

基于四阶混合累积量的雷达目标二维超分辨成像

高勋章 黎湘 庄钊文

(国防科技大学 ATR 国防科技重点实验室 长沙 410073)

摘要: 针对高斯色噪声条件下雷达目标二维成像问题, 提出了一种基于四阶混合累积量的二维 ESPRIT 超分辨成像方法。利用四阶混合累积量对高斯色噪声的自动抑制, 降低了噪声对成像质量的影响。通过保持目标特征矩阵结构不变, 解决了现有方法在长采样数据条件下计算量过大的问题。仿真实验表明该方法的成像效果和散射点位置估计精度优于传统方法。

关键词: 二维超分辨成像, 四阶混合累积量, 二维谐波恢复, 高斯色噪声

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)10-1555-05

Two-Dimensional Super-Resolution Imaging of Radar Target Based on Fourth-Order Mixed Cumulants

Gao Xun-zhang Li Xiang Zhuang Zhao-wen

(ATR Lab., National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract A new method for two-dimensional super-resolution imaging of radar target in colored Gaussian noise, called two-dimensional FOMC (Fourth-Order Mixed Cumulants) based ESPRIT (2d-FOMCESPRIT), is presented in this paper. The image is improved for the FOMC could eliminate the Gaussian noise automatically. Additionally this method is computationally much less intensive by holding the dimensions of the feature matrix in the presence of long records. Simulation results show that this method has better image quality than other methods.

Key words Two-dimensional super-resolution imaging, Fourth-Order Mixed Cumulants(FOMC), Two-dimensional harmonic retrieval, colored Gaussian noise

1 引言

运动补偿、成像分辨率和噪声(杂波)抑制是目前ISAR成像技术走向实用化过程中的3个主要研究内容。传统的基于傅里叶变换的雷达成像技术的分辨率受瑞利限的限制, 而基于现代谱估计技术的超分辨成像技术的分辨率却能够突破这一限制, 因此在雷达、语音和声纳等领域得到了广泛的应用。基于谱估计技术的雷达二维成像本质上是信号处理领域的二维谐波恢复问题, 研究表明, 在小角度条件下, 雷达宽带回波的GTD模型可以用一个二维的衰减谐波模型来近似^[1]。因此基于多散射中心模型的雷达成像问题可以转化为二维衰减谐波的极点和幅度的估计问题。

近年来提出的二维谐波恢复方法主要有矩阵束、线性预测和空间旋转不变方法^[2-4], 这些方法都需要进行扩阶的二维汉克尔矩阵奇异值分解。扩阶汉克尔矩阵维数会随采样数据长度增加而迅速增大, 导致算法的计算量过大而失去实用性。另一方面, 上述方法都假定测量信号背景噪声为高斯白

噪声, 在相关色噪声条件下, 这些方法的估计精度都会下降。文献[5]假定雷达回波相位服从均匀分布, 利用平稳复谐波信号四阶累积量的性质研究了雷达目标成像的二维Prony方法。然而实际的雷达回波都是非平稳的多次测量过程, 因此单记录条件下的雷达目标二维超分辨成像不宜采用平稳复谐波信号恢复的方法来处理。

高阶统计量不仅具有出色的高斯噪声抑制能力, 而且与二阶统计量相比含有更丰富的相位信息, 近十多年来一直是信号处理方面的研究热点之一, 尤其在通信和阵列信号处理方面得到了广泛的应用。针对目前二维谐波恢复方法存在的问题, 结合高阶统计量的特点, 本文提出了一种基于四阶混合累积量的二维衰减谐波恢复方法。通过保持目标特征矩阵(混合累积量矩阵)结构不变, 在样本容量增加时该方法能保持计算量基本不变的同时提高参数估计精度。有关该方法的详细性能分析将另文介绍, 本文侧重研究该方法在雷达目标二维超分辨成像方面的具体应用。本文首先将时变序列的四阶混合累积量协方差估计子从一维推广到二维, 并给出了改

进的二维空间旋转不变方法。然后分析了新算法的计算量，最后利用该算法进行了仿真数据和实测数据成像实验。

2 雷达目标的二维复衰减谐波模型

在等效多散射中心的假设下，雷达目标的宽带基频回波可以表示为^[1]

$$x(f, \theta) = \sum_{k=1}^K A_k \left(j \frac{f}{f_0} \right)^{\alpha_k} \exp(-2\pi f \gamma_k \sin \theta) \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} f (x_i \cos \theta + y_i \sin \theta) \right] \quad (1)$$

