有考虑。另外,这些方法都存在计算密集和费时的特征分解过程,因此不能应用到实时过程中。本发明因此而来。

发明内容

[0005] 本发明目的在于提供一种基于 L 型传感器阵列的信号方位角和仰角联合估计方法,解决了现有技术中二维波达方向估计的计算复杂度大,经常不能提供正确的配对结果,不能应用于实时环境中等问题。

[0006] 为了解决现有技术中的这些问题,本发明提供的技术方案是:

[0007] 一种基于 L 型传感器阵列的信号方位角和仰角联合估计方法,用于估计入射到 L 型传感器阵列上的入射信号到达方向,其中 L 型传感器阵列放置在 x - z 平面,具有两个相互垂直的均匀线阵,且每个均匀线阵沿直线以相同的间隔设置在不同空间位置上的 M 个全向

的传感器,其特征在于所述方法包括以下步骤:

[0008] (1)估计 x 轴和 z 轴上两列均匀线阵接收到的信号的协方差矩阵,然后根据两列均匀线阵接收到的信号的协方差矩阵计算得到 $M \times 2M$ 的扩展互协方差矩阵;

[0009] (2)分割 z 轴或 x 轴上的均匀线阵为两列不相重合的前向/后向子阵,然后通过线性操作的一维子空间的方法利用两列均匀线阵接收到的数据的扩展互协方差矩阵估计仰角;

[0010] (3)联合方位角和仰角的可行域,由 z 轴或 x 轴上的两列子阵以及其中一列子阵和 x 轴或 z 轴上的均匀线阵之间的互协方差通过线性操作估计得到对应的方位角。

[0011] 优选的,所述方法中入射信号具有对时间和空间非相关加性噪声环境或无加性噪声环境。

[0012] 优选的,所述方法中入射信号为多个入射信号或单个入射信号。

[0013] 优选的,所述方法步骤(1)中传感器的间距为 d ,坐标系原点 z_0 处的传感器作为每列均匀线阵的参考, z_0 和 x_1 传感器间距也是 d ;假设 p 个不相干的远场窄带信号 $\{s_k(n)\}$,波长 λ ,从不同的仰角和方位角 $\{\theta_k, \phi_k\}$ 入射到阵列上, $\bar{\phi}_k$ 为方位角 ϕ_k 在 x-y 平面上的投影, $0^\circ \leq \theta_k \leq 180^\circ, 0^\circ \leq \phi_k \leq 180^\circ, 0^\circ \leq \bar{\phi}_k \leq 180^\circ$,两列均匀线阵接收到的信号为:

$$[0014] \quad z(n) = A(\theta)s(n) + w_z(n) \quad (\text{I});$$

$$[0015] \quad x(n) = A(\phi)s(n) + w_x(n) \quad (\text{II});$$

[0016] 其中 $\mathbf{z}(n) \triangleq [z_0(n), z_1(n), \dots, z_{M-1}(n)]^T$, $\mathbf{x}(n) \triangleq [x_1(n), x_2(n), \dots, x_M(n)]^T$, z 轴传感器噪声 $\mathbf{w}_z(n) \triangleq [w_{z_0}(n), w_{z_1}(n), \dots, w_{z_{M-1}}(n)]^T$ x 轴传感器噪声 $\mathbf{w}_x(n) \triangleq [w_{x_1}(n), w_{x_2}(n), \dots, w_{x_M}(n)]^T$, $\mathbf{s}(n) \triangleq [s_1(n), s_2(n), \dots, s_p(n)]^T$, 方向矩阵 $\mathbf{A}(\theta) \triangleq [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_p)]$, $\mathbf{a}(\theta_k) \triangleq [1, e^{j\alpha_k}, \dots, e^{j(M-1)\alpha_k}]^T$, $\mathbf{A}(\phi) \triangleq [\mathbf{a}(\phi_1), \mathbf{a}(\phi_2), \dots, \mathbf{a}(\phi_p)]$, $\mathbf{a}(\phi_k) \triangleq [e^{j\beta_k}, e^{j2\beta_k}, \dots, e^{jM\beta_k}]^T$, $\alpha_k \triangleq 2\pi d \cos \theta_k / \lambda$, $\beta_k \triangleq 2\pi d \cos \phi_k / \lambda$;

[0017] 假设 $\mathbf{A}(\theta)\mathbf{A}(\phi)$ 已知,传感器间距 d 满足 $0 < d < \lambda/2$,入射信号 $\{s_k(n)\}$ 为时域白高斯随机过程,具有零均值,其方差给定为 $E\{s_k(n)s_k^*(t)\} = r_{s_k} \delta_{n,t}$, $E\{s_k(n)s_k(t)\} = 0 \quad \forall n, t$,加性噪声 $\{w_{z_i}(n)\}$ 和 $\{w_{x_i}(n)\}$ 分别为 z 轴或 x 轴上第 i 个传感器上的噪声,均为时域-空域白高斯随机过程,具有零均值,其协方差矩阵为 $E\{w_{z_i}(n)w_{z_i}^H(t)\} = E\{w_{x_i}(n)w_{x_i}^H(t)\} = \sigma^2 \mathbf{I}_M \delta_{n,t}$, $E\{w_{z_i}(n)w_{z_i}^T(t)\} = E\{w_{x_i}(n)w_{x_i}^T(t)\} = \mathbf{O}_{M \times M}$, $\forall n, t$,并且 $E\{w_{x_i}(n)w_{z_i}^H(t)\} = \mathbf{O}_{M \times M}$;在两列均匀线阵上加性噪声与入射信号 $\{s_k(n)\}$ 互相统计独立;假设入射信号个数 p 已知或者可由一些检测技术提前估计得到,并且满足不等式 $p < M$;则由关系 $\cos \phi_k = \cos \bar{\phi}_k \sin \theta_k$,得到 θ_k 和 ϕ_k 的可行域以及 θ_k 和 $\bar{\phi}_k$ 的可行域,参数 θ_k 和 ϕ_k 限制在该几何区域内: $-\theta_k + 90^\circ \leq \phi_k \leq \theta_k + 90^\circ$,其中 $0^\circ \leq \theta_k \leq 90^\circ$; $\theta_k - 90^\circ \leq \phi_k \leq -\theta_k + 270^\circ$,其中 $90^\circ \leq \theta_k \leq 180^\circ$ 。

[0018] 优选的,所述方法步骤(2)具体按照如下步骤进行:

[0019] 将沿 z 轴的均匀线阵分割为两个不相重叠的前向子阵列,分别包括 p 个传感器和 $M-p$ 个传感器,则:

$$[0020] \quad \mathbf{z}(n) = [\bar{\mathbf{z}}_1^T(n), \bar{\mathbf{z}}_2^T(n)]^T = [\mathbf{A}_1^T(\theta), \mathbf{A}_2^T(\theta)]^T \mathbf{s}(n) + [\bar{\mathbf{w}}_1^T(n), \bar{\mathbf{w}}_2^T(n)]^T \quad (\text{III});$$

