

# 二维全极化 ESPRIT 超分辨特征提取及性能分析

邢世其, 代大海, 王雪松, 王 涛  
(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 提出了二维全极化 ESPRIT 超分辨特征提取方法, 推导了二维全极化参数估计的克拉美罗限, 并且在此基础上分析了本文方法的工作性能. 同已有超分辨算法相比, 二维全极化 ESPRIT 方法的突出优点在于: (1) 通过极化和超分辨的联合处理, 实现了对目标相干散射矩阵的精确提取. 从而为利用极化信息进行目标识别提供了基础; (2) 利用全极化信息, 改善了数据的信噪比, 提高了参数估计的精度; (3) 利用信号子空间的旋转不变性, 避免了对多维信号子空间的搜索, 提高了算法的实时性. 仿真和实测数据均证实了该方法的有效性. 值得一提的是, 文章首次给出了散射中心位置、散射强度、相干相位等参数估计的克拉美罗限与全极化模型参数的关系, 这为超分辨成像算法的性能评价提供了理论依据.

**关键词:** 超分辨; 二维 ESPRIT; 全极化; 克拉美罗限; 性能分析

中图分类号: TN95 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2009)12-2681-07

## Two-Dimensional ESPRIT Super-Resolution Feature Extraction Using Fully Polarized Measurements and Its Performance Analysis

XING Shi-qi, DAI Da-hai, WANG Xue-song, WANG Tao

(School of Electronic and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** In this paper, a polarimetric super processing method based on ESPRIT is proposed, and the CRB of scattering centers parameters estimation, including position, intensity and coherent phase are derived. Experiments reveal that the performance of the proposed method is very close to CRB. Superiorities of our method relies on the following processing techniques: (1) joint processing of super resolution and full polarization, which enables extraction of coherent scattering matrix of target; (2) utilization of fully polarized backscattered data, which improves SNR and enhances the performance of estimation; (3) utilization of the rotational invariance property of signal subspace, which greatly reduces computational burden by avoiding multi-dimensional search. Simulation and real data experiments validate its effectiveness. The conclusion is meaningful to polarimetric super resolution imaging, algorithm evaluation, polarization feature extraction and recognition, and high resolution polarized radar system design.

**Key words:** super resolution; 2-D ESPRIT (estimation of signal parameters via rotational invariance techniques); full polarization; Cramer Rao bound; performance analysis

### 1 引言

理论计算和实验测量均表明目标总的电磁散射可以认为是由某些局部位置上的电磁散射所合成的, 这些局部性的散射源通常被称为目标的散射中心<sup>[1]</sup>. 目标散射中心是目标在高频区散射的基本特征之一, 重构高可信度的雷达目标散射中心不仅有助于深入理解复杂目标的电磁散射机理, 而且对雷达目标特性数据建模、建库以及自动目标识别(Automatic Target Recognition, ATR)

均有重要意义.

在宽带测量条件下, 通过傅立叶变换就可以得到包含细节特征的高分辨像, 但是这种非参数方法不能区分位于同一单元内的多个散射中心<sup>[2]</sup>. 自 20 世纪 70 年代以来, 利用参数化方法提取散射中心逐步成为研究热点, 并涌现出了众多超分辨算法, 如 Pisarenko 的谐波分析法, Burg 的最大熵谱法, Capon 的最小方差法. Tuffs 和 Kumaresan 认为基于线性预测的超分辨算法不能有效利用加性噪声的统计特性, 因而性能较差<sup>[3]</sup>. 20 世纪 70 年



$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{3M_p} (\mathbf{X} * \mathbf{X}^H) \quad (8)$$

对  $\hat{\mathbf{R}}$  进行特征分解, 并取最大  $L$  个特征值对应特征向量构成  $\mathbf{U}_L$ , 它与  $\mathbf{A}_{\text{sub}}$  均张成了信号子空间, 因此两者可以通过一个满秩矩阵  $\mathbf{B}$  相互线性表示.

$$\mathbf{U}_L = \mathbf{A}_{\text{sub}} \mathbf{B} \quad (9)$$

对  $\mathbf{U}_L, \mathbf{A}_{\text{sub}}$  进行抽取, 抽取规则如下:

(1) 删去  $\mathbf{U}_L, \mathbf{A}_{\text{sub}}$  的第  $kn_a$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) 行以及最后  $n_a$  行得到  $\mathbf{U}_0, \mathbf{A}_0$ ;

(2) 删去  $\mathbf{U}_L, \mathbf{A}_{\text{sub}}$  的第  $kn_a + 1$  ( $k = 0, 1, \dots$ ) 行以及最后  $n_a$  行得到  $\mathbf{U}_i, \mathbf{A}_i$ ;

