

基于最小冗余线阵的共轭循环 ESPRIT 算法¹

姚敏立 殷勤业 汪仪林

(西安交通大学信息工程研究所 西安 710049)

摘要 本文提出了一种基于最小冗余线阵的共轭循环 ESPRIT 算法。理论分析和计算机仿真实验均表明：该算法具有良好的 DOA 估计性能，增大了阵列孔径，抗噪能力强，分辨率高，可以用较少的阵元估计更多的信号源方向。计算机仿真实验验证了算法的有效性，并比较了该算法与共轭循环 ESPRIT 算法的 DOA 估计性能。

关键词 共轭循环 ESPRIT, 波达方向估计, 最小冗余线阵

中图分类号 TN911.7

1 引言

近年来，信号的循环平稳特性已成功地应用于阵列信号处理并用于 DOA 估计^[1]，W.A.Gardner 等人，提出了 cyclic MUSIC (CM)、cyclic ESPRIT(CE) 和 SC-SSF 等 DOA 估计算法^[2-4]。这些算法，不仅利用了空间信息，而且利用了时间信息，扩展了特征结构法的功能，提高了 DOA 估计的性能。然而，CM 算法需要进行谱峰搜索，导致了相当可观的运算量。CE 算法不需谱峰搜索，但 CE 算法要求阵列划分为两个特性一致的子阵列。这两个子阵列之间存在平移性质，由此构成一个旋转不变对角矩阵，该矩阵包含了所有信号源的 DOA 信息，并且通过求矩阵束的广义特征值来估计信号源的 DOA。CE 算法与 CM 算法相比，尽管运算量有明显降低，但阵列孔径的利用率明显下降，因而可估计的信号源个数也明显下降。CE 算法是基于窄带假设条件、用复信号(解析信号)估计循环相关矩阵的。在窄带假设条件下，某些信号(如 AM 信号)的循环相关函数是不存在的，但它们的共轭循环相关函数存在^[5]，因而可利用 conjugate cyclic ESPRIT(简称 CCE 算法)和 conjugate cyclic MUSIC(简称 CCM 算法)进行 DOA 估计^[2,3]。

众所周知，CE 算法的循环相关矩阵是一个 Toeplitz 矩阵。研究发现 CCE 算法的共轭循环相关矩阵是一个 Hankel 矩阵^[6,7]。Toeplitz 矩阵和 Hankel 矩阵的冗余特性表明均匀线阵的大部分阵元是冗余的。采用非均匀线阵是减少线阵冗余度的最常用的方法^[8,9]。基于这一思想，本文提出了基于最小冗余线阵的 CCE 算法(简称 MRLA-CCE 算法)。该算法不要求两个特性一致的独立子阵列，克服了 CE 算法的缺点，且具有循环域 DOA 估计算法的优点^[3]；与 CCE 算法相比，MRLA-CCE 算法增大了阵列孔径，在循环频率一定，阵元数相同的条件下，DOA 估计的分辨率和可估计源的个数都有所提高。

¹ 1998-02-09 收到，1998-10-14 定稿

863 计划(编号 863-317-9603-07-4)、雷达信号处理重点实验室国防预研基金和西安交通大学研究生院博士学位论文基金联合资助课题

2 均匀线阵和共轭循环相关矩阵

设有 M 个阵元的均匀线阵, 阵元间距 D 为半波长. K 个具有相同中心频率 ω 且循环独立的信号源 $s_k(t)$, 分别以方向 $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ 入射该阵列, 则阵列输出用矢量表示为 $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$. 在窄带假设条件下, 第 i 个阵元输出具有如下形式:

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t) \exp(j\omega(i-1)\tau_k) + n_i(t), \quad (1)$$

式中 $\tau_k = D \sin(\theta_k)/c$ 为第 k 个源在相邻阵元间的延时, c 为波的传播速度, $s_k(t)$ 为入射信号的解析形式, $n_i(t)$ 为不同于期望信号循环平稳特性的噪声和干扰. 令 $\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T$, $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$, (1) 式可写成矩阵形式:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (2)$$