其中 α_k 表征散射点类型， γ_k 表征散射中心的角度影响因子。对回波数据作 Carte 插值，且假定初始角度 $\theta_0 = 0$ ，则有

$$x(m, n) = \sum_{k=1}^K a_k \cdot \exp[(d_{1k} + j\omega_{1k})m + (d_{2k} + j\omega_{2k})n] \quad (2)$$

其中 K 表示散射中心个数， a_k 为复幅度系数， $d_{1k} \leq 0$ ， $d_{2k} \leq 0$ 为衰减因子， ω_{1k} ， ω_{2k} 为谐波频率。因而考虑加性噪声影响时，实际得到的基频回波采样数据可以表示为

$$y(m, n) = x(m, n) + v(m, n) \quad (3)$$

其中 $0 \leq m \leq M-1$ ， $0 \leq n \leq N-1$ 。 $v(m, n)$ 为平稳零均值复高斯色噪声。噪声与信号相互独立，且噪声实部与虚部独立同分布。在实际的工程应用中，这些条件一般都能得到满足。由于 $x(m, n)$ 是二维衰减指数信号，故无论噪声 $v(m, n)$ 是否平稳， $y(m, n)$ 都是二维非平稳随机过程。

3 复衰减谐波模型的二维四阶混合累积量

为了处理单记录条件下高斯噪声中的确定性谐波信号(即混合信号)恢复问题，文献[6]提出了一种混合累积量方法，并证明了混合累积量也具有盲高斯性。同时还证明了在准平稳条件下，混合累积量的有限长样本估计具有一致性。文献[6]中四阶混合累积量定义如下。

对于一个零均值的直到四阶的一维准平稳随机过程 $y(n)$ 定义其四阶混合累积量为

$$\bar{c}_{4x}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \triangleq \overline{\text{cum}\{y(n), y(n+\tau_1), y(n+\tau_2), y(n+\tau_3)\}} \quad (4)$$

其中

$$\overline{\text{cum}(s_1, s_2, s_3, s_4)} \triangleq \bar{E}(s_1 s_2 s_3 s_4) - \bar{E}(s_1 s_2) \bar{E}(s_3 s_4) - \bar{E}(s_1 s_3) \bar{E}(s_2 s_4) - \bar{E}(s_1 s_4) \bar{E}(s_2 s_3) \quad (5)$$

$$\bar{E}\{f(n)\} \triangleq \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E\{f(n)\} \quad (6)$$

上述定义要求无噪声信号为 k 阶准平稳过程，而衰减谐波信号为有限能量信号，并不满足这一要求。为了使衰减谐波信号也可以应用混合累积量来进行处理，本文对原定义进行了修改并将这一概念推广到二维的情形。定义非平稳复随机过程 $y(n)$ 的二维四阶混合累积量对角切片为

$$c_{4y}(\tau_1, \tau_2) \triangleq \sum_{m=\tau_1}^{\infty} \sum_{n=\tau_2}^{\infty} E\{y(m, n) y^*(m-\tau_1, n-\tau_2) \cdot y(m-\tau_1, n-\tau_2) y^*(m-\tau_1, n-\tau_2)\} - \sum_{m=\tau_1}^{\infty} \sum_{n=\tau_2}^{\infty} E\{y(m, n) y(m-\tau_1, n-\tau_2)\} \cdot E\{y^*(m-\tau_1, n-\tau_2) y^*(m-\tau_1, n-\tau_2)\} - 2 \sum_{m=\tau_1}^{\infty} \sum_{n=\tau_2}^{\infty} E\{y(m, n) y^*(m-\tau_1, n-\tau_2)\} \cdot E\{y(m-\tau_1, n-\tau_2) y^*(m-\tau_1, n-\tau_2)\} \quad (7)$$