(3) 删去  $\mathbf{U}_L, \mathbf{A}_{\text{sub}}$  的前  $n_a$  行以及第  $kn_a$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) 行得到  $\mathbf{U}_f, \mathbf{A}_f$ .

$$\text{此时有: } \mathbf{A}_0 = \mathbf{U}_0 \mathbf{B}; \mathbf{A}_i = \mathbf{U}_i \mathbf{B}; \mathbf{A}_f = \mathbf{U}_f \mathbf{B} \quad (10)$$

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{A}_0 \mathbf{D}_i \mathbf{A}_f = \mathbf{A}_0 \mathbf{D}_f \quad (11)$$

其中,  $\mathbf{D}_i, \mathbf{D}_f$  均为  $L$  阶对角阵,

$$\mathbf{D}_i(k, k) = \exp\left(-j \frac{4\pi f_c \Delta \theta y_k}{c}\right)$$

$$\mathbf{D}_f(k, k) = \exp\left(-j \frac{4\pi \Delta f x_k}{c}\right) \quad (12)$$

所以:

$$\mathbf{U}_0 \mathbf{B} \mathbf{D}_i = \mathbf{U}_i \mathbf{B} \Rightarrow \mathbf{R}_i \mathbf{B} = \mathbf{B} \mathbf{D}_i \quad (13)$$

$$\mathbf{U}_0 \mathbf{B} \mathbf{D}_f = \mathbf{U}_f \mathbf{B} \Rightarrow \mathbf{R}_f \mathbf{B} = \mathbf{B} \mathbf{D}_f \quad (14)$$

其中  $\mathbf{R}_i = (\mathbf{U}_0^H \mathbf{U}_0)^{-1} \mathbf{U}_0^H \mathbf{U}_i$ ,  $\mathbf{R}_f = (\mathbf{U}_0^H \mathbf{U}_0)^{-1} \mathbf{U}_0^H \mathbf{U}_f$ . 式(13)、(14)的求解可以采用如下顺序: 首先利用式(13)求得  $\mathbf{D}_i$  和  $\mathbf{B}$ , 然后将  $\mathbf{B}$  带入式(14)求得  $\mathbf{D}_f = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{R}_f \mathbf{B}$ . 与独立求解式(13)、式(14)相比, 这种求解方法可以避免对求得的  $\{x_1 \ x_2 \ \dots \ x_L\}, \{y_1 \ y_2 \ \dots \ y_L\}$  进行配对以得到各散射点二维坐标. 利用式(12), 易求得  $x_k, y_k$ , 进而得到阵列流型  $\mathbf{A}$ . 最后通过最小二乘估计得到散射中心散射矩阵的估计<sup>[5]</sup>.

$$\mathbf{S} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{Z} \quad (15)$$

$$\text{其中 } \mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{\text{HH}}^1 & s_{\text{HV}}^1 & s_{\text{VV}}^1 \\ s_{\text{HH}}^2 & s_{\text{HV}}^2 & s_{\text{VV}}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{\text{HH}}^L & s_{\text{HV}}^L & s_{\text{VV}}^L \end{bmatrix}, \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \text{vec}(\mathbf{Y}_{\text{HH}})^H \\ \text{vec}(\mathbf{Y}_{\text{HV}})^H \\ \text{vec}(\mathbf{Y}_{\text{VV}})^H \end{bmatrix}^H$$

### 3.2 散射点数目估计与极化白化滤波

以上推导都假定了散射点数目已知, 实际中散射点数目需要估计. 文献[6]认为可以根据  $\hat{\mathbf{R}}$  的各特征值相对于最大特征值的大小来估计散射点数目. 这种方法具有很大的随意性, 对于不同的数据, 门限需要调整. 目前应用较多的模型定阶方法包括基于信息论准则的 AIC<sup>[11]</sup>、MDL<sup>[12]</sup> 方法, 以及盖氏圆盘<sup>[3]</sup> 方法. 实验表明, 对于散射中心数目估计问题, 盖氏圆盘法性能更好. 因此本文采用盖氏圆盘法估计散射中心数目.

上一节推导了极化白噪声环境中的二维全极化 ESPRIT 方法. 当各通道噪声相关时, 需要进行预白化滤波<sup>[13]</sup>. 极化白化滤波后, 3.1 节特征提取方法仍然适用.