式中 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_k)]$, $\mathbf{a}(\theta_k) = [1, \exp(j\omega\tau_k), \dots, \exp(j\omega(M-1)\tau_k)]$. 均匀线阵的 p 阵元和 q 阵元输出的共轭循环互相关函数 $R_{x_p x_q^*}^\alpha(\tau)$ 的表达式为^[2,3,7]:

$$R_{x_p x_q^*}^\alpha(\tau) = \langle x_p(t + \tau/2)x_q(t - \tau/2) \exp(-j2\pi\alpha t) \rangle. \quad (3)$$

设第 k 个源的共轭循环自相关函数为 $R_{s_k s_k^*}^\alpha(\tau)$, 将 (1) 式代入 (3) 式, 利用 $s_k(t)$ 间循环独立性, 可得

$$R_{x_p x_q^*}^\alpha(\tau) = \sum_{k=1}^K R_{s_k s_k^*}^\alpha(\tau) \exp(j\omega(p+q-2)\tau_k) = \hat{R}_{p,q}^\alpha(p+q-2, \tau). \quad (4)$$

令 $\gamma_k = \exp(j\omega\tau_k)$, 则由 (4) 式可得共轭循环相关矩阵 $\mathbf{R}_{x,x^*}^\alpha$.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{x,x^*}^\alpha &= \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^K R_{s_k s_k^*}^\alpha(\tau) & \sum_{k=1}^K R_{s_k s_k^*}^\alpha(\tau)\gamma_k^1 & \cdots & \sum_{k=1}^K R_{s_k s_k^*}^\alpha(\tau)\gamma_k^{M-1} \\ \sum_{k=1}^K R_{s_k s_k^*}^\alpha(\tau)\gamma_k^1 & \sum_{k=1}^K R_{s_k s_k^*}^\alpha(\tau)\gamma_k^2 & \cdots & \sum_{k=1}^K R_{s_k s_k^*}^\alpha(\tau)\gamma_k^M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{k=1}^K R_{s_k s_k^*}^\alpha(\tau)\gamma_k^{M-1} & \sum_{k=1}^K R_{s_k s_k^*}^\alpha(\tau)\gamma_k^M & \cdots & \sum_{k=1}^K R_{s_k s_k^*}^\alpha(\tau)\gamma_k^{2M-2} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \hat{R}_{p,q}^\alpha(0, \tau) & \hat{R}_{p,q}^\alpha(1, \tau) & \cdots & \hat{R}_{p,q}^\alpha(M-1, \tau) \\ \hat{R}_{p,q}^\alpha(1, \tau) & \hat{R}_{p,q}^\alpha(2, \tau) & \cdots & \hat{R}_{p,q}^\alpha(M, \tau) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{R}_{p,q}^\alpha(M-1, \tau) & \hat{R}_{p,q}^\alpha(M, \tau) & \cdots & \hat{R}_{p,q}^\alpha(2M-2, \tau) \end{bmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{R}_{s,s^*}^\alpha\mathbf{A}^T, \quad (5) \end{aligned}$$

式中 $\mathbf{R}_{s,s^*}^\alpha = \text{diag}[R_{s_1 s_1^*}^\alpha(\tau), R_{s_2 s_2^*}^\alpha(\tau), \dots, R_{s_k s_k^*}^\alpha(\tau)]$. 显然, 共轭循环相关矩阵 $\mathbf{R}_{x,x^*}^\alpha$ 具有 Hankel 矩阵结构. 根据 Hankel 矩阵结构的特点, 只要求得 $\mathbf{R}_{x,x^*}^\alpha$ 的第一列和最后一行, 就可以完全重构整个 $\mathbf{R}_{x,x^*}^\alpha$ 矩阵.