如果 $y(n)$ 是一个有限能量信号，则式(6)应改为 $\bar{E}\{f(n)\} \triangleq \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N E\{f(n)\}$ ，那么容易证明定义(4)与定义式(7)完全一致。由于高斯随机过程的四阶累积量为零，不难证明按式(7)定义的二维四阶混合累积量也具有盲高斯性。将式(1)，式(2)代入式(7)，根据四阶混合累积量的盲高斯性，化简得

$$c_{4y}(\tau_1, \tau_2) = -2 \sum_{m=\tau_1}^{\infty} \sum_{n=\tau_2}^{\infty} x(m, n) x(m-\tau_1, n-\tau_2) (x^*(m-\tau_1, n-\tau_2))^2 = \sum_{k=1}^K b_k \cdot \exp[(d_{1k} + j\omega_{1k})\tau_1 + (d_{2k} + j\omega_{2k})\tau_2] \quad (8)$$

其中

$$b_k = -2 \sum_{l, m, n=1}^K \frac{a_k a_l^* a_m a_n^*}{(1-p_1)(1-p_2)} \quad (9a)$$

$$p_1 = \exp[(d_{1k} + d_{1l} + d_{1m} + d_{1n}) + j(\omega_{1k} - \omega_{1l} + \omega_{1m} - \omega_{1n})] \quad (9b)$$

$$p_2 = \exp[(d_{2k} + d_{2l} + d_{2m} + d_{2n}) + j(\omega_{2k} - \omega_{2l} + \omega_{2m} - \omega_{2n})] \quad (9c)$$

即 $y(n)$ 的二维四阶混合累积量对角切片与 $x(n)$ 具有相同衰减因子和谐振频率。有限长单记录条件下二维四阶混合累积量的估计过程如下，令

$$y'(m, n) = y(m, n) - \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} y(m, n) \quad (10)$$

不考虑估计误差，则有

$$y'(m, n) = x'(m, n) + v(m, n) \quad (11)$$

其中

$$x'(m, n) = x(m, n) - \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} x(m, n) \quad (12)$$

根据式(8)，式(9)有 $y'(n)$ 的二维四阶混合累积量对角切片的估计值为

$$\hat{c}_{4y'}(\tau_1, \tau_2) = \frac{-2}{\Delta M \cdot \Delta N} \sum_{m=M_1}^{M_2} \sum_{n=N_1}^{N_2} [x'(m, n) x'(m-\tau_1, n-\tau_2) \cdot (x^*(m-\tau_1, n-\tau_2))^2] \quad (13a)$$

其中

$$M_1 = \tau_1, \quad M_2 = M - \tau_{1\max} + \tau_1 - 1, \quad \Delta M = M_2 - M_1 + 1 \quad (13b)$$

$$N_1 = \tau_2, \quad N_2 = N - \tau_{2\max} + \tau_2 - 1, \quad \Delta N = N_2 - N_1 + 1 \quad (13c)$$

$\tau_{1\max}$ 和 $\tau_{2\max}$ 为四阶混合累积量切片的最大延迟量。式(13b)

和式(13c)为文献[7]中定义的协方差类型估计子上下限从一维推广到二维后的表达式。这样定义的上下限可以保证有限长采样数据情形下 $\hat{c}_{4y'}(\tau_1, \tau_2)$ 与 $x(m, n)$ 具有相同的衰减因子和谐波频率, 即高斯色噪声条件下测量数据的四阶混合累积量的估计与无噪衰减谐波具有相同的谐波个数、衰减因子和谐波频率。因此利用四阶混合累积量代替测量数据进行谐波参数估计可以降低噪声对估计精度的影响。

4 基于四阶混合累积量的二维超分辨成像算法

基于二维四阶混合累积量, 本文提出了一种二维四阶混合累积量 ESPRIT 成像方法(2d-FOMCESPRIT)。有关二维 ESPRIT 方法(2d-ESPRIT)详见文献[4], 下面简述 2d-FOMCESPRIT 方法的主要步骤。

