

基于均匀圆阵的宽频段二维零点预处理 MUSIC 算法¹

何明浩 * ** 李膺东 ** 张贤达 *

*(清华大学自动化系 北京 100084)

** (空军雷达学院微波工程系 武汉 430010)

摘 要 该文基于多圈均匀圆阵 (UCA), 在 UCA-RB-MUSIC 算法 (Mathews 等, 1994) 和一维零点预处理算法 (魏平等, 1996) 的基础上, 提出了一种可任意设置响应零点的宽频段二维 MUSIC 算法。计算机仿真表明, 该方法在保持了 UCA-RB-MUSIC 算法的高精度、高分辨力和降低了运算量的前提下, 在宽频段内对于空间干扰信号的抑制有较好的效果。

关键词 均匀圆阵, 宽频段, 波束形成器, 预处理, 波束函数

中图分类号 TN911.72

1 引言

UCA-RB-MUSIC 算法中^[1]构造了一个实值波束形成器, 对阵列数据进行加权, 相当于将均匀圆阵 (UCA) 变换成虚拟线阵进行处理, 这种处理有几点好处^[2]:

(1) 信噪比分辨门限和误差不敏感性比阵元空间 UCA-MUSIC 算法低; (2) 可以运用空间平滑技术去相干; (3) 只需进行实值特征值分解即可得到噪声子空间, 运算量减小; (4) 便于实现并行处理。但是这种算法由于阵列结构的限制, 只能在较窄的频段内对信号进行处理。

当对信源方向有先验知识时 (如低角跟踪或干扰方向已知的情况下), 可以通过构造适当的预处理器提高后续超分辨算法的性能以及处理的灵活性。近年来预处理器的研究取得了较大的发展^[2-5]。例如采用傅氏变换进行预处理^[2]; 采用提高分辨力的预处理波束矩阵^[4]; 采用一维零点形成的预处理器^[3]。其中一维零点预处理算法^[3]有以下好处: (1) 预处理包含着空间维数的降低, 从而使运算量减小; (2) 获得可任意设置的响应零点, 可用于抑制空间信号。但是这种预处理只适用于一维情况。

本文在以上两种方法的基础上提出了基于多圈 UCA 的宽频段二维零点预处理 MUSIC 算法。该方法在保持了 UCA-RB-MUSIC 算法的高精度、高分辨力和降低了运算量的前提下, 在宽频段内对于空间干扰信号的抑制有较好的效果。计算机仿真表明了该算法的有效性。

2 信号模型

为便于讨论, 考虑由两圈 UCA 构成的阵列, 内圈半径为 r_1 , 外圈半径为 r_2 , 阵元数分别为 N_1 , N_2 , 圆阵的阵列几何结构见图 1。假设远场有 d 个彼此独立的中心频率均为 f_c , 方位角为 θ_i 和俯仰角为 ϕ_i 的窄带信号入射到阵列上, 其中 $i = 1, 2, \dots, d$ 。设阵元输出噪声为相互独立且与信号不相关的零均值高斯白噪声, 方差为 σ^2 。阵列输出信号矢量为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (1)$$

¹ 2001-05-24 收到, 2001-11-29 定稿
空军拔尖人才基金资助

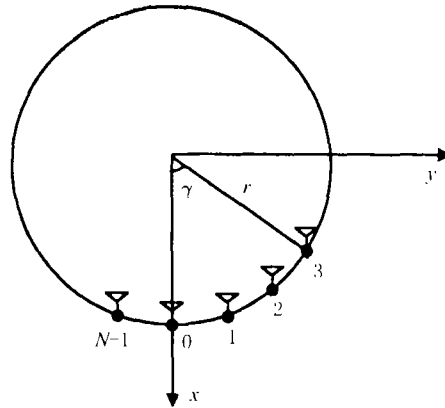


图 1 均匀圆阵列几何关系

其中

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_{N_1+N_2}(t)]^T$$

$$\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_d(t)]^T$$

$$\mathbf{N}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_{N_1+N_2}(t)]^T$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(f_c, \theta_1, \phi_1), \mathbf{a}(f_c, \theta_2, \phi_2), \dots, \mathbf{a}(f_c, \theta_d, \phi_d)]$$

$$\mathbf{a}(f_c, \theta, \phi) = [e^{-j2\pi f_c \gamma_1}, \dots, e^{-j2\pi f_c \gamma_{N_1}}, e^{-j2\pi f_c \gamma_{N_1+1}}, \dots, e^{-j2\pi f_c \gamma_{N_1+N_2}}]^T$$

$$\gamma_i = r_1 \cos(\theta - 2\pi i/N_1) \sin \phi/c, i = 1, \dots, N_1$$

$$\gamma_i = r_2 \cos(\theta - 2\pi i/N_2) \sin \phi/c, i = N_1 + 1, \dots, N_2$$