3 基于最小冗余线阵的 CCE 算法 (MRLA-CCE)

3.1 最小冗余线阵

从 (5) 式中可以看出来, 在 M 阵元均匀线阵的共轭循环相关矩阵中, M^2 个共轭循环相关函数只有 $2M - 1$ 是独立的。均匀线阵输出的共轭循环相关矩阵是冗余的 Hankel 矩阵。采用非均匀线阵是减少线阵冗余的常用方法。设阵列 A 为 M 个阵元非均匀线阵, 整数 $(d_1 < d_2 < \dots < d_M)$ 为各阵元与第一个阵元距离对半波长的归一化值, 显然 $d_i = i - 1$ 。从 (4) 式可以看出, 阵列输出的共轭循环相关函数只与 $(p + q - 2)$ 的值有关。对非均匀线阵, 共轭循环互相关函数就是与 d_p 和 d_q 有关。根据孔径合成理论的叠加等价阵列 (sum coarray) 的定义, 阵列 A 的叠加等价阵列表达式为 [6,7]

$$C_{\text{sum}}(A) = \{d_i + d_j, 1 \leq i, j \leq M\}. \quad (6)$$

若阵列 A 与阵列 B 等价即 $C_{\text{sum}}(A) = C_{\text{sum}}(B)$, 则阵列 A 与阵列 B 具有相同的阵列孔径。事实上线阵的冗余主要是因为不同的阵元对 (p 和 q 的组合) 可以获得相同的共轭循环相关函数, 冗余度 R 可定义为阵列输出的共轭循环相关函数总数 (排列组合原理) 和独立共轭循环相关函数总数 (用 $\text{Ind}(C_{\text{sum}}(A))$ 表示) 的比值 [8,9], 即

$$R(A) = \frac{M(M-1)/2}{\text{Ind}(C_{\text{sum}}(A))}. \quad (7)$$

对 M 阵元的均匀线阵 U , $C_{\text{sum}}(U)$ 和 $R(U)$ 分别为

$$C_{\text{sum}}(U) = \{0, 1, \dots, 2M - 2\}, \quad R(U) = \frac{M(M-1)/2}{\text{Ind}(C_{\text{sum}}(U))} = \frac{M(M-1)}{2(2M-1)}. \quad (8)$$

从 (8) 式可知随着阵元数 M 的增大, 冗余度 $R(U)$ 也随之增大。设计最小冗余线阵就是使 M 阵元的非均匀线阵与 N 阵元均匀线阵等价 ($N > M$), 同时使 $R(U)$ 的值最小。那么 M 阵元的非均匀线阵就等价于 $C_{\text{sum}}(A) = \{0, 1, \dots, 2N - 2\}$ 。根据 (4) 式可推得 p 阵元和 q 阵元输出的共轭循环互相关函数 ($1 \leq p, q \leq M$) 为

$$R_{x_p, x_q}^\alpha(\tau) = \sum_{k=1}^K R_{s_k, s_k}^\alpha(\tau) \exp(j\omega(d_p + d_q)\tau_k) = \hat{R}_{p,q}^\alpha(d_p + d_q, \tau). \quad (9)$$

从 (9) 式可求得 $2N - 1$ 个独立的共轭循环相关函数。由此可见, 设计最小冗余线阵是一个优化问题。我们称按照上述思想设计的线阵为最小冗余叠加等价线阵。表 1 给出了通过计算机穷尽搜索获得的最小冗余叠加等价线阵的归一化配制 ($M \leq 10$) [7,9]。孔径相同的最小冗余线阵, 阵元的归一化配制并不唯一, 表 1 只列出了一种 [9]。

表 1 最小冗余叠加等价线阵归一化配置

M	N	$\{d_i\}$
4	5	{0,1,3,4}
5	7	{0,1,3,5,6}
6	9	{0,1,3, 5,7,8}
7	11	{0,1,2,5,8,9,10}
8	14	{0,1,2,5,8,11,12,13}
9	17	{0,1,2,5,8,11,14,15,16}
10	21	{0,1,3,4,9,11,16,17,19,20}

3.2 MRLA-CCE 方法的 DOA 估计原理

由上节讨论可知: 阵元数为 M 的最小冗余线阵, 利用 (9) 式, 可以求得 $2N - 1$ 个独立的共轭循环相关函数, 根据 Hankel 矩阵的特点, 并结合 (4),(5) 式, 我们得到 M 阵元最小冗余线阵的 $N \times N$ 维的循环相关矩阵 $\mathbf{R}_M^\alpha(\tau)$, 这个矩阵具有 Hankel 矩阵的结构:

$$\mathbf{R}_M^\alpha(\tau) = \begin{bmatrix} \hat{R}_{p,q}^\alpha(0, \tau) & \hat{R}_{p,q}^\alpha(1, \tau) & \cdots & \hat{R}_{p,q}^\alpha(N-1, \tau) \\ \hat{R}_{p,q}^\alpha(1, \tau) & \hat{R}_{p,q}^\alpha(2, \tau) & \cdots & \hat{R}_{p,q}^\alpha(N, \tau) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{R}_{p,q}^\alpha(N-1, \tau) & \hat{R}_{p,q}^\alpha(N, \tau) & \cdots & \hat{R}_{p,q}^\alpha(2N-2, \tau) \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{R}_{s,s}^\alpha \tilde{\mathbf{A}}^T, \quad (10)$$