[0021] 其中 $\bar{z}_1(n) \triangleq [z_0(n), z_1(n), \dots, z_{p-1}(n)]^T$, $\bar{z}_2(n) \triangleq [z_p(n), z_{p+1}(n), \dots, z_{M-1}(n)]^T$, $\bar{w}_{z_1}(n) \triangleq [w_{z_0}(n), w_{z_1}(n), \dots, w_{z_{p-1}}(n)]^T$, $\bar{w}_{z_2}(n) \triangleq [w_{z_p}(n), w_{z_{p+1}}(n), \dots, w_{z_{M-1}}(n)]^T$;

[0022] 将 $A(\theta)$ 分割成两个子矩阵 $A_1(\theta)$ 和 $A_2(\theta)$, 其列向量为 $\mathbf{a}_1(\theta_k) \triangleq [1, e^{j\alpha_k}, \dots, e^{j(p-1)\alpha_k}]^T$ 和 $\mathbf{a}_2(\theta_k) \triangleq [e^{j p \alpha_k}, e^{j(p+1)\alpha_k}, \dots, e^{j(M-1)\alpha_k}]^T$; 由(II)式和(III)式得到 x 轴和 z 轴上两列均匀线阵接收到的信号的协方差矩阵 R_{zx} :

$$[0023] \quad \mathbf{R}_{zx} \triangleq E\{z(n)\mathbf{x}^H(n)\} = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H(\phi) = [\mathbf{R}_{z_1x}^T, \mathbf{R}_{z_2x}^T]^T \quad (\text{IV});$$

[0024] 其中 R_s 为信号协方差矩阵, 定义为 $\mathbf{R}_s \triangleq E\{s(n)s^H(n)\}$, $\mathbf{R}_{z_1x} \triangleq E\{\bar{z}_1(n)\mathbf{x}^H(n)\} = \mathbf{A}_1(\theta)\mathbf{R}_s\mathbf{A}_1^H(\phi)$, $\mathbf{R}_{z_2x} \triangleq E\{\bar{z}_2(n)\mathbf{x}^H(n)\} = \mathbf{A}_2(\theta)\mathbf{R}_s\mathbf{A}_2^H(\phi)$; 同理分割同一列均匀线阵为两列不相重叠的后向子阵列分别由 p 个阵元和 $M-p$ 个阵元组成, 则这列均匀线阵的联合噪声信号向量 $\tilde{z}(n)$ 为

$$[0025] \quad \tilde{z}(n) \triangleq [\tilde{z}_1^T(n), \tilde{z}_2^T(n)]^T = \mathbf{J}_M \mathbf{z}^*(n) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{D}^{-(M-1)}(\theta)\mathbf{s}^*(n) + \tilde{w}_z(n) \quad (\text{V});$$

[0026] 其中, $\tilde{z}_1(n) \triangleq [z_{M-1}(n), z_{M-2}(n), \dots, z_{M-p}(n)]^H$, $\tilde{z}_2(n) \triangleq [z_{M-p-1}(n), \dots, z_2(n), z_1(n)]^H$, $\tilde{w}_z(n) \triangleq [w_{z_{M-1}}(n), \dots, w_{z_1}(n), w_{z_0}(n)]^H$, $\mathbf{D}(\theta) \triangleq \text{diag}(e^{j\alpha_0}, e^{j\alpha_1}, \dots, e^{j\alpha_p})$, 得到协方差矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}_{zx}$:

$$[0027] \quad \tilde{\mathbf{R}}_{zx} \triangleq E\{\tilde{z}(n)\mathbf{x}^T(n)\} = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{D}^{-(M-1)}(\theta)\mathbf{R}_s^*\mathbf{A}^T(\phi) = \mathbf{J}_M\mathbf{R}_{zx}^T = [\tilde{\mathbf{R}}_{z_1x}^T, \tilde{\mathbf{R}}_{z_2x}^T]^T \quad (\text{VI});$$

[0028] 其中, $\tilde{\mathbf{R}}_{z_1x}^T \triangleq E\{\tilde{z}_1(n)\mathbf{x}^T(n)\} = \mathbf{A}_1(\theta)\mathbf{D}^{-(M-1)}(\theta)\mathbf{R}_s^*\mathbf{A}_1^T(\phi)$, $\tilde{\mathbf{R}}_{z_2x}^T \triangleq E\{\tilde{z}_2(n)\mathbf{x}^T(n)\} = \mathbf{A}_2(\theta)\mathbf{D}^{-(M-1)}(\theta)\mathbf{R}_s^*\mathbf{A}_2^T(\phi)$;

[0029] 根据从(IV)式和(VI)式得到 $M \times 2M$ 扩展协方差矩阵 \mathbf{R}_z :

$$[0030] \quad \mathbf{R}_z \triangleq [\mathbf{R}_{zx}, \tilde{\mathbf{R}}_{zx}] = \mathbf{A}(\theta)[\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H(\phi), \mathbf{D}^{-(M-1)}(\theta)\mathbf{R}_s^*\mathbf{A}^T(\phi)] \triangleq [\mathbf{R}_{z_1}^T, \mathbf{R}_{z_2}^T]^T \quad (\text{VII});$$

[0031] $A_1(\theta)$ 满秩, $A_2(\theta)$ 的行向量为 $A_1(\theta)$ 独立行的线性组合; 且 $A_1(\theta)$ 和 $A_2(\theta)$ 之间 $p \times (M-p)$ 维线性算子 \mathbf{P}_z , 即 $\mathbf{A}_2(\theta) = \mathbf{P}_z^H \mathbf{A}_1(\theta)$, 则 \mathbf{P}_z 为:

$$[0032] \quad \mathbf{P}_z = \mathbf{A}_1^{-H}(\theta)\mathbf{A}_2^H(\theta) = (\mathbf{R}_{z_1}\mathbf{R}_{z_1}^H)^{-1}\mathbf{R}_{z_1}\mathbf{R}_{z_2}^H \quad (\text{VIII});$$

[0033] 定义矩阵 $\mathbf{Q}_z \triangleq [\mathbf{P}_z^T, -\mathbf{I}_{M-p}]^T$, 获得 $\mathbf{Q}_z^H \mathbf{A}(\theta) = \mathbf{O}_{(M-p) \times p}$;

[0034] 向由 $A(\theta)$ 的列向量张成的子空间的投影为 $\Pi_z \triangleq \mathbf{Q}_z(\mathbf{Q}_z^H \mathbf{Q}_z)^{-1}\mathbf{Q}_z^H$, $\Pi_{z^a}(\theta) = \mathbf{O}_{m \times 1}$, $\theta = \theta_k$ (IX); 其中 $\mathbf{a}(\theta) \triangleq [1, e^{j\alpha}, \dots, e^{j(M-1)\alpha}]^T$, $\mathbf{O}_{m \times 1}$ 为 $m \times 1$ 维零向量, 通过式(IX)的正交性质, 当快拍数有限时, 仰角 $\{\theta_k\}_{k=1}^p$ 通过最小化消耗函数 $f(\theta)$ 估计得到

$$[0035] \quad \hat{\theta}_k = \underset{\theta}{\text{argmin}} f(\theta) \triangleq \underset{\theta}{\text{argmin}} \mathbf{a}^H(\theta)\hat{\Pi}_z \mathbf{a}(\theta) \quad (\text{X});$$