(1) 根据式(10)对测量数据去均值, 得到零均值测量数据 $y'(m, n)$ 。

(2) 根据式(7), 式(13)估计 $y'(m, n)$ 的二维四阶混合累积量, 即将(7)式中的上下限用式(13.b)和式(13.c)代替。

(3) 构造二维四阶混合累积量的 Hankel 分块矩阵 \hat{C} , 即特征矩阵。 $P \times Q$ 为滑动窗大小。

$$\hat{C} = \begin{bmatrix} \hat{C}_{(0)} & \hat{C}_{(1)} & \cdots & \hat{C}_{(\tau_{1\max}-P+1)} \\ \hat{C}_{(1)} & \hat{C}_{(2)} & \cdots & \hat{C}_{(\tau_{1\max}-P+2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{C}_{(P-1)} & \hat{C}_{(P)} & \cdots & \hat{C}_{(\tau_{1\max})} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中

$$\hat{C}_{(\tau)} = \begin{bmatrix} \hat{c}(\tau, 0) & \hat{c}(\tau, 1) & \cdots & \hat{c}(\tau, \tau_{2\max} - Q + 1) \\ \hat{c}(\tau, 1) & \hat{c}(\tau, 2) & \cdots & \hat{c}(\tau, \tau_{2\max} - Q + 2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{c}(\tau, Q - 1) & \hat{c}(\tau, Q) & \cdots & \hat{c}(\tau, \tau_{2\max}) \end{bmatrix} \quad (15)$$

文献[2]已证明: 为了使Hankel分块矩阵的秩等于谐波个数, 滑动窗 P 和 Q 的选择应满足 $M - K + 1 \geq P \geq K + 1$,

$N - K + 1 \geq Q \geq K + 1$, 其中 M 和 N 分别为测量数据的行数 and 列数。实际中一般取 $P \in [K + 1, (M + 1)/2]$, $Q \in [K + 1, (N + 1)/2]$ 。在 $P \approx (M + 1)/2$, $Q \approx (N + 1)/2$ 时达到最好的估计效果。 $\tau_{1\max}$ 和 $\tau_{2\max}$ 为四阶混合累积量切片的最大延迟量。本文的选取方法是预先选取模型阶数 $K'(K' \geq K)$, 并令 $\tau_{1\max} = (2 \sim 3)K'$, $\tau_{2\max} = (2 \sim 3)K'$ 。再选取 $P \in [K + 1, (\tau_{1\max} + 1)/2]$, $Q \in [K + 1, (\tau_{2\max} + 1)/2]$ 。这种选取方法的特点是可以保持Hankel分块矩阵的大小不随样本容量的增加而增大, 从而能够使测量数据长度增加时特征矩阵的计算量基本保持不变。不难证明步骤(2)中所求出的四阶混合累积量的估计也为一致渐近估计^[6], 因此随着测量数据长度的增加, 特征矩阵 \hat{C} 的估计精度也会有显著提高。而基于原始测量数据的二维ESPRIT方法却不能通过增加测量数据长度来显著改善估计精度, 并且随着测量数据长度的增加, Hankel分块

矩阵的维数会相应增大, 从而导致计算量不断增大。

(4) 对矩阵 \hat{C} 进行奇异值分解, $\hat{C} = U_1 D_1 V_1^H = U_{s1} D_{s1} V_{s1}^H + U_{N1} D_{N1} V_{N1}^H$, U_{s1}, D_{s1}, V_{s1} 对应 K 个主分量。 K 的选取方法可以采用奇异值分解或 MDL 准则等方法。

(5) 令 $F_1 = (\underline{U}_{s1})^* \bar{U}_{s1}$, 其中 \underline{U}_{s1} 、 (\bar{U}_{s1}) 分别是由 U_{s1} 的前(后) $(P-1)Q$ 行构成的矩阵, $(\cdot)^*$ 表示伪逆运算。令 $F_2 = (\underline{E}_1 U_{s1})^* (\bar{E}_1 U_{s1})$, $\underline{E}_1 U_{s1}$ 、 $(\bar{E}_1 U_{s1})$ 分别是由 $E_1 U_{s1}$ 的前(后) $(P-1)Q$ 行构成的矩阵, 且 $E_1 = \sum_{k=1}^Q \sum_{l=1}^P E_{k,l}^{Q \times P} \otimes E_{l,k}^{P \times Q}$, \otimes 表示 Kronecher 积。 $E_{k,l}^{Q \times P}$ 是大小为 $Q \times P$ 的初等阵, 该矩阵中位置为第 k 行第 l 列的元素等于 1, 其他所有元素为 0。