式中 $\tilde{\mathbf{A}} = [\tilde{\mathbf{a}}(\theta_1), \tilde{\mathbf{a}}(\theta_2), \dots, \tilde{\mathbf{a}}(\theta_k)]$, $\tilde{\mathbf{a}}(\theta_k) = [1, \exp(j\omega\tau_k), \dots, \exp(j\omega(N-1)\tau_k)]$, ($k = 1, 2, \dots, K$).

比较 (5) 式和 (10) 式, 可以得到以下结论: M 阵元最小冗余线阵输出的共轭循环相关矩阵与 N 阵元均匀线阵输出的共轭循环相关矩阵完全相同. 因此在阵元数相同的条件下, 最小冗余线阵和均匀线阵的孔径之比为 N/M , 从表 1 中 N 和 M 的值可以看出, 最小冗余线阵的孔径有明显扩展. 孔径扩展将会带来估计分辨率的提高和可估计信号源数的增加. 从 (10) 式中取出两个 $(N-1) \times (N-1)$ 维的子矩阵分别定义为 $\mathbf{R}_{M1}^\alpha(\tau)$ 和 $\mathbf{R}_{M2}^\alpha(\tau)$, 即

$$\mathbf{R}_{M1}^\alpha(\tau) = \begin{bmatrix} \hat{R}_{p,q}^\alpha(0, \tau) & \hat{R}_{p,q}^\alpha(1, \tau) & \cdots & \hat{R}_{p,q}^\alpha(N-2, \tau) \\ \hat{R}_{p,q}^\alpha(1, \tau) & \hat{R}_{p,q}^\alpha(2, \tau) & \cdots & \hat{R}_{p,q}^\alpha(N-1, \tau) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{R}_{p,q}^\alpha(N-2, \tau) & \hat{R}_{p,q}^\alpha(N-1, \tau) & \cdots & \hat{R}_{p,q}^\alpha(2N-4, \tau) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_{M2}^\alpha(\tau) = \begin{bmatrix} \hat{R}_{p,q}^\alpha(1, \tau) & \hat{R}_{p,q}^\alpha(2, \tau) & \cdots & \hat{R}_{p,q}^\alpha(N-1, \tau) \\ \hat{R}_{p,q}^\alpha(2, \tau) & \hat{R}_{p,q}^\alpha(3, \tau) & \cdots & \hat{R}_{p,q}^\alpha(N, \tau) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{R}_{p,q}^\alpha(N-1, \tau) & \hat{R}_{p,q}^\alpha(N, \tau) & \cdots & \hat{R}_{p,q}^\alpha(2N-3, \tau) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

令 $\tilde{\mathbf{A}} = [\tilde{\mathbf{a}}(\theta_1), \tilde{\mathbf{a}}(\theta_2), \dots, \tilde{\mathbf{a}}(\theta_k)]$, $\tilde{\mathbf{a}}(\theta_k) = [1, \exp(j\omega\tau_k), \dots, \exp(j\omega(N-2)\tau_k)]$, ($k = 1, 2, \dots, K$), 则 (11), (12) 式可写成如下的矩阵形式:

$$\mathbf{R}_{M1}^\alpha(\tau) = \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{R}_{s,s}^\alpha \tilde{\mathbf{A}}^T, \quad \mathbf{R}_{M2}^\alpha(\tau) = \tilde{\mathbf{A}} \phi \mathbf{R}_{s,s}^\alpha \tilde{\mathbf{A}}^T, \quad (13)$$