[0036] 其中 $\hat{\Pi}_z = \hat{\mathbf{Q}}_z(\hat{\mathbf{Q}}_z^H \hat{\mathbf{Q}}_z)^{-1}\hat{\mathbf{Q}}_z^H = \hat{\mathbf{Q}}_z(\mathbf{I}_{M-p} - \hat{\mathbf{P}}_z^H(\hat{\mathbf{P}}_z \hat{\mathbf{P}}_z^H + \mathbf{I}_p)^{-1}\hat{\mathbf{P}}_z)\hat{\mathbf{Q}}_z^H$, $\hat{\mathbf{P}}_z = (\hat{\mathbf{R}}_{z_1}\hat{\mathbf{R}}_{z_1}^H)^{-1}\hat{\mathbf{R}}_{z_1}\hat{\mathbf{R}}_{z_2}^H$ 。

[0037] 优选的, 所述方法步骤(3)方位角通过如下步骤进行估计:

[0038] 构建 $(2M-p) \times 1$ 维的连接信号向量由 x 轴上的均匀线阵和 z 轴上的子阵 $\bar{z}_2(n)$ 所接收, 则 $\bar{\mathbf{y}}(n) \triangleq [\bar{z}_2^T(n), \mathbf{x}^T(n)]^T = \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi)\mathbf{s}(n) + \bar{\mathbf{w}}_y(n)$, 其中 $\bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi) \triangleq [\mathbf{A}_2^T(\theta), \mathbf{A}^T(\phi)]$, 其列向量 $\bar{\mathbf{a}}(\theta_k, \phi_k) \triangleq [\mathbf{a}_2^T(\theta_k), \mathbf{a}^T(\phi_k)]^T$, $\bar{\mathbf{w}}_y(n) \triangleq [\bar{w}_{z_2}^T(n), w_x^T(n)]^T$; 则数据阵列 $\bar{\mathbf{y}}(n)$ 和 z 轴子阵列 $\bar{z}_1(n)$ 的 $(2M-p) \times p$ 维互协方差矩阵 $\bar{\mathbf{R}}$ 为:

[0039] $\bar{\mathbf{R}} \triangleq E\{\bar{\mathbf{y}}(n)\bar{\mathbf{z}}_1^H(n)\} = \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi)\mathbf{R}_s\mathbf{A}_1^H(\theta) = [\bar{\mathbf{R}}_{22z1}^T, \mathbf{R}_{z1x}^*]^T$ (XI) ; 其中
 $\bar{\mathbf{R}}_{22z1}^T \triangleq E\{\bar{\mathbf{z}}_2(n)\bar{\mathbf{z}}_1^H(n)\} = \mathbf{A}_2(\theta)\mathbf{R}_s\mathbf{A}_1^H(\theta)$;

[0040] 根据(IX)式得到 $\hat{\Pi}\bar{\mathbf{a}}(\theta, \phi) = \boldsymbol{\theta}_{(2M-p) \times 1}$ $\theta = \theta_k$ 且 $\phi = \phi_k$ (XII);其中 $k = 1, 2, \dots, p$,
 在零空间 $\mathcal{N}(\bar{\mathbf{R}})$ 上的投影 $\hat{\Pi}$ 为 $\hat{\Pi} \triangleq \mathbf{I}_{2M-p} - \bar{\mathbf{R}}(\bar{\mathbf{R}}^H\bar{\mathbf{R}})^{-1}\bar{\mathbf{R}}^H$;

[0041] 当有限的阵列数据可变时,从(XII)式估计仰角、方位角 $\{\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k\}$;

[0042] $\{\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k\} = \underset{\theta, \phi}{\operatorname{argmin}} f(\theta, \phi) \triangleq \underset{\theta, \phi}{\operatorname{argmin}} \bar{\mathbf{a}}^H(\theta, \phi)\hat{\Pi}\bar{\mathbf{a}}(\theta, \phi)$

[0043]

$$s.t. \begin{cases} -\theta_k + 90^\circ \leq \phi_k \leq \theta_k + 90^\circ & 0^\circ \leq \theta_k \leq 90^\circ \\ \theta_k - 90^\circ \leq \phi_k \leq -\theta_k + 270^\circ & 90^\circ \leq \theta_k \leq 180^\circ \end{cases} \quad (\text{XIII});$$

[0044] 根据(X)和(XIII)式得到方位角估计为

[0045] $\hat{\phi}_k = \underset{\phi}{\operatorname{argmin}} f_k(\phi) \triangleq \underset{\phi}{\operatorname{argmin}} \bar{\mathbf{a}}^H(\phi)\boldsymbol{\Gamma}(\hat{\theta}_k)\bar{\mathbf{a}}(\phi)$

[0046]

$$s.t. \begin{cases} -\hat{\theta}_k + 90^\circ \leq \phi_k \leq \hat{\theta}_k + 90^\circ & 0^\circ \leq \hat{\theta}_k \leq 90^\circ \\ \hat{\theta}_k - 90^\circ \leq \phi_k \leq -\hat{\theta}_k + 270^\circ & 90^\circ \leq \hat{\theta}_k \leq 180^\circ \end{cases} \quad (\text{XIV});$$

[0047] 其中 $\boldsymbol{\Gamma}(\hat{\theta}_k) \triangleq \mathbf{B}^H(\hat{\theta}_k)\hat{\Pi}\mathbf{B}(\hat{\theta}_k) = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_2^H(\hat{\theta}_k)\hat{\Pi}_{11}\mathbf{a}_2(\hat{\theta}_k) & \mathbf{a}_2^H(\hat{\theta}_k)\hat{\Pi}_{12} \\ \hat{\Pi}_{21}\mathbf{a}_2(\hat{\theta}_k) & \hat{\Pi}_{22} \end{pmatrix}$,
 $\bar{\mathbf{a}}(\phi) \triangleq [\mathbf{1}, \mathbf{a}^T(\phi)]^T$,

其中 $\mathbf{B}(\theta) = \operatorname{diag}(\mathbf{a}_2(\theta), \mathbf{I}_M)$, $\hat{\Pi}_{ik}$ 是 $\hat{\Pi}$ 第 ik 个块元素,并且 $\bar{\mathbf{a}}(\theta, \phi) = \mathbf{B}(\theta)\bar{\mathbf{a}}(\phi)$ 。

[0048] 本发明的另一目的在于提供一种基于L型传感器阵列的信号方向估计与跟踪装置,包括L型传感器阵列,其中L型传感器阵列放置在x-z平面,具有两个相互垂直的均匀线阵,且每个均匀线阵沿直线以相同的间隔设置在不同空间位置上的M个全向的传感器,其特征在于所述装置还包括:

[0049] 线阵相关性计算模块,用于计算两列天线阵子所接收的所有数据之间的相关性;

[0050] 子阵相关性计算模块,用于计算一列均匀线阵所分割的两列子阵之间的所接收的数据的相关性以及其中一列子阵与另一天线阵列所接收的数据之间的相关性;

[0051] 扩展相关性矩阵计算模块,用于根据所述相关性来计算扩展相关性矩阵;