其中 c 为电磁波传播速度; T 为矩阵转置。

3 实值波束形成器

令 α 为阵元在极坐标中的极角, $\xi = 2\pi r \sin \phi/\lambda$, r 为阵列半径。考虑单圈连续圆阵, 空中辐射源的波前在阵列上产生的激励函数 $\omega(\alpha)$ 是一个以 2π 为周期的周期函数, 可以分解为 Fourier 级数 $\omega(\alpha) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m e^{jm\alpha}$ 。对于其中每个分量 $\omega_m(\alpha)$, 阵列响应分量 (方向图分量) 为 $f_m^c(\theta, \xi) = j^m J_m(\xi) e^{jm\theta}$, 其中 $J_m(\xi)$ 为 m 阶 Bessel 函数, 每个阵列响应分量称为一个相位模式。对应于 $\phi \in [0, \pi/2]$, $\xi \in [0, 2\pi r/\lambda]$ 称为可见区域, 由于 $m > \xi$ 时 $J_m(\xi)$ 在可见区域内可以忽略, 能激发的最大相位模式数为 $M \approx 2\pi r/\lambda$ 。

考虑前述的两圈 UCA, 对激励分量 $\omega_m(\alpha)$ 在阵元位置上做空间离散采样得到离散激励序列:

$$\mathbf{w}_m^H = \frac{1}{N_1 + N_2} [1, e^{j2\pi m/N_1}, \dots, e^{j2\pi m(N_1-1)/N_1}, 1, e^{j2\pi m/N_2}, \dots, e^{j2\pi m(N_2-1)/N_2}]$$

对应的阵列响应分量为 $f_m^s(\theta, \xi) = j^m J_m(\xi) e^{jm\theta} + R(\theta, \xi)$, 其中 $R(\theta, \xi)$ 为余项, 当阵元数满足 $N_1 + N_2 > 2M$ 时余项可以忽略, 阵列响应能较好地逼近连续圆阵。如果把 M 定义为空间频率, 则此条件与时域信号处理中的 Nyquist 采样定理一致。

在相位模式概念的基础上构造的实值波束形成器为

$$\mathbf{F}_r^H = \mathbf{W}^H \mathbf{C}_v \mathbf{V}^H \quad (2)$$

其中 $\mathbf{W} = \frac{1}{\sqrt{(2M+1)}}[\mathbf{v}(\alpha_{-M}) \cdots \mathbf{v}(\alpha_0) \cdots \mathbf{v}(\alpha_M)]$, $\mathbf{C}_v = \text{diag}\{j^{-M}, \dots, j^{-1}, j^0, j^{-1}, \dots, j^{-M}\}$, $\mathbf{V} = \sqrt{(N_1 + N_2)}[\mathbf{w}_{-M} \cdots \mathbf{w}_0 \cdots \mathbf{w}_M]$, $\mathbf{v}(\phi) = [e^{-jM\phi}, \dots, e^{-j\phi}, e^0, e^{j\phi}, \dots, e^{jM\phi}]^T$, $M = 2\pi r_2 f_c / c$.

4 波束空间零点预处理器

设预处理后阵列等效响应在 (θ_i, ϕ_i) , $i = 1, 2, \dots, K$ 方向有 K 个零点, 即满足

$$\mathbf{W}^H \mathbf{A}_{\theta, \phi} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

其中 $\mathbf{A}_{\theta, \phi} = [\mathbf{a}(f_c, \theta_1, \phi_1), \mathbf{a}(f_c, \theta_2, \phi_2), \dots, \mathbf{a}(f_c, \theta_K, \phi_K)]$

为了获得 \mathbf{W}^H , 采取以下方法:

首先, 由于 $\mathbf{A}_{\theta, \phi} \in C^{(N_1+N_2) \times K}$, 可对 $\mathbf{A}_{\theta, \phi}$ 进行初等行变换得到

$$\mathbf{B}_{\theta, \phi} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{N_1+N_2-K} \\ \mathbf{L}_{\theta, \phi} \end{bmatrix}$$