式中 $\phi = \text{diag}[\exp(j\omega\tau_1), \exp(j\omega\tau_2), \dots, \exp(j\omega\tau_K)]$. 由 (13) 式可得

$$\mathbf{R}_{M1}^{\alpha}(\tau) - \mathbf{R}_{M2}^{\alpha}(\tau) = \vec{\mathbf{A}}\mathbf{R}_{s,s}^{\alpha}\vec{\mathbf{A}}^T - \vec{\mathbf{A}}\phi\mathbf{R}_{s,s}^{\alpha}\vec{\mathbf{A}}^T = \vec{\mathbf{A}}(\mathbf{I} - \mathbf{C}\phi)\mathbf{R}_{s,s}^{\alpha}\vec{\mathbf{A}}^T, \quad (14)$$

则由矩阵对 $\mathbf{R}_{M1}^{\alpha}(\tau)$ 和 $\mathbf{R}_{M2}^{\alpha}(\tau)$ 广义特征值可得

$$c_{k,k} = 1/\phi(k,k) = \gamma_k^{-1} = \exp(-j\omega D \sin(\theta_k)/c). \quad (15)$$

利用 (15) 式可得 K 个信号源的 DOA 估计。该算法不需要两个特性一致的独立子阵列, 只需要表 1 所列的最小冗余线阵。从仿真实验中可以清楚地看出该算法优于基于均匀线阵的 CCE 算法。

4 仿真实验与分析

为了说明 MRLA-CCE 算法的有效性, 检验算法在精度, 分辨率、孔径扩展、信号选择性和抗噪能力等方面的性能, 下面给出仿真实验和分析, 并在同等条件下与 CCE 算法做了对比。在以下的每个实验中, 均由 30 次独立随机实验组成, 并且采用 SVD-TLS-ESPRIT^[10] 算法估计 DOA。实验中入射方向的单位为度。实验 1-5 均采用 5 个阵元的阵列, 其中 MRLA-CCE 算法采用表 1 中 $M=5$ 的最小冗余线阵, CCE 算法采用 5 阵元均匀线阵。实验结果采用极坐标 (ρ, θ) 表示, 其中 ρ 是 SVD-TLS-ESPRIT 算法求出的 (14) 式奇异值的模, θ 是信号源的 DOA。图 1(a) 到图 4(a) 是 CCE 算法的实验结果, 图 1(b) 到图 4(b) 是 MRLA-CCE 算法实验结果; 图 5 是 MRLA-CCE 算法选择性实验的实验结果。

实验 1 4 个载频为 f_0 窄带调幅信号, 入射方向 $\theta = \{-20^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ\}$, 信噪比 -5dB, 快拍数为 1000, $\alpha = 2f_0$, 实验结果如图 1 所示。

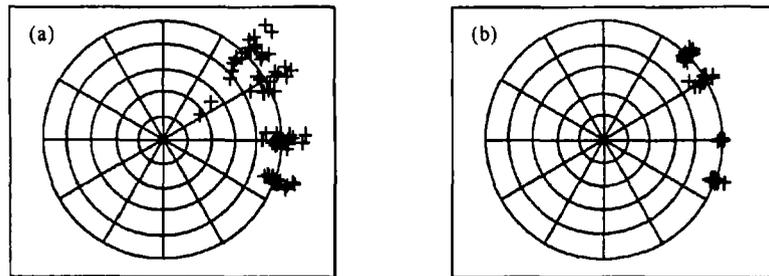


图 1

实验 2 4 个载频为 f_0 窄带调幅信号, 入射方向 $\theta = \{-20^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ\}$, 信噪比 10dB, 快拍数为 1000, $\alpha = 2f_0$, 实验结果如图 2 所示。

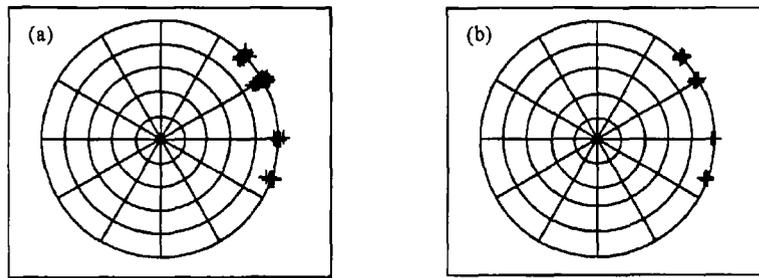


图 2

实验 3 4 个载频为 f_0 窄带调幅信号, 入射方向 $\theta = \{-20^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ\}$, 信噪比 10dB, 快拍数为 2000, $\alpha = 2f_0$, 实验结果如图 3 所示。