[0052] 仰角估计模块,用于利用所述扩展相关性矩阵,通过线性运算来估计仰角;

[0053] 方位角估计模块,用于子阵之间的相关性矩阵结合可行域估计方位角。

[0054] 本发明基于L型传感器阵列的二维方向估计方法,用于利用阵列天线估计波达方向,其中该阵列天线具有两个相互垂直的均匀线阵,且每个均匀线阵沿直线以相同的间隔设置在不同空间位置上的多个天线阵元,该新算法包括以下步骤:(1)计算估计的协方差矩阵;(2)估计出的协方差矩阵计算扩展的互协方差矩阵;(3)计算估计的正交投影;(4)分割z轴上的均匀线阵为两列不相重合的前向/后向子阵估计仰角;(5)利用估计的仰角联合考虑方位角和仰角的可行域估计方位角。

[0055] 方法中如果L阵放置在x-z平面,可以分割z轴上的均匀线阵估计仰角。如果L阵放置在x-z平面,也可以分割x轴上的均匀线阵估计仰角。方法中可以对时间和空间中

非相关加性噪声环境下的入射信号的二维方向估计。也可以对时间和空间中非相关无加性噪声环境下的入射信号的二维方向估计。可以对时间和空间中多个入射信号的二维波达方向估计,也可以对时间和空间中单一入射信号的二维波达方向估计。

[0056] 本发明提供一种基于 L 的二维方向估计方法。其中仰角可以通过对两个线阵的接受数据的互相关矩阵进行线性运算估计得到,所得到的仰角估计值用于后续的线性运算,从而估计出对应的方位角。因此,本方法可避免计算复杂度很高的特征值分解和参数配对过程,也克服了估计失败问题。

[0057] 为了解决在多入射信号情况下信号二维波达方向(DOA)估计中经常遇到的配对失败和估计失败的问题,本发明提出了一种计算量简单有效的基于 L 型阵列的二维 DOA 估计方法。该方法能够提供自动配对的信号方位角和仰角估计值,其中 L 型传感器阵列由两个均匀线阵(ULA)构成。分割其中一个均匀线阵为两列不重叠的前向/后向子阵,仰角可以通过对两个线阵的接受数据的互相关矩阵进行线性运算估计得到,所得到的仰角估计值用于后续的线性运算,从而估计出对应的方位角。因此,本方法可避免计算复杂度很高的特征值分解和参数配对过程,也克服了估计失败问题。

[0058] 相对于现有技术中的方案,本发明的优点是:

[0059] 本方法可避免计算复杂度很高的特征值分解和参数配对过程;由于避免了配对过程,因此克服了配对失败的问题。本方法可用于在线实时跟踪过程。

[0060] 本发明是针对 L 阵列的多窄带不相关信号二维 DOA 估计和配对失败问题提出的一种新的计算高效的利用自配对的二维方向估计算法。本发明与现有二维 DOA 估计技术的不同在于通过分割 z 轴上的均匀线阵为两列不相重合的前向/后向子阵,仰角可以通过线性操作的一维子空间的方法利用两列均匀线阵接收到的数据的所有互协方差进行估计。然后,利用估计的仰角联合考虑方位角和仰角的可行域,对应的方位角可以由 z 轴上的两列子阵以及其中一列子阵和 x 轴上的均匀线阵之间的互协方差通过类似的线性操作估计得到。因此,比较先前提出的无需特征分解的基于二维 DOA 估计方法的互协方差,本方法的优势在于避免了配对过程并且克服了配对失败。

附图说明

[0061] 下面结合附图及实施例对本发明作进一步描述:

[0062] 图 1 为本发明实施例的二维方向估计方法的 L 型传感器阵列的几何结构图。

[0063] 图 2 为本发明实施例的仰角 θ_k 和方位角 ϕ_k 的可行域(a)以及仰角 θ_k 和方位角投影 $\bar{\phi}_k$ 的可行域(b)

[0064] 图 3 表示本发明基于 L 型传感器阵列的信号方位角和仰角联合估计方法的方法流程图。

具体实施方式

[0065] 以下结合具体实施例对上述方案做进一步说明。应理解,这些实施例是用于说明本发明而并不限于限制本发明的范围。实施例中采用的实施条件可以根据具体厂家的条件做进一步调整,未注明的实施条件通常为常规实验中的条件。

[0066] 实施例

[0067] 下面具体描述根据本发明实施例的联合方位角和仰角的波达方向估计。

[0068] 如图 1 所示, L 型传感器阵列放置在 x - z 平面, 并由两列均匀线阵组成, 每列均匀线阵包含 M 个全向的传感器, 间距为 d , 在坐标系原点 z_0 处的传感器作为每列均匀线阵的参考, z_0 和 x_1 传感器间距也是 d 。假设 p 个不相干的远场窄带信号 $\{s_k(n)\}$, 波长 λ , 从不同的仰角和方位角 $\{\theta_k, \phi_k\}$ 入射到阵列上。如图 1 所示, 仰角 θ_k 和方位角 ϕ_k 相对于 z 轴或者 x 轴顺时针测量, 方位角投影 $\bar{\phi}_k$ 在 x - y 平面内相对于 x 轴逆时针测量。这里 $0^\circ \leq \theta_k \leq 180^\circ$, $0^\circ \leq \phi_k \leq 180^\circ$, $0^\circ \leq \bar{\phi}_k \leq 180^\circ$ 。两列均匀线阵接收到的信号可表示为:

$$[0069] \quad z(n) = A(\theta)s(n) + w_z(n) \quad (1);$$

$$[0070] \quad x(n) = A(\phi)s(n) + w_x(n) \quad (2);$$

[0071] 这里 $z(n) \triangleq [z_0(n), z_1(n), \dots, z_{M-1}(n)]^T$, $x(n) \triangleq [x_1(n), x_2(n), \dots, x_M(n)]^T$, $w_z(n) \triangleq [w_{z_0}(n), w_{z_1}(n), \dots, w_{z_{M-1}}(n)]^T$, $w_x(n) \triangleq [w_{x_1}(n), w_{x_2}(n), \dots, w_{x_M}(n)]^T$, $s(n) \triangleq [s_1(n), s_2(n), \dots, s_p(n)]^T$, $A(\theta) \triangleq [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_p)]$, $a(\theta_k) \triangleq [1, e^{j\alpha_k}, \dots, e^{j(M-1)\alpha_k}]^T$, $A(\phi) \triangleq [a(\phi_1), a(\phi_2), \dots, a(\phi_p)]$, $a(\phi_k) \triangleq [e^{j\beta_k}, e^{j2\beta_k}, \dots, e^{jM\beta_k}]^T$, $\alpha_k \triangleq 2\pi d \cos \theta_k / \lambda$, $\beta_k \triangleq 2\pi d \cos \phi_k / \lambda$ 。

[0072] 根据数据模型提出以下基本假设:

[0073] 假设 1) 阵列的响应矩阵的数学模型(如, $A(\theta)$, $A(\phi)$) 已知, 传感器间距 d 满足 $0 < d < \lambda/2$ 避免角度奇异。