(6) 令 $F = \beta F_1 + (1 - \beta) F_2$, β 为常数, 一般取大于 1 的值。对 F 作特征值分解, 有: $F = T^{-1} D T$ 。令 $\Phi_1 = T F_1 T^{-1}$, $\Phi_2 = T F_2 T^{-1}$ 。从而求出衰减谐波的衰减因子和谐波频率为 $\exp(d_{1k} + j\omega_{1k}) = \text{diag}_{1 \leq k \leq K} \{\Phi_1\}$, $\exp(d_{2k} + j\omega_{2k}) = \text{diag}_{1 \leq k \leq K} \{\Phi_2\}$ Φ_1 对角线上的元素和 Φ_2 对角线上相应位置的元素直接配对, 形成 K 对估计结果。

(7) 将求出的衰减因子和谐波频率代入式(2), 利用整体最小二乘法求出复幅度系数 \hat{a}_k 。

5 算法计算量

在现有的二维超分辨方法中, 文献[4]提出的二维 ESPRIT 方法具有较好的参数估计和频率匹配性能。根据上节的分析, 本节就算法计算量对本文方法和二维 ESPRIT 方法进行了分析和对比仿真实验。根据上一节所述的算法步骤, 2d-FOMCESPRIT 方法的计算量主要来源于 4 个计算过程(以下的分析中皆假设谐波个数 K 已被准确估计出): 二维四阶混合累积量计算、Hankel 分块矩阵 \hat{C} 的奇异值分解、矩阵 F 的特征值分解以及整体最小二乘法求复幅度系数 \hat{a}_k 。根据四阶混合累积量的估计步骤和文献[8]的有关结论可知, 整个算法的总体计算量为(单位:flop):

$$fc \approx fc_{\text{FOMC}} + fc_{\text{SVD}} + fc_{\text{Eig}} + fc_{\text{TLS}} \quad (16)$$

其中

$$fc_{\text{FOMC}} \approx (\tau_{1\max} + 1)(\tau_{2\max} + 1)[12(M - \tau_{1\max})(N - \tau_{2\max}) + 6]$$

$$fc_{\text{SVD}} \approx 4(PQ)^2(\tau_{1\max} - P + 2)(\tau_{2\max} - Q + 2) + 8PQ[(\tau_{1\max} - P + 2)(\tau_{2\max} - Q + 2)]^2 + 9[(\tau_{1\max} - P + 2)(\tau_{2\max} - Q + 2)]^3$$

$$fc_{\text{Eig}} \approx 25K^3$$

$$fc_{\text{TLS}} \approx 2MNK^2 + 12K^3$$

由式(12)可知, 当数据长度较大时, fc_{SVD} 是主要的计算量来源。表 1 所示为不同数据长度时本文方法与文献[4]方法的计算量对比情况。假设谐波个数等于 3, 2d-FOMCESPRIT 方法中 K' 取 5, $\tau_{1\max} = \tau_{2\max} = 14$, $P = Q = 7$; 2d-ESPRIT 方法中 $P = M/2, Q = N/2$ 。

表1 两种方法的计算量对比情况(假设数据长度 $M=N$, 单位: flop)

数据长度($N=M$)	30	40	50	60	80	160
2d-ESPRIT	2.54E5	1.11E7	1.64E8	9.80E8	1.19E10	2.15E12
2d-FOMCESPRIT	8.87E6	1.00E7	1.18E7	1.40E7	2.02E7	6.70E7

由表1可知, 当数据量 $M(N) \leq 40$ 时, 2d-ESPRIT 方法与 2d-FOMCESPRIT 方法计算量都较小, 且后者大于前者。但当数据量 $M(N) \geq 50$ 时, 2d-FOMCESPRIT 方法由于能保持 Hankel 矩阵结构不变, 计算量增加较少; 而 2d-ESPRIT 方法中的 Hankel 矩阵维数随数据长度增加而增加, 导致该矩阵奇异值分解的计算量急剧增加。实际上当数据长度大于 80 时, 2d-ESPRIT 方法由于计算量过大已经失去实用性。

6 实验结果

由于四阶混合累积量对高斯噪声具有自动抑制作用, 因此对测量数据求混合累积量可以提高测量数据的信噪比, 成像效果更好。利用仿真数据和实测数据, 本文分别进行仿真实验验证了这一结论。