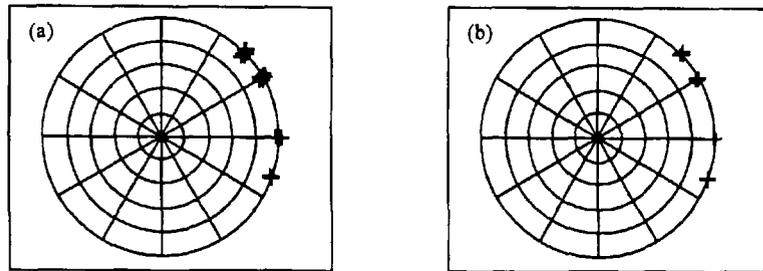


图 3

实验 4 5 个载频为 f_0 窄带调幅信号, 入射方向 $\theta = \{-20^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 75^\circ\}$, 信噪比 10dB, 快拍数为 1000, $\alpha = 2f_0$, 实验结果如图 4 所示。

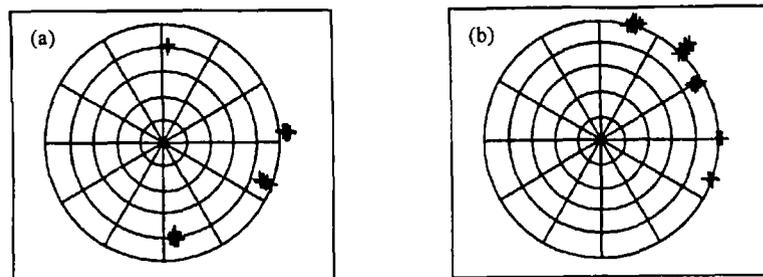


图 4

实验 5 5 个载频为 f_0 窄带调幅信号, 入射方向 $\theta = \{-50^\circ, -20^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ\}$, 2 个载频为 $0.95f_0$ 的窄带 BPSK 信号, 入射方向 $\theta = \{-15^\circ, 5^\circ\}$, 信噪比 10dB, 快拍数为 2000, 实验结果如图 5 所示, 其中图 5(a) 是 $\alpha = 2f_0$ 的结果, 图 5(b) 是 $\alpha = 1.9f_0$ 的结果。

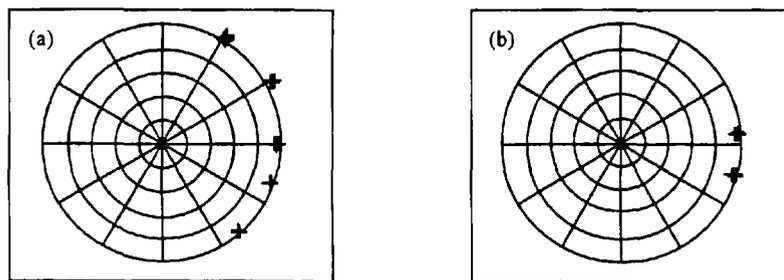


图 5

实验 1- 实验 3 的结果说明, 在阵元数、快拍数和信噪比相同的条件下, 基于最小冗余线阵 CCE 算法优于 CCE 算法。这是因为最小冗余线阵的孔径 (7) 大于均匀线阵的孔径 (5), 因此可以获得更多的信息来提高估计的分辨率和精度。实验 1- 实验 3 的结果还表明, 随着快拍数的增加, 获得的共轭循环相关值更准确, 因此 DOA 估计性能得到提高, 随着信噪比的增强, 由于噪声的影响降低, DOA 估计性能也会提高。

实验 4 的结果表明当信号个数等于或超过均匀线阵的阵元数 (5) 时, CCE 算法不能正确地估计信号源的 DOA, 这是由于 CCE 算法无法划分信号子空间和噪声子空间, 因此不能准确地判决信号源数和估计信号源的 DOA。但是对 MRLA-CCE 算法, 只要信号源数小于阵列的等效孔径 (7), 该算法就能正确估计信号源的 DOA。用较少阵元估计更多的信号源的 DOA 是 MRLA-CCE 算法的一个特点。