[0074] 假设 2) 为了促进理论性能分析, 入射信号 $\{s_k(n)\}$ 为时域白高斯随机过程, 具有零均值, 其方差给定为 $E\{s_k(n)s_k^*(t)\} = r_{s_k} \delta_{n,t}$, $E\{s_k(n)s_k(t)\} = 0 \quad \forall n, t$ 。

[0075] 假设 3) 加性噪声 $\{w_z(n)\}$ 和 $\{w_x(n)\}$ 为时域-空域白高斯随机过程, 具有零均值, 其协方差矩阵为 $E\{w_z(n)w_z^H(t)\} = E\{w_x(n)w_x^H(t)\} = \sigma^2 \mathbf{I}_M \delta_{n,t}$, $E\{w_z(n)w_x^T(t)\} = E\{w_x(n)w_z^T(t)\} = \mathbf{O}_{M \times M}$, $\forall n, t$, 并且他们具有互相统计独立性, 例如, $E\{w_x(n)w_z^H(t)\} = \mathbf{O}_{M \times M}$ 。

[0076] 假设 4) 在两列均匀线阵上加性噪声与入射信号 $\{s_k(n)\}$ 互相统计独立。

[0077] 假设 5) 入射信号个数 p 已知或者可由一些检测技术提前估计得到, 并且满足不等式 $p < M$ 。

[0078] 由关系 $\cos \phi_k = \cos \bar{\phi}_k \sin \theta_k$, 我们可以得到 θ_k 和 ϕ_k 的可行域以及 θ_k 和 $\bar{\phi}_k$ 的可行域如图 2 (a) 和 (b) 所示, 参数 θ_k 和 ϕ_k 限制在该几何区域内:

$$[0079] \quad -\theta_k + 90^\circ \leq \phi_k \leq \theta_k + 90^\circ, \text{ 其中 } 0^\circ \leq \theta_k \leq 90^\circ;$$

$$[0080] \quad \theta_k - 90^\circ \leq \phi_k \leq -\theta_k + 270^\circ, \text{ 其中 } 90^\circ \leq \theta_k \leq 180^\circ \quad (3)。$$

[0081] 传统的一维基于子空间需要特征分解的方向估计方法以及一维基于子空间不需要特征分解的方向估计方法可以应用到每一列 ULA 上分别得到可信的仰角和方位角。但是, 关于 ϕ_k 和 θ_k 的估计值 $\{\hat{\phi}_k\}$ 和 $\{\hat{\theta}_k\}$ 共有 $p!$ 多种可能的组合, 当入射信号个数增多时带来了繁重的计算量。因此, 二维方向估计的关键是将独立估计的仰角和方位角进行配对。除了该方法, 大多数已存在的配对方法或者自配对都涉及到计算繁重的特征分解过程。即使配对成功, 分开估计方位角和仰角可能造成估计的 $\hat{\phi}_k$ 和 $\hat{\theta}_k$ 落在可行域之外, 见图 2 (a), 或者等价的我们有 $|\cos \hat{\phi}_k / \sin \hat{\theta}_k| > 1$ 且 $\sin \hat{\theta}_k \neq 0$, 显然, 传统的方位角和仰角的估计不能保证关系 $\bar{\phi}_k = \arccos(\cos \hat{\phi}_k / \sin \hat{\theta}_k)$, 因此, 在这种条件下会出现估计失败的情况。目前为止, 估计

失败在 L 型阵列上还没有得以解决。因此为了解决上述配对和估计失败的问题,本发明提出了一种联合方位角和仰角的 DOA 估计方法,该方法不需要特征分解过程和配对过程。

[0082] 对仰角的估计

[0083] 在 A5 假设的基础上,我们可以将沿 z 轴的均匀线阵分割为两个不相重叠的前向子阵列,分别包括 p 个传感器和 M-p 个传感器,(1) 式中的 $z(n)$ 可以写成:

$$[0084] \quad \mathbf{z}(n) = [\bar{\mathbf{z}}_1^T(n), \bar{\mathbf{z}}_2^T(n)]^T = [\mathbf{A}_1^T(\theta), \mathbf{A}_2^T(\theta)]^T \mathbf{s}(n) + [\bar{\mathbf{w}}_{z_1}^T(n), \bar{\mathbf{w}}_{z_2}^T(n)]^T \quad (4);$$

[0085] 这里 $\bar{\mathbf{z}}_1(n) \triangleq [z_0(n), z_1(n), \dots, z_{p-1}(n)]^T$, $\bar{\mathbf{z}}_2(n) \triangleq [z_p(n), z_{p+1}(n), \dots, z_{M-1}(n)]^T$, $\bar{\mathbf{w}}_{z_1}(n) \triangleq [w_{z_0}(n), w_{z_1}(n), \dots, w_{z_{p-1}}(n)]^T$, $\bar{\mathbf{w}}_{z_2}(n) \triangleq [w_{z_p}(n), w_{z_{p+1}}(n), \dots, w_{z_{M-1}}(n)]^T$ 。(1) 式中的 $\Lambda(\theta)$ 分割成两个子矩阵 $\Lambda_1(\theta)$ 和 $\Lambda_2(\theta)$, 其列向量为 $\mathbf{a}_1(\theta_k) \triangleq [1, e^{j\alpha_k}, \dots, e^{j(p-1)\alpha_k}]^T$ 和 $\mathbf{a}_2(\theta_k) \triangleq [e^{j(p)\alpha_k}, e^{j(p+1)\alpha_k}, \dots, e^{j(M-1)\alpha_k}]^T$ 。在数据模型的假设之下,由(2)式和(4)式可以得到 x 轴和 z 轴上两列均匀线阵接收到的信号的协方差矩阵 \mathbf{R}_{zx} , 可表示为:

$$[0086] \quad \mathbf{R}_{zx} \triangleq E\{\mathbf{z}(n)\mathbf{x}^H(n)\} = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H(\phi) = [\mathbf{R}_{z_1x}^T, \mathbf{R}_{z_2x}^T]^T \quad (5);$$

[0087] 这里 \mathbf{R}_s 为信号协方差矩阵, 定义为 $\mathbf{R}_s \triangleq E\{\mathbf{s}(n)\mathbf{s}^H(n)\}$, $\mathbf{R}_{z_1x} \triangleq E\{\bar{\mathbf{z}}_1(n)\mathbf{x}^H(n)\} = \mathbf{A}_1(\theta)\mathbf{R}_s\mathbf{A}_1^H(\phi)$, $\mathbf{R}_{z_2x} \triangleq E\{\bar{\mathbf{z}}_2(n)\mathbf{x}^H(n)\} = \mathbf{A}_2(\theta)\mathbf{R}_s\mathbf{A}_2^H(\phi)$ 。

[0088] 相似的, 分割同一列均匀线阵为两列不相重叠的后向子阵列分别由 p 个阵元和 M-p 个阵元组成, 可以表示这列均匀线阵的联合噪声信号向量 $\tilde{\mathbf{z}}(n)$ 为:

$$[0089] \quad \tilde{\mathbf{z}}(n) \triangleq [\tilde{\mathbf{z}}_1^T(n), \tilde{\mathbf{z}}_2^T(n)]^T = \mathbf{J}_M \mathbf{z}^*(n) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{D}^{-(M-1)}(\theta)\mathbf{s}^*(n) + \tilde{\mathbf{w}}_z(n) \quad (6);$$

