

基于 CP-GTD 模型的三维散射中心参数估计

徐少坤, 刘记红, 魏玺章, 黎 湘

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 散射中心是目标光学区电磁散射的基本特征, 可反映目标精细物理结构. 在建立精确描述目标高频电磁散射的三维 CP-GTD 模型的基础上, 根据散射中心类型和位置参数的弱耦合性, 提出基于三维 ESPRIT 方法估计目标全极化三维散射中心的位置, 进而利用特征分析中信号子空间与噪声子空间的正交性和最小二乘方法, 实现散射中心类型和相干极化散射矩阵的估计. 与现有基于单极化观测模型的估计方法相比, 所提方法不仅具有更好的估计性能与抗噪能力, 而且能够直接估计出目标散射中心的相干散射矩阵, 仿真实验验证了上述结论的正确性.

关键词: CP-GTD 模型; 三维散射中心; 参数估计; 相干散射矩阵

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 12-2755-06

Parameter Estimation of 3D Scattering Centers Based on CP-GTD Model

XU Shao-kun, LIU Ji-hong, WEI Xi-zhang, LI Xiang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: As a basic characteristic of radar target in high frequency domain, scattering centers can characterize its elaborate physical structure. Using the weak coupling property between the type and position parameters of a scattering center, the three-dimensional (3D) position parameters were estimated via an ESPRIT method based on the foundation of 3D Coherent Polarimetric GTD (CP-GTD) model. Then the types of scattering centers were estimated on the orthogonality between the signal subspace and noise subspace, while the least square method was used to calculate the coherent polarimetric scattering matrices. Compared to existing estimation methods based on the mono-polarization model, the proposed method provides better estimation performance and stronger noise resistance, and can estimate the coherent scattering matrices of scattering centers directly. Simulation results show its effectiveness and robustness.

Key words: coherent polarimetric GTD model; 3D scattering center; parameter estimation; coherent scattering matrix

1 引言

散射中心是目标在光学区电磁散射的基本特征之一, 它能够反映目标精细的物理结构, 建立目标的散射中心模型对光学区目标电磁特征的描述与提取颇具指导意义^[1]. 目标的一维及二维散射中心模型参数估计技术已经发展的比较成熟^[1~5], 但它们只能反映目标在某个姿态或成像平面内的投影信息, 部分的反映目标的几何结构特征; 目标三维散射中心模型能够反映目标在三维空间的结构特征, 对目标的描述更加全面和稳定, 是目前光学区目标散射中心建模的主要发展方向^[6~10].

构建雷达目标三维散射模型通常有两种思路, 其一是联合多个观测视角下的一维散射中心模型重构目标的三维散射模型^[6~8], 基本思想是利用同一个散射中心在不同视线方向上的投影分布规律重构其三维分布, 重

构的三维散射中心可反映目标在小角度范围内的目标特性, 但实际情况中, 随着观测视角的增大, 各观测视角下的一维散射中心之间的关联难以实现. 另一种思路是在观测视角可控的条件下, 利用雷达在俯仰方向作线性运动形成合成孔径, 从而实现三维成像. 美国乔治亚技术研究所和空军实验室利用 E-CSAR 研究了转台目标的三维成像^[9], 文献^[10]基于理想点散射模型, 利用超分辨的方法实现了三维散射中心的位置参数估计.

极化与高分辨的结合是雷达目标识别极具应用前景的研究方向之一^[2~5, 11], 高分辨成像技术大大降低了极化描述模型的模糊性, 而极化信息则与目标的形状有着本质的联系, 可以反映目标表面粗糙度、对称性和取向等其它参数难以表征的信息, 使得高分辨技术描述的目标结构信息更为全面. 文献^[4]将 GTD 模型简化为 DE 模型, 将全极化散射中心的参数估计问题转化为全极化

信息融合的约束总体最小二乘算法问题,实现了目标一维散射中心位置、类型参数以及相干极化散射矩阵等特征参数的提取.文献[5]建立了基于全极化雷达的相干极化 GTD (Coherent Polarimetric GTD, CP-GTD) 模型,并提出了一种基于二维 CP-GTD 模型的全极化 ISAR 超分辨成像方法,利用二维 MUSIC 方法实现了全极化 ISAR 二维散射中心的特征提取.目前,对目标三维散射中心类型、位置及相干散射矩阵等特征参数的全面估计方法一直没有展开研究.

本文研究了全极化测量条件下的目标三维散射中心参数估计方法.针对转台-弧形导轨测量方法,建立了能够描述高频电磁散射机理的三维 CP-GTD 信号模型,提出了一种三维散射中心特征提取方法.该方法基于散射中心类型和位置参数的弱耦合性,利用三维 ESPRIT 方法实现了三维散射中心的位置估计,然后分别利用特征分析中信号子空间与噪声子空间的正交性和最小二乘法实现对散射中心的类型以及相干极化散射矩阵的估计.与文献[9,10]的方法相比,本文方法不仅具有更高的参数估计精度与抗噪性能,而且能够直接估计出目标散射中心的相干散射矩阵.

2 转台目标三维 CP-GTD 信号模型

不失一般性,设双通道极化为水平极化 H 和垂直极化 V.如图 1 所示,在目标本体坐标系 $O-XYZ$ 中,假设测量天线可以在弧形导轨上运动,从而在俯仰方向产生合成孔径.为方便起见,将转台旋转等效为雷达绕转台运动.