### 3.3 小结

本节推导了 ISAR 雷达目标的二维全极化 ESPRIT 超分辨特征提取的原理及实现方法. 这种超分辨方法的关键思想包括: (1) 利用空间平滑思想估计数据协方差阵, 进而估计信号子空间; (2) 利用信号子空间旋转不变性估计散射点位置, 进而估计散射矢量. 二维全极化 ESPRIT 特征提取方法实现流程如下:

(1) 对极化色噪声进行白化滤波;

(2) 划分子阵, 根据式(8)估计数据协方差阵;

(3) 对  $\hat{\mathbf{R}}$  作特征值分解, 利用盖氏圆盘法估计散射点数目, 得到  $\mathbf{U}_L$ ;

(4) 对  $\mathbf{U}_L$  和  $\mathbf{A}_{\text{sub}}$  进行抽取, 并计算  $\mathbf{R}_i$  和  $\mathbf{R}_f$ ;

(5) 根据式(13)、(14)计算  $\mathbf{D}_i$  和  $\mathbf{D}_f$ , 并利用式(12)估计散射点位置;

(6) 利用最大似然估计各散射点散射矢量.

## 4 二维全极化参数估计克拉美罗限

全极化 ISAR 超分辨特征提取包括对散射中心位置, 散射点极化矢量的估计. 待估计的参数集合可写作下式:

$$\boldsymbol{\theta} = [\text{Re}(s^T) \ \text{Im}(s^T) \ \mathbf{x}^T \ \mathbf{y}^T]^T$$

其中  $s = \text{vec}(\mathbf{S})$ . 观测数据的似然函数为:

$$p(\mathbf{Z} | \boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{\pi^{3MN} |\mathbf{R}|} \cdot \exp\{-[\mathbf{z} - (\mathbf{I}_3 \otimes \mathbf{A})\mathbf{s}]^H \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - (\mathbf{I}_3 \otimes \mathbf{A})\mathbf{s}]\} \quad (16)$$

其中  $\mathbf{R} = \mathbf{C} \otimes \mathbf{I}_{MN}$ ,  $\mathbf{z} = \text{vec}(\mathbf{Z})$ ,  $\mathbf{C}$  为噪声极化协方差阵.

文献[14]推导了 GTD 模型的目标散射中心参数提取的克拉美罗限, 但是该文只讨论了一维高分辨的情况, 也没有考虑全极化的情形. 对于全极化 ISAR 雷达, 利用超分辨方法可以提取目标的二维全极化散射中心. 因此需要研究目标二维全极化散射中心提取的克拉美罗限, 这是二维全极化超分辨算法性能评价的重要依据. 下面推导二维散射中心提取的克拉美罗限. 通过对似然函数关于各待估参数求导, 进而计算 Fisher 矩阵, 可以得到待估参数 CRB 矩阵为:

$$\text{CRB}_{\boldsymbol{\theta}} = \frac{1}{2} (E\{\text{Re}(\mathbf{h}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{h})\})^{-1} \quad (17)$$

其中

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} (\mathbf{I}_3 \otimes \mathbf{A}), j(\mathbf{I}_3 \otimes \mathbf{A}), \begin{bmatrix} \Phi \mathbf{A} \mathbf{S}_{\text{HH}} \\ \Phi \mathbf{A} \mathbf{S}_{\text{HV}} \\ \Phi \mathbf{A} \mathbf{S}_{\text{VV}} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{D} \mathbf{A} \mathbf{S}_{\text{HH}} \\ \mathbf{D} \mathbf{A} \mathbf{S}_{\text{HV}} \\ \mathbf{D} \mathbf{A} \mathbf{S}_{\text{VV}} \end{bmatrix} \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{D} &= -j \frac{4\pi f_c}{c} \mathbf{I}_N \otimes \begin{bmatrix} \theta_0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \theta_1 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \theta_{M-1} \end{bmatrix}, \\
 \Phi &= -j \frac{4\pi}{c} \begin{bmatrix} f_0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & f_1 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & f_{N-1} \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_M, \\
 \mathbf{S}_{pq} &= \begin{bmatrix} s_{pq}^1 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & s_{pq}^L \end{bmatrix} \quad (18)
 \end{aligned}$$

式(17)较为复杂,各待估参数 CRB 的解析形式很难得到.考虑一种较为简单的形式:当各散射点间隔远大于分辨单元时,各散射点相互影响较小,对它们的估计可以认为是独立行为<sup>[15]</sup>,此时各散射点参数估计的 CRB 与理想单点散射情形时相近.下面分析理想单点散射模型中,各参数估计的 CRB.