[0090] 其中, $\tilde{\mathbf{z}}_1(n) \triangleq [z_{M-1}(n), z_{M-2}(n), \dots, z_{M-p}(n)]^H$, $\tilde{\mathbf{z}}_2(n) \triangleq [z_{M-p-1}(n), \dots, z_2(n), z_1(n)]^H$, $\tilde{\mathbf{w}}_z(n) \triangleq [w_{z_{M-1}}(n), \dots, w_{z_1}(n), w_{z_0}(n)]^H$, $\mathbf{D}(\theta) \triangleq \text{diag}(e^{j\alpha_1}, e^{j\alpha_2}, \dots, e^{j\alpha_p})$ 。我们可以得到另一个协方差矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}_{zx}$:

$$[0091] \quad \tilde{\mathbf{R}}_{zx} \triangleq E\{\tilde{\mathbf{z}}(n)\mathbf{x}^T(n)\} = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{D}^{-(M-1)}(\theta)\mathbf{R}_s^*\mathbf{A}^T(\phi) = \mathbf{J}_M \mathbf{R}_{zx}^T = [\tilde{\mathbf{R}}_{z_1x}^T, \tilde{\mathbf{R}}_{z_2x}^T]^T \quad (7);$$

[0092] 这里 $\tilde{\mathbf{R}}_{z_1x}^T \triangleq E\{\tilde{\mathbf{z}}_1(n)\mathbf{x}^T(n)\} = \mathbf{A}_1(\theta)\mathbf{D}^{-(M-1)}(\theta)\mathbf{R}_s^*\mathbf{A}_1^T(\phi)$, $\tilde{\mathbf{R}}_{z_2x}^T \triangleq E\{\tilde{\mathbf{z}}_2(n)\mathbf{x}^T(n)\} = \mathbf{A}_2(\theta)\mathbf{D}^{-(M-1)}(\theta)\mathbf{R}_s^*\mathbf{A}_2^T(\phi)$ 。明显, 这些矩阵不受加性噪声的影响。

[0093] 从(5)式和(7)式可以得到 $M \times 2M$ 扩展协方差矩阵 \mathbf{R}_z :

$$[0094] \quad \mathbf{R}_z \triangleq [\mathbf{R}_{zx}, \tilde{\mathbf{R}}_{zx}] = \mathbf{A}(\theta)[\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H(\phi), \mathbf{D}^{-(M-1)}(\theta)\mathbf{R}_s^*\mathbf{A}^T(\phi)] \triangleq [\mathbf{R}_{z_1}^T, \mathbf{R}_{z_2}^T]^T \quad (8);$$

[0095] 在假设 1 和假设 5 的条件下, 因为 $\Lambda(\theta)$ 为范德蒙阵且满秩, 我们可以得到 $\Lambda_1(\theta)$ 满秩, $\Lambda_2(\theta)$ 的行向量可以表示为 $\Lambda_1(\theta)$ 独立行的线性组合; 等价的, 可以得到 $\Lambda_1(\theta)$ 和 $\Lambda_2(\theta)$ 之间 $p \times (M-p)$ 维线性算子 \mathbf{P}_z , 即 $\mathbf{A}_2(\theta) = \mathbf{P}_z^H \mathbf{A}_1(\theta)$ 。那么, \mathbf{P}_z 可以由(8)式中的 \mathbf{R}_{z_1} , \mathbf{R}_{z_2} 得到:

$$[0096] \quad \mathbf{P}_z = \mathbf{A}_1^{-H}(\theta)\mathbf{A}_2^H(\theta) = (\mathbf{R}_{z_1}\mathbf{R}_{z_1}^H)^{-1}\mathbf{R}_{z_1}\mathbf{R}_{z_2}^H \quad (9);$$

[0097] 进一步定义矩阵 $\mathbf{Q}_z \triangleq [\mathbf{P}_z^T, -\mathbf{I}_{M-p}]^T$, 我们可以得到:

$$[0098] \quad \mathbf{Q}_z^H \mathbf{A}(\theta) = \mathbf{O}_{(M-p) \times p} \quad (10);$$

[0099] 由于 $M \times (M-p)$ 维矩阵 \mathbf{Q}_z 列满秩, 秩为 $M-p$, \mathbf{Q}_z 的列向量事实上构成了 $\Lambda(\theta)$ 的零空间 $\mathcal{N}(\mathbf{A}^H(\theta))$, 明显向由 $\Lambda(\theta)$ 的列向量张成的子空间的投影可以写为

$$\Pi_z \triangleq Q_z(Q_z^H Q_z)^{-1} Q_z^H;$$

[0100] $\Pi_z a(\theta) = 0_{m \times 1}$, $\theta = \theta_k$ (11);

[0101] 这里 $a(\theta) \triangleq [1, e^{j\alpha}, \dots, e^{j(M-1)\alpha}]^T$, $0_{m \times 1}$ 为 $m \times 1$ 维零向量, 明显(11)式的正交性质可以用于估计仰角 $\{\theta_k\}_{k=1}^p$ 。

[0102] 利用(11)式的正交性质, 当快拍数有限时, 仰角 $\{\theta_k\}_{k=1}^p$ 可以通过最小化下面的消耗函数 $f(\theta)$ 估计得到:

$$[0103] \quad \hat{\theta}_k = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} f(\theta) \triangleq \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} a^H(\theta) \hat{\Pi}_z a(\theta) \quad (12);$$

[0104] 这里:

$$[0105] \quad \hat{\Pi}_z = \hat{Q}_z(\hat{Q}_z^H \hat{Q}_z)^{-1} \hat{Q}_z^H = \hat{Q}_z(I_{M-p} - \hat{P}_z^H(\hat{P}_z \hat{P}_z^H + I_p)^{-1} \hat{P}_z) \hat{Q}_z^H \quad (13);$$

$$[0106] \quad \hat{P}_z = (\hat{R}_{z1} \hat{R}_{z1}^H)^{-1} \hat{R}_{z1} \hat{R}_{z2}^H \quad (14);$$

[0107] 这里 $\hat{\Pi}_z$ 可利用矩阵求逆引理求得, 并且与矩阵 \hat{Q}_z 正交的性质可用于 $\hat{\Pi}_z$ 提高估计的性能。

[0108] 通过自配对估计方位角

[0109] 在数据模型的假设之下, 由(2)式(4)式, 我们可以建立一个 $(2M-p) \times 1$ 维的连接信号向量由 x 轴上的均匀线阵和 z 轴上的子阵 $\bar{z}_2(n)$ 所接收:

$$[0110] \quad \bar{y}(n) \triangleq [\bar{z}_2^T(n), x^T(n)]^T = \bar{A}(\theta, \phi) s(n) + \bar{w}_y(n) \quad (15);$$