6.1 仿真数据实验

仿真实验模型为一个飞机状目标, 由 12 个点状强散射中心构成, 各散射点在图中用“+”表示, 估计出的散射中心用“o”表示。具体的仿真实验条件为 $f_0 = 7.5\text{GHz}$, $\Delta f = 2\text{MHz}$, $\theta_0 = 0^\circ$, $\Delta\theta = 0.01^\circ$, 信噪比为 15dB, 零均值复高斯色噪声 $v(m,n)$ 由复高斯白噪声通过二维 FIR 色滤波器得到。实验中采用的色滤波器为

$$h(m,n) = 0.5\delta(m,n) + 0.2 \times 0.8^{m+n} \cos(2\pi(0.3m + 0.6n))$$

图1是采用二维 ESPRIT 方法得到的成像结果, 数据长度分别为 $M = N = 64$, $P = Q = 32$; 图2为本文提出的 2d-FOMCESPRIT 方法的成像结果, 数据长度分别为 $M = N = 128$, $\tau_{1\max} = 64$, $\tau_{2\max} = 64$, $P = Q = 32$ 。(Monte Carlo 仿真各 10 次)。

由图1可见, 由于色噪声的影响二维 ESPRIT 方法未能正确估计出全部强散射中心, 有一个点的位置偏离到整个图外(为与图2保持相同的比例, 图1中未画出偏离点的位置), 而本文方法则可以正确估计出全部散射中心。值得注意的是, 对于正确估计出的散射中心, 基于混合累积量的 2d-FOMCESPRIT 方法的方差要大于二维 ESPRIT 方法。本质的原因是由有限长样本得到的四阶混合累积量的估计是有误差的, 通过增加样本容量可以减小这一误差。

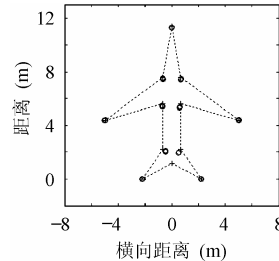


图1 2d-ESPRIT 方法

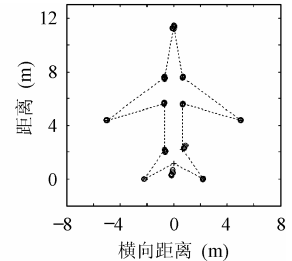


图2 2d-FOMCESPRIT 方法

6.2 实测数据实验

最后本文对波音 727 飞机的实测数据进行了仿真试验。测量数据已进行过运动补偿和 Carte 插值。实际的测量条件为载频 $f_0 = 9\text{GHz}$, 步进频率 $\Delta f = 150/128\text{MHz}$ 。图3为目标外形尺寸示意图, 图4为采用传统的 FFT 方法的成像结果, 频率步进数 $M = 128$, 方位采样数 $N = 128$ 。图5为 2d-ESPRIT 方法的成像结果, 为减少计算量, 频率步进数取为 $M = 64$, 方位采样数 $N = 64$ 。步进频率间隔和方位采样间隔分别为原来的 2 倍, 滑动窗大小为 $P = Q = 28$, 散射中心个数取 25。图6为 2d-FOMCESPRIT 方法的成像结果, 最大延迟 $\tau_{1\max} = \tau_{2\max} = 64$, 滑动窗大小为 $P = Q = 28$, 散射中心个数取 25, 其他实验参数同图4。图7和图8是在实测数据上加入高斯色噪声后采用 2d-ESPRIT 和 2d-FOMCESPRIT 方法的成像结果(信噪比为 5dB)。

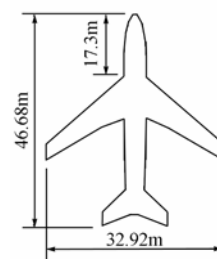


图3 飞机外形示意图

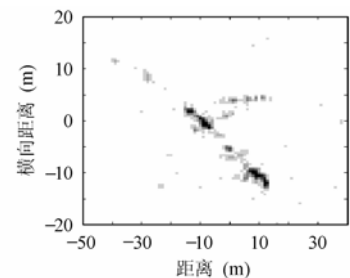


图4 FFT 方法成像结果

由图4—图6看出, 后两种超分辨方法的分辨率和清晰度明显高于传统的 FFT 方法。对照图3中的目标外形尺寸可以看出由于受噪声或杂波的影响 2d-ESPRIT 方法所得成像结果中部分散射点在目标之外, 而 2d-FOMCESPRIT 方法由于具有较强的抗噪能力可以得到更为准确的成像结果。此外, 为了减少计算量, 当采样数据长度较长时, 2d-ESPRIT 方法