其中 $\mathbf{L}_{\theta, \phi} \in C^{K \times K}$ 为初等行变换后所剩的非零矩阵块. 然后用高斯消去法求满足以下关系式的初等行变换矩阵 \mathbf{F} : $\mathbf{F} \mathbf{A}_{\theta, \phi} = \mathbf{B}_{\theta, \phi}$. 取 \mathbf{F} 的前 $(N_1 + N_2 - K)$ 行作为矩阵 \mathbf{F}_1^H , 则 \mathbf{F}_1 满足 (3) 式. 最后, 为避免产生空间相关噪声, \mathbf{W} 还应该满足正交条件:

$$\mathbf{W}^H \mathbf{W} = \mathbf{I} \quad (4)$$

所以对 \mathbf{F}_1 进行正交化得到矩阵 \mathbf{W} :

$$\mathbf{W} = \mathbf{F}_1 (\mathbf{F}_1^H \mathbf{F}_1)^{-1/2} \quad (5)$$

这样, 就根据所需的响应零点找到了预处理器 \mathbf{W} .

5 波束空间零点预处理 MUSIC 算法

经实值波束形成器变换后所得的 MUSIC 谱式为

$$S_b(\theta, \phi) = \frac{1}{\mathbf{b}^T(f_c, \theta, \phi) \mathbf{G} \mathbf{G}^T \mathbf{b}(f_c, \theta, \phi)} \quad (6)$$

其中 $\mathbf{b}(f_c, \theta, \phi) = \mathbf{F}_r^H \mathbf{a}(f_c, \theta, \phi)$, \mathbf{G} 为用 \mathbf{F}_r^H 对阵列输出信号矢量进行加权并对其进行特征值分解所得噪声子空间: $\mathbf{G} = [\mathbf{g}_{d+1}, \dots, \mathbf{g}'_M]$.

为了研究经过预处理后阵列的响应, 构造波束函数来表示阵列对于空间方向 (θ, ϕ) 的响应:

$$C(f_c, \theta, \phi) = \mathbf{a}^H(f_c, \theta, \phi) \mathbf{W} \mathbf{W}^H \mathbf{a}(f_c, \theta, \phi) \quad (7)$$

综上所述, 零点预处理 MUSIC 谱式为

$$S_c(\theta, \phi) = \frac{C(f_c, \theta_p, \phi_p)}{\mathbf{b}^T(f_c, \theta, \phi) \mathbf{G} \mathbf{G}^T \mathbf{b}(f_c, \theta, \phi)} \quad (8)$$

其中 $\theta_p = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K]$, $\phi_p = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_K]$.

6 仿 真

考虑两圈 UCA 构成的阵列, 内圈半径 1m, 阵元数为 12; 外圈半径 2m, 阵元数为 16; 时间采样频率取为 3GHz(满足 Nyquist 采样定理); 快拍数取为 128.

(1) 假设有 3 个中心频率均为 1200MHz 的窄带独立远场信号入射到阵列上, 方向分别为 $(30^\circ, 30^\circ)$ $(32^\circ, 28^\circ)$ $(28^\circ, 32^\circ)$, 对 $(30^\circ, 30^\circ)$ 的信号进行抑制, 未进行抑制时的谱和抑制后的谱如图 2 所示.