[0111] 这里 $\bar{A}(\theta, \phi) \triangleq [A_z^T(\theta), A_x^T(\phi)]$, 其列向量 $\bar{a}(\theta_k, \phi_k) \triangleq [a_z^T(\theta_k), a_x^T(\phi_k)]^T$, $\bar{w}_y(n) \triangleq [\bar{w}_{z2}^T(n), w_x^T(n)]^T$ 。那么, 从(4)和(15)式, 我们可以很容易的得到数据阵列 $\bar{y}(n)$ 和 z 轴子阵列 $\bar{z}_2(n)$ 的 $(2M-p) \times p$ 维互协方差矩阵 \bar{R} :

$$[0112] \quad \bar{R} \triangleq E\{\bar{y}(n) \bar{z}_2^H(n)\} = \bar{A}(\theta, \phi) R_s A^H(\theta) = [\bar{R}_{z2z1}^T, R_{z1x}^*]^T \quad (16);$$

[0113] 这里 $\bar{R}_{z2z1}^T \triangleq E\{\bar{z}_2(n) \bar{z}_2^H(n)\} = A_z(\theta) R_s A_z^H(\theta)$ 。明显, \bar{R} 不受两均匀线阵上加性噪声的影响。在基本假设之下, 可以很容易的发现矩阵 R_x 和 $A_1(\theta)$ 非奇异并且矩阵 $\bar{A}(\theta, \phi)$ 列满秩为 p , 根据(16)式 $\bar{A}(\theta, \phi)$ 和 \bar{R} 有相同的空间范围, 例如 $\mathcal{R}(\bar{R}) = \mathcal{R}(\bar{A}(\theta, \phi))$, 等价的:

$$[0114] \quad \bar{\Pi} \bar{a}(\theta, \phi) = 0_{(2M-p) \times 1} \quad \theta = \theta_k \text{ 且 } \phi = \phi_k \quad (17);$$

[0115] 这里 $k = 1, 2, \dots, p$, 在零空间 $\mathcal{N}(\bar{R})$ 上的投影 $\bar{\Pi}$ (或 $\mathcal{N}(\bar{A}(\theta, \phi))$) 可表示为:

$$[0116] \quad \bar{\Pi} \triangleq I_{2M-p} - \bar{R}(\bar{R}^H \bar{R})^{-1} \bar{R}^H \quad (18);$$

[0117] 这里, 当有限的阵列数据可变时, 从(17)式可以估计仰角、方位角 $\{\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k\}$:

$$[0118] \quad \{\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k\} = \underset{\theta, \phi}{\operatorname{argmin}} f(\theta, \phi) \triangleq \underset{\theta, \phi}{\operatorname{argmin}} \bar{a}^H(\theta, \phi) \bar{\Pi} \bar{a}(\theta, \phi)$$

[0119]

$$s.t. \begin{cases} -\theta_k + 90^\circ \leq \phi_k \leq \theta_k + 90^\circ & 0^\circ \leq \theta_k \leq 90^\circ \\ \theta_k - 90^\circ \leq \phi_k \leq -\theta_k + 270^\circ & 90^\circ \leq \theta_k \leq 180^\circ \end{cases} \quad (19);$$

[0120] 将(12)式估计的仰角 $\hat{\theta}_k$ 代入(19)式 $\bar{a}(\theta, \phi)$, 方位角可以估计为:

$$[0121] \quad \hat{\phi}_k = \underset{\phi}{\operatorname{argmin}} f_k(\phi) \triangleq \underset{\phi}{\operatorname{argmin}} \bar{a}^H(\phi) \Gamma(\hat{\theta}_k) \bar{a}(\phi)$$

[0122]

$$s.t. \begin{cases} -\hat{\theta}_k + 90^\circ \leq \hat{\phi}_k \leq \hat{\theta}_k + 90^\circ & 0^\circ \leq \hat{\theta}_k \leq 90^\circ \\ \hat{\theta}_k - 90^\circ \leq \hat{\phi}_k \leq -\hat{\theta}_k + 270^\circ & 90^\circ \leq \hat{\theta}_k \leq 180^\circ \end{cases} \quad (20);$$

[0123] 这里 $\bar{\mathbf{a}}(\phi) \triangleq [\mathbf{1}, \mathbf{a}^T(\phi)]^T$, 且:

$$[0124] \quad \Gamma(\hat{\theta}_k) \triangleq \mathbf{B}^H(\hat{\theta}_k) \hat{\mathbf{\Pi}} \mathbf{B}(\hat{\theta}_k) = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_2^H(\hat{\theta}_k) \hat{\mathbf{\Pi}}_{11} \mathbf{a}_2(\hat{\theta}_k) & \mathbf{a}_2^H(\hat{\theta}_k) \hat{\mathbf{\Pi}}_{12} \\ \hat{\mathbf{\Pi}}_{21} \mathbf{a}_2(\hat{\theta}_k) & \hat{\mathbf{\Pi}}_{22} \end{pmatrix} \quad (21);$$

[0125] 这里 $\mathbf{B}(\theta) = \text{diag}(\mathbf{a}_2(\theta), \mathbf{I}_M)$, $\hat{\mathbf{\Pi}}_{ik}$ 是 $\hat{\mathbf{\Pi}}$ 第 ik 个块元素, 并且利用了 $\bar{\mathbf{a}}(\theta, \phi) = \mathbf{B}(\theta) \bar{\mathbf{a}}(\phi)$ 。显然, 估计的仰角 $\hat{\theta}_k$ 与估计的方位角 $\hat{\phi}_k$ 是自动成对的, 从而避免了配对失败。

[0126] 说明: 将式(16)带入式(18), 矩阵 $\bar{\mathbf{R}}$ 的正交投影矩阵 $\bar{\mathbf{\Pi}}$ 可以重新表达如下:

$$[0127] \quad \bar{\mathbf{\Pi}} = \mathbf{I}_{2M-p} - \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi) (\bar{\mathbf{A}}^H(\theta, \phi) \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi))^{-1} \bar{\mathbf{A}}^H(\theta, \phi);$$

[0128] 这里第 ik 个子块定义为:

$$[0129] \quad \bar{\mathbf{\Pi}}_{11} \triangleq \mathbf{I}_{M-p} - \mathbf{A}_2(\theta) (\bar{\mathbf{A}}^H(\theta, \phi) \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi))^{-1} \mathbf{A}_2^H(\theta) \quad (22);$$

$$[0130] \quad \bar{\mathbf{\Pi}}_{12} \triangleq -\mathbf{A}_2(\theta) (\bar{\mathbf{A}}^H(\theta, \phi) \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi))^{-1} \mathbf{A}^H(\theta) \quad (23);$$

$$[0131] \quad \bar{\mathbf{\Pi}}_{21} \triangleq -\mathbf{A}(\phi) (\bar{\mathbf{A}}^H(\theta, \phi) \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi))^{-1} \mathbf{A}_2^H(\phi) \quad (24);$$

$$[0132] \quad \bar{\mathbf{\Pi}}_{22} \triangleq \mathbf{I}_M - \mathbf{A}(\phi) (\bar{\mathbf{A}}^H(\theta, \phi) \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi))^{-1} \mathbf{A}^H(\phi)。$$