#### 4.1 散射中心位置参数估计克拉美罗限

将式(1)展开后利用矩阵求逆引理<sup>[16]</sup>,可以求得如下结果:

$$\text{CRB}_x = \frac{1}{2} \frac{1}{s^H \mathbf{C}^{-1} s} \frac{1}{\mathbf{A}^H \Phi^H \mathbf{E} \Phi \mathbf{A}} \quad (19)$$

$$\text{CRB}_y = \frac{1}{2} \frac{1}{s^H \mathbf{C}^{-1} s} \frac{1}{\mathbf{A}^H \mathbf{D}^H \mathbf{E} \mathbf{D} \mathbf{A}} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
 \text{CRB}[\text{Re}(s); \text{Im}(s)] &= \frac{1}{2NM} \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{C}) & -\text{Im}(\mathbf{C}) \\ \text{Im}(\mathbf{C}) & \text{Re}(\mathbf{C}) \end{bmatrix} \\
 &+ \mu \begin{bmatrix} \text{Im}(s) \text{Im}^T(s) & -\text{Im}(s) \text{Re}^T(s) \\ -\text{Re}(s) \text{Im}^T(s) & \text{Re}(s) \text{Re}^T(s) \end{bmatrix} \quad (21)
 \end{aligned}$$

其中  $\mathbf{E} = (\mathbf{I}_{MN} - \mathbf{A}(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H)$ ,

$$\mu = \frac{1}{2} \left( \frac{\mathbf{A}^H \Phi^H \mathbf{A} \mathbf{A}^H \Phi \mathbf{A}}{\mathbf{A}^H \Phi^H \mathbf{E} \Phi \mathbf{A}} + \frac{\mathbf{A}^H \mathbf{D}^H \mathbf{A} \mathbf{A}^H \mathbf{D} \mathbf{A}}{\mathbf{A}^H \mathbf{D}^H \mathbf{E} \mathbf{D} \mathbf{A}} \right)$$

化简式(19)~(20)后得到:

$$\text{CRB}_x \approx \frac{1}{MN s^H \mathbf{C}^{-1} s} \frac{3\delta_x^2}{2\pi^2}, \text{CRB}_y \approx \frac{1}{MN s^H \mathbf{C}^{-1} s} \frac{3\delta_y^2}{2\pi^2} \quad (22)$$

其中  $\delta_x$ 、 $\delta_y$  分别为雷达距离向和方位向的分辨率,

$$\delta_x = \frac{c}{2(N-1)\Delta f}, \delta_y = \frac{c}{2f_c(M-1)\Delta\theta} \quad (23)$$

对于阵列信号,其信噪比可以用信号分量的总能量与噪声功率比值来定义<sup>[18]</sup>.将其扩展至极化阵列信号,则本文中极化阵列信号信噪比可以定义如式:

$$\text{SNR} = MN s^H \mathbf{C}^{-1} s \quad (24)$$

特别地,单极化条件下,阵列信号信噪比将退化为:

$$\text{SNR}_{pq} = MN \frac{|s_{pq}|^2}{\sigma_{pq}^2} \quad (25)$$

单极化条件下位置参数估计的克拉美罗限仍然满足式(22),其中信噪比为单极化阵列信噪比.根据式(22)、(24),可以得出如下重要结论:位置参数估计的克

拉美罗限只与雷达分辨率及阵列信噪比有关,克拉美罗限与前者成二次幂关系,与后者成反比关系.提高雷达分辨率及阵列信噪比将有助于散射中心位置参数的估计.

#### 4.2 散射强度 $|s_{pq}|$ 及相干相位估计克拉美罗限

极化超分辨特征提取既包括对目标非相干参数的估计,又包括对目标相干参数的估计<sup>[17]</sup>.非相干参数包括散射中心位置、数目、以及散射强度等.相干参数包括散射矩阵元素的相位,尤其是各元素间的相对相位,这是准确描述目标极化特性的重要信息<sup>[6]</sup>.推导散射强度和散射矩阵元素间相对相位的 CRB 对评价算法性能具有重要意义.