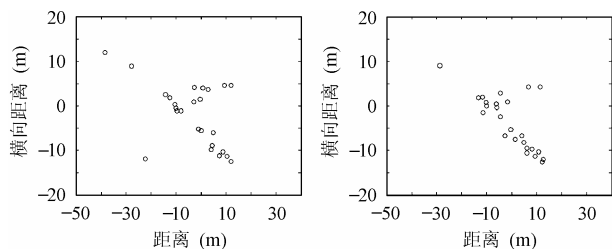


图 5 2d-ESPRIT
方法成像结果

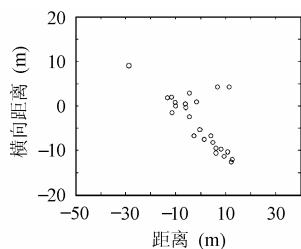


图 6 2d-FOMCESPRIT
方法成像结果

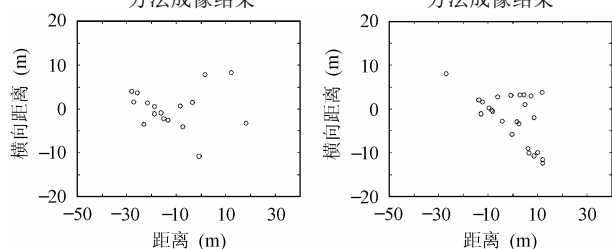


图 7 2d-ESPRIT
方法成像结果(5dB)

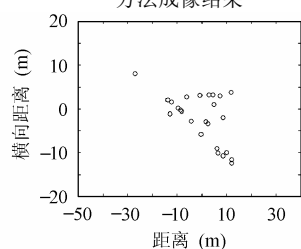


图 8 2d-FOMCESPRIT
方法成像结果(5dB)

只能通过对离散数据作二次采样的方法来减小数据长度,从而导致横向和纵向的最大不模糊距离减小。本文方法通过固定最大延迟的方法较好地解决了这一问题。同时通过增加样本容量,可以提高四阶混合累积量的估计精度,从而提高散射中心的估计精度。

7 结束语

本文利用高阶混合累积量的盲高斯性提出了一种基于四阶混合累积量的雷达目标二维超分辨成像方法。该方法较好地解决了现有超分辨方法在长测量数据条件下计算量过大的问题。仿真数据实验和实测数据实验均表明该方法的成像效果要明显优于传统的 FFT 方法和现有的超分辨方法。尤其在低信噪比的条件下,由于具有较好的抗噪能力,该方法成像效果明显地优于现有方法。因而该方法为二维超分辨 ISAR 成像技术的实用化提供了一种较好的途径。

参考文献

- [1] Potter L C, Moses R L. Attributed scattering centers for SAR ATR. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1997, 6(1): 79 – 91.
- [2] Hua Y. Estimating two-dimensional frequencies by matrix enhancement and matrix pencil. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1992, 40(9): 2267 – 2280.
- [3] Sacchini J J, Steedly W M. Two-dimensional prony modeling and parameter estimation. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1993, 41(11): 3127 – 3136.
- [4] Rouquette S, Najim M. Estimation of frequencies and damping factors by two-dimensional ESPRIT type methods. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2001, 49(1): 237 – 245.
- [5] Wang J. Feature extraction of localized scattering centers using the modified TLS-Prony algorithm and its applications. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2002, 13(3): 31 – 39.
- [6] Anderson J M M, Giannakis G B, Swami A. Harmonic retrieval using higher order statistics: a deterministic formulation. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1995, 43(8): 1880 – 1889.
- [7] Ruiz D P, Carrion M C, Gallego A, Medouri A. Parameter estimation of exponentially damped sinusoids using a higher order correlation-based approach. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1995, 43(11): 2665 – 2677.
- [8] G. H. 戈卢布, C. F. 范洛恩著. 袁亚湘等译. 矩阵计算. 北京: 科学出版社, 2002: 293 – 294.

高勋章: 男, 1972 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为高阶统计量分析与雷达目标识别。

黎 湘: 男, 1967 年生, 教授, 主要研究方向为信号处理及信息融合。

庄钊文: 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理及卫星导航与定位。