实验 5 的结果表明 MRLA-CCE 算法的 DOA 估计具有选择性。MRLA-CCE 算法选用的循环频率是载波的两倍, 因此只要信号的载频不同, MRLA-CCE 算法就能有选择地估计信号的 DOA。MRLA-CCE 算法还能估计 CE 算法不能估计的情形, 例如波特率相同, 而载频不同的情形。在某种意义上讲, MRLA-CCE 算法适用范围更广。

5 结 论

本文研究了用于 CCE 方法的最小冗余线阵, 并将之用于 DOA 估计。理论分析和仿真实验均表明: 本文提出的 MRLA-CCE 算法改善了 DOA 估计的性能。该算法具有循环 DOA 估计的优点, 比 CE 方法适用范围广; 该算法增大了阵列孔径, 当采用 M 阵元的最小冗余叠加等价线阵时, MRLA-CCE 算法的孔径为 N , 众所周知, 阵列孔径越大, DOA 分辨率越高。

参 考 文 献

- [1] Gardner W A. Exploitation of spectral redundancy in cyclostationarity signal. IEEE Signal Processing Mag. 1991, 8(2): 14-37.
- [2] Gardner W A. Simplification of MUSIC and ESPRIT by exploitation of cyclostationarity. Proc. IEEE, 1988, 76(7): 845-847.
- [3] Schell S V. Performance of analysis of the cyclic MUSIC method of direction estimation for cyclostationary signal. IEEE Trans. on SP, 1994, SP-42(11): 3043-3050.

- [4] Xu G, Kailath T. Direction-of-arrival estimation via exploitation of cyclostationarity—A combination of temporal and spatial processing. *IEEE Trans. on SP*, 1992, SP-40(7): 1775–1785.
- [5] Gardner W A. Introduction to random process with application to signal and system. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1990, Ch.12.
- [6] Hoctor R T, Kassam S A. The unifying role of the coarray in aperture synthesis for coherent and incoherent imaging. *Proc. IEEE*, 1990, 78(4): 735–752.
- [7] Gelli G, Izzo L. Minimum-redundancy linear arrays for cyclostationarity-based source location. *IEEE Trans. on SP*, 1997, SP-45(10): 2605–2608.
- [8] Moffet A T. Minimum-redundancy linear arrays. *IEEE Trans. on AP*, 1968, AP-16(2): 172–175.
- [9] Hoctor R T, Kassam S A. Arrays redundancy for active line arrays. *IEEE Trans. on IP*. 1996, IP-5(7): 1179–1183.
- [10] Zhang X D, Liang Y C. Prefilter-based ESPRIT for estimating parameters of sinusoids in non-Gaussian ARMA noise. *IEEE Trans. on SP*, 1995, SP-43(1): 349–353.

CONJUGATE CYCLIC ESPRIT ALGORITHM BY EXPLOITATION OF MINIMUM-REDUNDANCY LINEAR-ARRAYS

Yao Minli Yan Qinye Wang Yilin

(*Institute of Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049*)

Abstract In this paper, conjugate cyclic ESPRIT with minimum-redundancy linear-arrays is presented. Theoretical analysis and computer simulation show that the algorithm has better performance, such as extending aperture, being insensitive to noise, having higher resolution, and estimating more sources with fewer sensors. Computer simulation results and comparisons with conjugate cyclic ESPRIT are presented to demonstrate the performance of the proposed algorithm.

Key words Conjugate cyclic ESPRIT, Minimum-redundancy linear-arrays, Direction-of-arrival (DOA) estimation

姚敏立: 男, 1966年生, 博士生, 研究方向: 阵列信号处理, 通信中的信号处理.

殷勤业: 男, 1950年生, 教授, 博士生导师. 研究方向: 时-空谱估计, 智能天线系统, 时频分析, 循环平稳信号处理.

汪仪林: 女, 1961年生, 教授, 研究方向: 阵列信号处理, 循环平稳信号处理, 引爆控制工程.