利用式(21),并根据矢量参数 CRB 变换法则<sup>[17]</sup>,可以求得散射强度及散射矩阵各元素相对相位估计的 CRB 为:

$$\text{CRB}_{A_{pq}} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{pq}^2}{MN} \quad (26)$$

$$\begin{aligned}
 \text{CRB}_{\phi(\text{HH}-\text{VV})} &= \frac{1}{2MN} \frac{\begin{vmatrix} C_{11} & C_{13} \\ C_{31} & C_{33} \end{vmatrix}}{A_{\text{VV}}^2 A_{\text{HH}}^2} \begin{bmatrix} s_{\text{HH}} \\ s_{\text{VV}} \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} C_{11} & C_{13} \\ C_{31} & C_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} s_{\text{HH}} \\ s_{\text{VV}} \end{bmatrix} \quad (27)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CRB}_{\phi(\text{HH}-\text{HV})} &= \frac{1}{2MN} \frac{\begin{vmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{vmatrix}}{A_{\text{HV}}^2 A_{\text{HH}}^2} \begin{bmatrix} s_{\text{HH}} \\ s_{\text{HV}} \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} s_{\text{HH}} \\ s_{\text{HV}} \end{bmatrix} \quad (28)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CRB}_{\phi(\text{HV}-\text{VV})} &= \frac{1}{2MN} \frac{\begin{vmatrix} C_{22} & C_{23} \\ C_{32} & C_{33} \end{vmatrix}}{A_{\text{VV}}^2 A_{\text{HV}}^2} \begin{bmatrix} s_{\text{HV}} \\ s_{\text{VV}} \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} C_{22} & C_{23} \\ C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} s_{\text{HV}} \\ s_{\text{VV}} \end{bmatrix} \quad (29)
 \end{aligned}$$

其中  $A_{pq} = |s_{pq}|$ ,  $C_{ij}$  表示  $\mathbf{C}$  矩阵第  $i$  行  $j$  列元素.  $\phi_{(\text{HH}-\text{VV})}$  为 HH 通道散射系数与 VV 通道散射系数的相位差,  $\phi_{(\text{HH}-\text{HV})}$ ,  $\phi_{(\text{HV}-\text{VV})}$  类似.与式(24)类似,可定义单极化条件下阵列信噪比为  $\text{SNR}_{pq} = MN \frac{|s_{pq}|^2}{\sigma_{pq}^2}$ .因此散射强度估计的相对精度克拉美罗限为:

$$\frac{\text{CRB}_{|s_{pq}|}}{A_{pq}^2} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{pq}^2}{MNA_{pq}^2} = \frac{1}{2} \frac{1}{\text{SNR}_{pq}} \quad (30)$$

对于理想单点散射模型,根据式(26)~式(30),可以得出以下结论:

(1)  $pq$  通道散射强度 CRB 与噪声功率成正比,与阵列大小成反比.相对精度只与  $pq$  通道的阵列信噪比有关,且成反比例关系;

(2) 各通道散射系数相位差的估计极限精度与阵列大小、目标极化特性、杂波极化特性均有关.

## 5 二维全极化 ESPRIT 成像实验及性能分析

### 5.1 仿真实验

#### 5.1.1 不同信噪比条件下二维全极化 ESPRIT 估计性能

设定具有单个散射中心的目标, 仿真时雷达载频 10GHz, 频率步进 10MHz, 带宽 200MHz. 目标转角  $3^\circ$ , 方位向采样间隔  $0.2^\circ$ . 极化阵列信噪比变化范围为  $-5\text{dB} \sim 35\text{dB}$ , 通过改变噪声强度来改变信噪比. 每个信噪比进行 500 次蒙特卡罗仿真.

图 3 描述了散射中心各参数估计的均方差以及克拉美罗限随信噪比变化关系. 图中散射强度的估计均方差、克拉美罗限均用真实散射强度作了如下归一化:

$$std_{\text{norm}}(|s_{pq}|) = \frac{std(|s_{pq}|)}{|s_{pq}|}, \text{CRB}_{\text{norm}}(|s_{pq}|) = \frac{\text{CRB}(|s_{pq}|)}{|s_{pq}|^2} \quad (31)$$

从图 3 可以得出以下结论:

(1) 阵列信噪比较低时, 估计方差与克拉美罗限相

差较大, 性能不佳. 阵列信噪比较高时, 估计精度接近克拉美罗限. 以距离向位置参数估计为例, 仿真数据表明在极化阵列信噪比为 20dB 时, 估计均方差比克拉美罗限高 6dB, 当阵列信噪比达到 35dB 时, 估计均方差比克拉美罗限高 1.7dB. 进一步分析可知, 当阵列信噪比高于 20dB 时, 信噪比每提升 3dB, 估计精度约提高一倍;

(2) 散射矢量各元素相位差是描述目标极化特性的重要信息. 在  $\text{SNR} = 15\text{dB}$  时, 相干相位估计均方差较克拉美罗限约高 3dB.  $\text{SNR} = 20\text{dB}$  时, 估计性能几乎达到克拉美罗限. 这表明二维全极化 ESPRIT 方法能够很好地保持目标散射矢量的相干特性, 这为极化特征识别提供了前提;

(3) 各通道散射强度估计的相对精度只与各通道的阵列信噪比有关. 通道的信噪比越高, 则该通道散射强度估计的相对精度越高. 在  $\text{SNR}_{pq} = 15\text{dB}$  时, 散射强度的估计相对误差大约为 10%, 接近克拉美罗限.