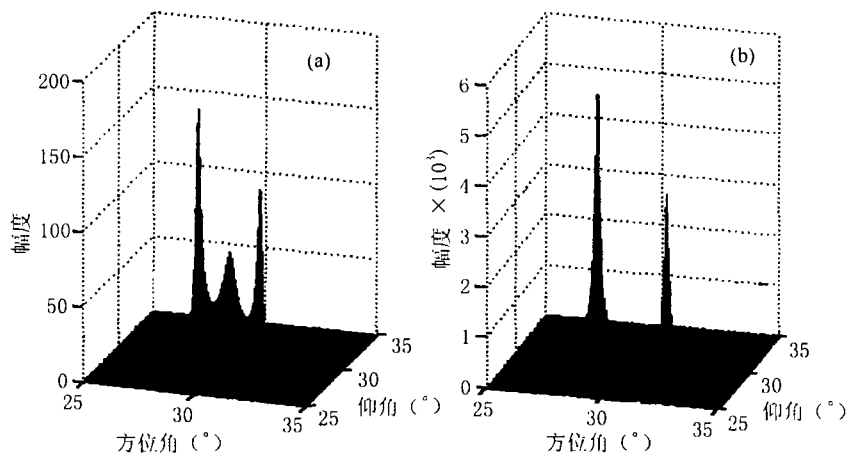


图 2 对 1200MHz 给定方向信号的抑制
(a) 未抑制时的谱图 (b) 抑制后的谱图

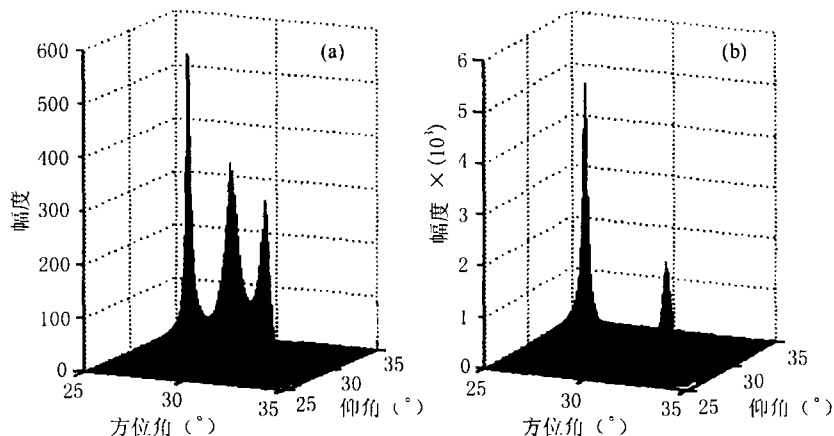


图 3 对 400MHz 给定方向信号的抑制
(a) 未抑制时的谱图 (b) 抑制后的谱图

(2) 假设有 3 个中心频率均为 400MHz 的窄带独立远场信号入射到阵列上, 方向分别为 $(30^\circ, 30^\circ)$ $(27^\circ, 33^\circ)$ $(34^\circ, 26^\circ)$, 对 $(30^\circ, 30^\circ)$ 的信号进行抑制, 未进行抑制时的谱和抑制后的谱如图 3 所示.

7 结 论

本文基于多圈 UCA, 在 UCA-RB-MUSIC 算法和一维零点预处理算法的基础上, 提出了一种可任意设置响应零点的宽频段二维 MUSIC 算法. 计算机仿真表明, 该方法在保持了 UCA-RB-MUSIC 算法的高精度、高分辨力和降低了运算量的前提下, 在宽频段内对于空间干扰信号的抑制有较好的效果.

参 考 文 献

- [1] C. P. Mathews, M. D. Zoltowski, Eigenstructure techniques for 2-D angle estimation with uniform circular arrays, IEEE Trans. on SP, 1994, 42(9), 2395-2407.
- [2] M. D. Zoltowski, G. M. Kautz, S. D. Silverstein, Beamspace root-MUSIC, IEEE Trans. on SP, 1993, 41(1), 344-364.
- [3] 魏平, 肖先赐, 任意设置空间零点的测向方法, 电子科技大学学报, 1996, 25(1), 6-10.
- [4] H. B. Lee, M. S. Wengrovitz, Resolution threshold of beamspace MUSIC for two closely spaced emitters, IEEE Trans ASSP, 1990, 38(9), 1545-1559.
- [5] A. J. Weiss, B. Friedlander, Preprocessing for direction-finding with minimal variance degradation IEEE Trans. on SP, 1994, 42(6), 1478-1485.

THE 2-D NULL PREPROCESSING MUSIC ALGORITHM FOR WIDE-BAND SIGNALS WITH UNIFORM CIRCULAR ARRAYS

He Minghao* ** Li Yingdong** Zhang Xianda*

*(Dept. of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

** (Dept. of Microwave Engineering, Wuhan Radar Academy, Wuhan 430010, China)

Abstract Based on UCA-RB-MUSIC algorithm(Mathews, *et al.*, 1994) and 1-D null preprocessing algorithm(Wei Ping, *et al.*, 1996), a 2-D UCA MUSIC algorithm for wide-band sources with arbitrary spatial null response is presented. The computer simulations indicate that the spatial wide-band interference can be suppressed exactly, the high precision and high resolution of UCA-RB-MUSIC algorithm is maintained, and the computational burden is reduced.

Key words Uniform circular array, Wideband, Beamformer, Preprocess, Beam function

何明浩: 男, 1963 年生, 博士生, 主要研究方向包括: 阵列信号处理, 雷达和电子对抗系统.

李膺东: 男, 1978 年生, 硕士生, 主要研究方向包括: 阵列信号处理, 优化算法.

张贤达: 男, 1946 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向包括: 数字信号处理理论, 雷达和通信信号处理, 阵列信号处理.