[0133] 说明: 将式(16)带入式(18), 矩阵 $\bar{\mathbf{R}}$ 的正交投影矩阵 $\bar{\mathbf{\Pi}}$ 可以重新表达如下:

$$[0134] \quad \bar{\mathbf{\Pi}} = \mathbf{I}_{2M-p} - \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi) (\bar{\mathbf{A}}^H(\theta, \phi) \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi))^{-1} \bar{\mathbf{A}}^H(\theta, \phi);$$

[0135] 这里第 ik 个子块定义为:

$$[0136] \quad \bar{\mathbf{\Pi}}_{11} \triangleq \mathbf{I}_{M-p} - \mathbf{A}_2(\theta) (\bar{\mathbf{A}}^H(\theta, \phi) \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi))^{-1} \mathbf{A}_2^H(\theta) \quad (22);$$

$$[0137] \quad \bar{\mathbf{\Pi}}_{12} \triangleq -\mathbf{A}_2(\theta) (\bar{\mathbf{A}}^H(\theta, \phi) \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi))^{-1} \mathbf{A}^H(\theta) \quad (23);$$

$$[0138] \quad \bar{\mathbf{\Pi}}_{21} \triangleq -\mathbf{A}(\phi) (\bar{\mathbf{A}}^H(\theta, \phi) \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi))^{-1} \mathbf{A}_2^H(\phi) \quad (24);$$

$$[0139] \quad \bar{\mathbf{\Pi}}_{22} \triangleq \mathbf{I}_M - \mathbf{A}(\phi) (\bar{\mathbf{A}}^H(\theta, \phi) \bar{\mathbf{A}}(\theta, \phi))^{-1} \mathbf{A}^H(\phi) \quad (25)。$$

[0140] 本发明得到一种基于 L 型传感器阵列的信号方位角和仰角联合估计方法, 本方法不需要计算耗时的特征值分解过程以及参数配对过程, 因此, 本方法可以解决现有技术中二维波达方向估计的计算复杂度大以及经常不能提供正确的配对结果的问题, 从而本方法可以应用于实时环境中的二维信号波达方向跟踪。

[0141] 上述实例只为说明本发明的技术构思及特点, 其目的在于让熟悉此项技术的人是能够了解本发明的内容并据以实施, 并不能以此限制本发明的保护范围。凡根据本发明精神实质所做的等效变换或修饰, 都应涵盖在本发明的保护范围之内。

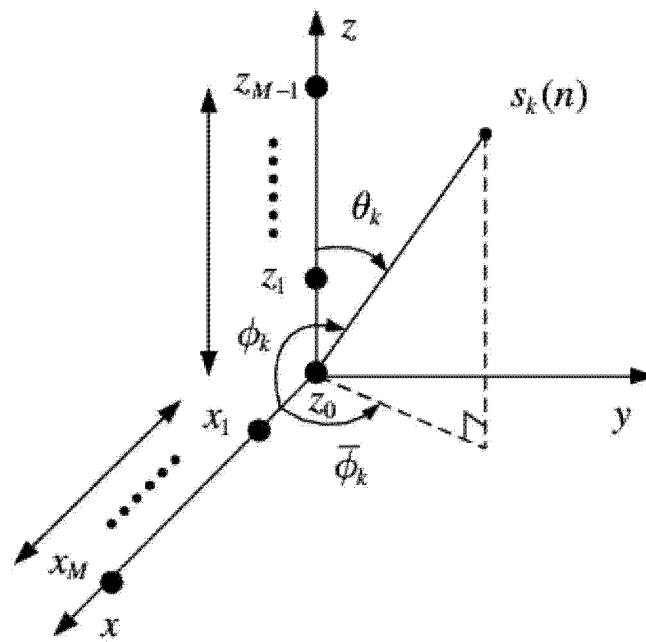


图 1

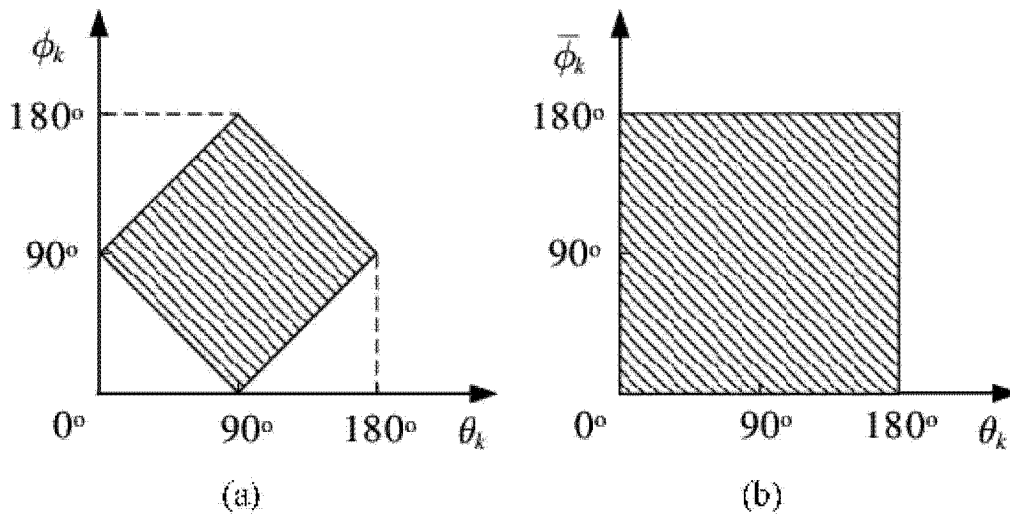


图 2

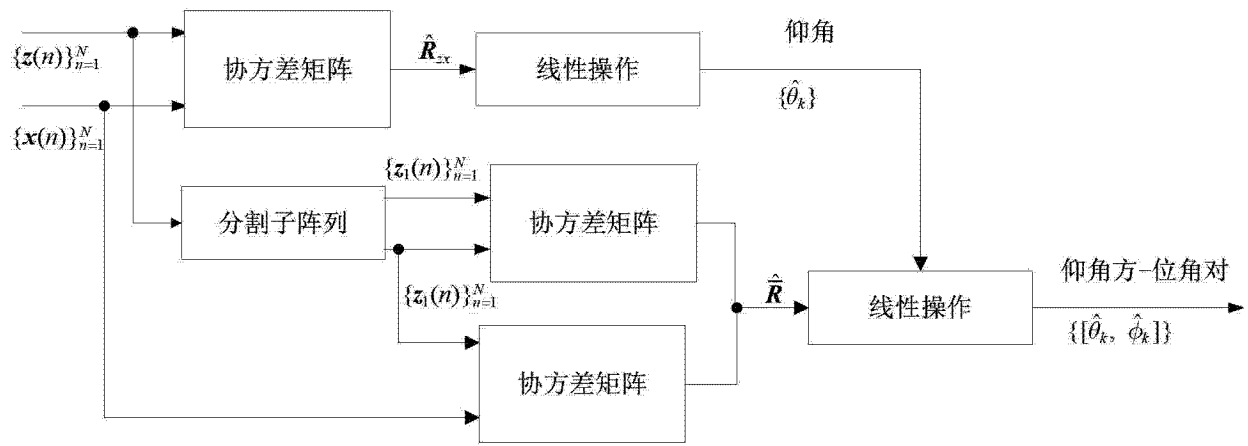


图 3