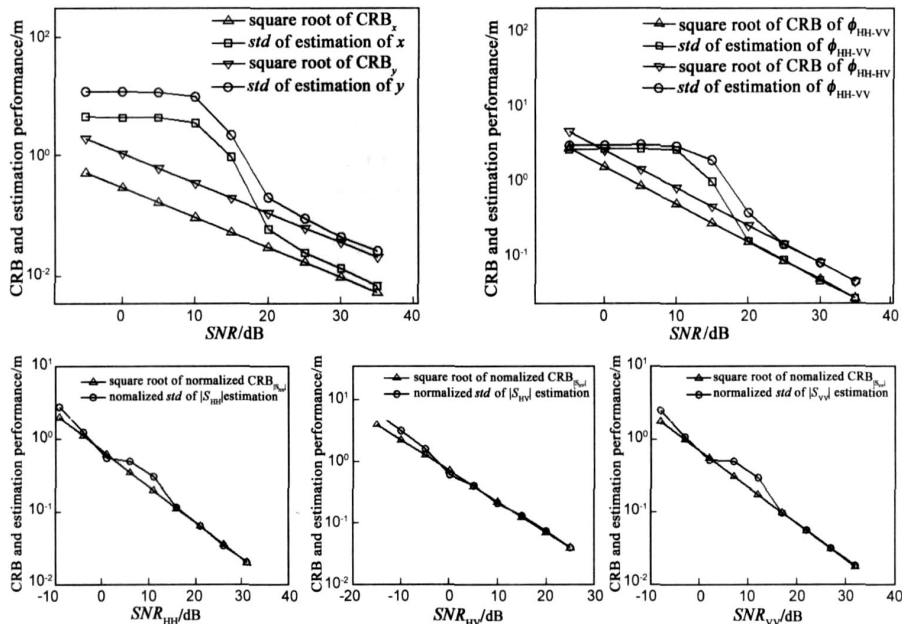


图 3 不同信噪比条件下二维全极化 ESPRIT 方法估计性能

#### 5.1.2 典型杂波环境中二维全极化与单极化 ESPRIT 性能比较

设定具有单个散射中心的目标, 分别处在海洋、草地、公园等 3 种典型的极化色噪声杂波环境中, 各类杂波散射矩阵根据文献 [13] 设置. 目标散射中心类型选择为球类散射中心和二面角散射中心, 散射矩阵分别为

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ 和 } \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

表 1 为 HH 单极化 ESPRIT 与全极化 ESPRIT 方法对两类散射中心位置参数估计性能表, 仿真时极化阵列信噪比设为 20dB, 其它参数同上. 从表中可以看到无论

表 1 全极化与单极化 ESPRIT 对两类散射中心估计性能

		球类散射中心		二面角散射中心	
		$x(m)$	$y(m)$	$x(m)$	$y(m)$
海洋	全极化估计标准差	0.0599	0.1919	0.0600	0.1888
	HH 极化估计标准差	0.3888	0.5528	4.1432	11.419
草地	全极化估计标准差	0.0554	0.1924	0.0632	0.1912
	HH 极化估计标准差	0.0830	0.2684	0.0859	0.2810
公园	全极化估计标准差	0.0594	0.2013	0.0610	0.1898
	HH 极化估计标准差	0.0630	0.2140	0.0817	0.2670
$\sqrt{\text{CRB}}$		0.0292	0.1116	0.0292	0.1116

是何种杂波环境, 全极化估计性能总是优于单极化估计性能. 图 4、图 5 给出了海杂波环境中, 单极化 ESPRIT 与全极化 ESPRIT 对球类散射中心位置估计的性能与信噪

比关系. 限于篇幅, 其它杂波环境的实验结果没有给出.

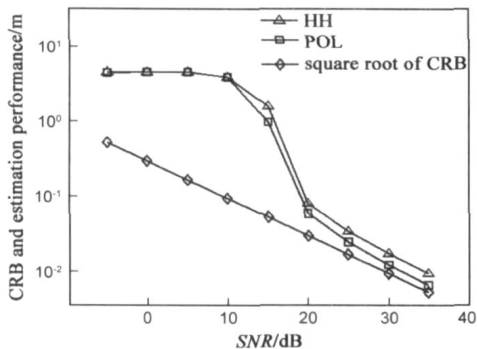


图4 距离向位置估计性能比较图

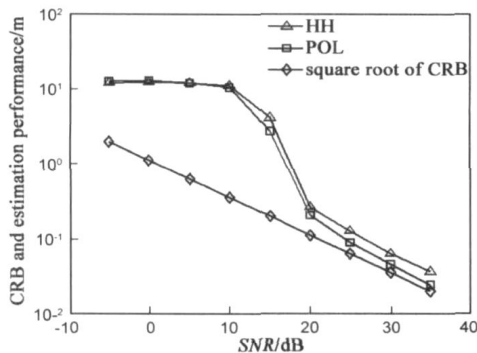


图5 方位向位置估计性能比较图

### 5.2 基于暗室测量数据的 ISAR 雷达目标散射中心提取

本节利用二维全极化 ESPRIT 方法对该弹头模型的暗室测量数据成像. 该测量数据起始频率 8.75G, 频率

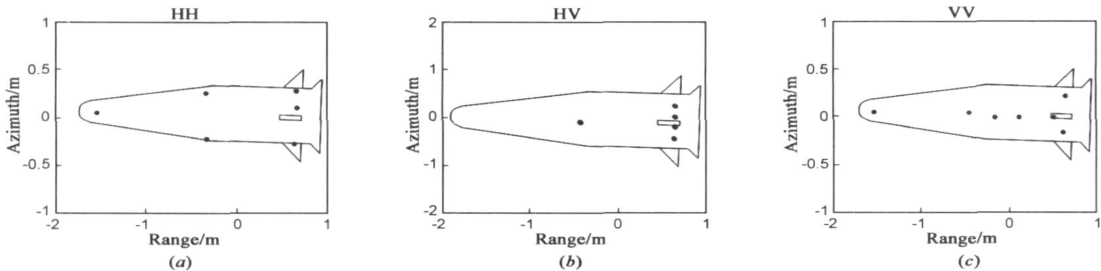


图8 二维单极化ESPRIT方法成像结果

## 6 总结

本文针对高分辨极化测量雷达体制, 提出了一种新的二维全极化超分辨特征提取方法, 并分析了其性能. 文章的主要贡献包括: (1) 基于 ISAR 回波数据模型, 推导了二维全极化 ESPRIT 超分辨特征提取的原理, 给出了完整的实现流程; (2) 首次得到了二维全极化散射中心估计的克拉美罗限, 给出了散射中心位置、散射强度、相干相位估计的克拉美罗限与模型参数的关系; (3) 结合仿真实验, 研究了本文方法的工作性能与阵列信噪比关系, 以及典型极化杂波机理中, 全极化 ESPRIT

步进 20MHz, 频点数目 101, 对应带宽 2GHz. 目标方位转角范围  $6^\circ$ , 方位向脉冲积累数目 30 个. 图 6 给出了该弹头的模型照片.

图 7 为二维全极化 ESPRIT 方法成像图, 图 8 给出了二维单极化 ESPRIT 成像结果. 图 7 表明在鼻锥方向观测时, 该弹头目标存在 7 个强散射中心, 头部 1 个、中部 3 个、尾部 3 个. 二维全极化 ESPRIT 方法成像结果很好地体现了弹头的外形结构. 更为重要的是, 全极化方法能够提取目标的极化特征, 如相干散射矩阵. 这里限于篇幅, 没有给出提取到的目标散射矩阵. 观察 HV 单极化 ESPRIT 成像效果图, 头部散射中心没能提取. 这是因为头部类似球或平板类散射中心, 共极化分量较大, HV 极化分量为 0. 对于单极化成像来说, 它只能提取在该极化方向上有散射分量的散射点, 因而不能完整反映目标的各种散射机理. 而全极化成像方法则可有效避免这个缺陷. 利用全极化散射中心提取结果估计目标尺寸和其他特征都更加稳健.

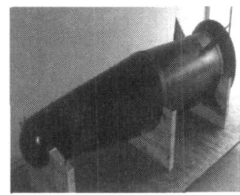


图6 某弹头模型照片

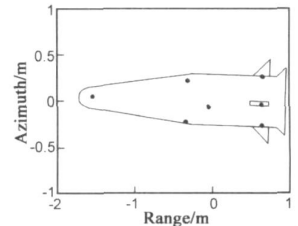


图7 二维全极化ESPRIT成像结果

与单极化 ESPRIT 的性能差异. 仿真结果均与克拉美罗限进行了对比; (4) 利用暗室测量数据比较了常规成像方法与本文方法的性能差异. 本文新方法与已有方法相比主要优点包括具备极化特征提取能力、参数估计的精度更高、无需进行散射中心关联、运算量小等.

本文工作具有重要的理论与工程意义. 二维全极化参数估计克拉美罗限既可以作为评价其他众多超分辨算法性能的理论依据, 也可以用来指导极化高分辨雷达系统设计.

## 参考文献:

- [1] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006. 2.
- [2] 周健雄, 石志广, 付强. 雷达目标散射中心参数估计的极限性能分析[J]. 电子学报, 2006, 34(4): 726-731.
- [3] 王永良, 陈辉, 彭应宁, 万群. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [4] R O Schmidt. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Transaction on AP, 1986, 34(3): 276-280.
- [5] Richard Roy, Thomas Kailath. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. IEEE Transaction on ASSP, 1989, 37(7): 984-995.
- [6] Michael L Burrows. Two dimensional ESPRIT with tracking for radar imaging and feature extraction[J]. IEEE Transaction on AP, 2004, 52(3): 524-532.
- [7] 庄钊文, 肖顺平, 王雪松. 雷达极化信息处理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [8] 王雪松. 宽带极化信息处理的研究[D]. 湖南长沙: 国防科技大学, 1999. 6
- [9] 代大海, 王雪松, 肖顺平. 基于二维 CP GTD 模型的全极化 ISAR 超分辨成像[J]. 自然科学进展, 2007, 17(10): 1439-1448.
- [10] K T Kim, S W Kim, H T Kim. Two dimensional ISAR imaging using full polarimetric and super resolution processing techniques[J]. IEE Proc Radar, Sonar Navig., 1998, 145(4): 240-246.
- [11] Mati Wax, Thomas Kailath. Detection of signal by information theoretic criteria[J]. IEEE Trans on SSP, 1985, 33(2): 387-391.
- [12] Rissanen J. Modeling by shortest data description[J]. Automatica, 1978, 14: 465-471.
- [13] Guoqing Liu, Shunji Huang, A Torre, F Rubertone. The multilook polarimetric whitening filter (MPWF) for intensity speckle reduction in polarimetric SAR images[J]. IEEE Trans on GRS, 1998, 36(3): 1016-1020.
- [14] J Zhou, H Zhao, Z Shi, Q Fu. Analytic performance bounds on estimates of scattering center parameters[J]. IEEE Trans on AES, 2007, 43(2): 813-825.
- [15] 周剑雄. 光学区雷达目标三维散射中心重构理论和技术[D]. 湖南长沙: 国防科学技术大学, 2006. 4.
- [16] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 9.
- [17] Steven M. Kay. Fundamentals of Statistical Signal Processing Estimation Theory[M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1993.
- [18] H Lee, F Li. Quantification of the difference between detection and resolution thresholds for multiple closely spaced emitters[J]. IEEE Trans on ASSP, 1993, 41(6): 2274-2277.
- [19] Lee C Potter, Chiang Dar ming, Rob Carriere, Michael J. Gerdy. A GTD based parametric model for scattering[J]. IEEE Trans on AP, 1995, 43(10): 1058-1067.

## 作者简介:



邢世其 男, 1984 年 12 月出生于江西省九江市, 2006 年毕业于国防科技大学通信工程专业, 2008 年 3 月免试提前攻读国防科技大学信息与通信工程专业博士学位, 研究方向为极化雷达成像、雷达信号处理、雷达目标几何结构反演与识别. E-mail: xingshiqi\_paper@163.com



代大海 男, 1980 年 12 月生于河南信阳, 2002 年 6 月毕业于国防科技大学电子科学与工程学院电磁场与微波技术专业, 次年 12 月获该院信息与通信工程专业硕士学位, 08 年 6 月获工学博士学位, 现为国防科技大学讲师, 研究方向为极化雷达成像、雷达信号处理与目标识别, 已发表文章 20 余篇.



王雪松 男, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, “三遥”分会委员. 1994 年 7 月毕业于国防科技大学电子技术系, 1999 年 6 月获博士学位. 主要从事雷达极化信息处理、信号处理与目标检测及识别、弹道导弹攻防对抗电子战等领域的研究. 承担和参加了多项科研项目, 博士学位论文《宽带极化信息处理的研究》被评为 2001 年度“全国百篇优秀博士学位论文”. 合作出版专著 2 部, 在国际、国内期刊及学术会议上发表论文 100 余篇, 其中 30 多篇进入 SCI 和 EI 等国际检索.