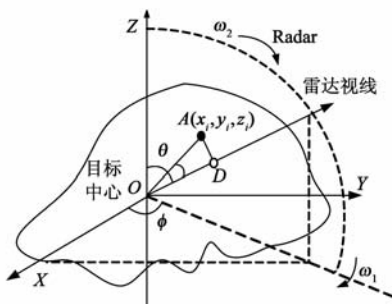


图1 三维测量系统模型

图 1 中, θ 、 ϕ 分别为雷达视线的俯仰角和方位角.假设目标由 I 个散射中心组成,考虑相干极化 GTD 模型,目标的散射回波可表示为

$$\mathbf{E}^{\text{SC}} = \sum_{i=1}^I \exp\left(-j \frac{4\pi f r_i}{c}\right) \left(j \frac{f}{f_0}\right)^{\alpha_i} \mathbf{S}_i \mathbf{E}^{\text{in}} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{E}^{\text{in}} = \begin{bmatrix} E_{\text{H}}^{\text{in}}(f, \theta, \phi) \\ E_{\text{V}}^{\text{in}}(f, \theta, \phi) \end{bmatrix}$, $\mathbf{E}^{\text{SC}} = \begin{bmatrix} E_{\text{H}}^{\text{SC}}(f, \theta, \phi) \\ E_{\text{V}}^{\text{SC}}(f, \theta, \phi) \end{bmatrix}$ 分别表示入射信号和目标散射信号, E_{H} 、 E_{V} 分别为水平极化分量和垂直极化分量; $\mathbf{S}_i = \begin{bmatrix} s_{i,\text{HH}}(f, \theta, \phi) & s_{i,\text{HV}}(f, \theta, \phi) \\ s_{i,\text{VH}}(f, \theta, \phi) & s_{i,\text{VV}}(f, \theta, \phi) \end{bmatrix}$

为目标第 i 个散射中心的散射矩阵, $s_{i,pq}$ 为其在 q 发射极化 p 接收极化状态下的复散射系数 ($p, q = \text{H}$ 或 V); f 为信号频率, f_0 为信号载频, r_i 为目标第 i 个散射中心与参考中心的距离, α_i 是散射中心对频率的依赖因子,表征散射中心的类型,其取值与散射中心的几何特征一一对应.

在观测视角范围较小的条件下,可以忽略目标上各散射中心散射矩阵随雷达观测视角的变化,即认为相干散射矩阵在雷达波束照射期间保持不变.如图 1 所示,则目标的回波为

$$x_{pq}(f, \theta, \phi) = \sum_{i=1}^I \left(j \frac{f}{f_0}\right)^{\alpha_i} s_{i,pq} \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi f}{c} (x_i \sin\theta \cos\phi + y_i \sin\theta \sin\phi + z_i \cos\theta)\right) + u_{pq} \quad (2)$$

其中, u_{pq} 表示测量噪声.令 $k = 2f/c$, $k_0 = 2f_0/c$, $k_x = k \sin\theta \cos\phi$, $k_y = k \sin\theta \sin\phi$, $k_z = k \cos\theta$, 则式(2)改写为

$$x_{pq}(k_x, k_y, k_z) = \sum_{i=1}^I \left(j \frac{k}{k_0}\right)^{\alpha_i} s_{i,pq} \cdot \exp(-j2\pi(k_x x_i + k_y y_i + k_z z_i)) + u_{pq} \quad (3)$$

对于频率步进体制测量雷达, $k = k_0 + n\Delta k$, $n = 0, 1, \dots, N-1$.假定雷达初始位置为 $(R_0, 0, 0)$,转台及雷达的运动方式如图 1 所示,角度步长分别为 $\Delta\phi$ 和 $\Delta\theta$ (设均远小于 1).则 k_x 、 k_y 和 k_z 可以简化为如下形式:

$$\begin{cases} k_x = (k_0 + n\Delta k) \cos m\Delta\phi \sin\left(\frac{\pi}{2} - l\Delta\theta\right) \approx (k_0 + n\Delta k) \\ k_y = (k_0 + n\Delta k) \sin m\Delta\phi \sin\left(\frac{\pi}{2} - l\Delta\theta\right) \approx (k_0 + n\Delta k) m\Delta\phi \\ k_z = -(k_0 + n\Delta k) \cos\left(\frac{\pi}{2} - l\Delta\theta\right) \approx -(k_0 + n\Delta k) l\Delta\theta \end{cases} \quad (4)$$

其中, $m = 1, 2, \dots, M$, $l = 1, 2, \dots, L$ 分别表示雷达在水平和竖直转轴上的观测视角数目,忽略二阶小量,式(3)可简化为

$$\begin{aligned} x_{pq}(n, m, l) &= \sum_{i=1}^I \left(j \frac{k}{k_0}\right)^{\alpha_i} s_{i,pq} \cdot \exp(-j2\pi(k_0 + n\Delta k) x_i) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi k_0 m\Delta\phi y_i) \cdot \exp(j2\pi k_0 l\Delta\theta z_i) + u_{pq} \\ &= \sum_{i=1}^I \sigma_{i,pq} (x'_i)^n (y'_i)^m (z'_i)^l \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} \sigma_{i,pq} = \left(j \frac{k}{k_0}\right)^{\alpha_i} s_{i,pq} \cdot (x'_i)^{\frac{k_0}{\Delta k}} \\ x'_i = \exp(j2\pi\Delta k x_i) \\ y'_i = \exp(j2\pi k_0 \Delta\phi y_i) \\ z'_i = \exp(j2\pi k_0 \Delta\theta z_i) \end{cases} \quad (6)$$

将式(5)写成矩阵形式为

$$\mathbf{z} = \mathbf{A} \mathbf{s} + \mathbf{u} \quad (7)$$

其中 \mathbf{z} 是 $MNL \times 4$ 的二维矩阵,对应全极化测量信息; \mathbf{A} 为 $MNL \times I$ 的二维矩阵,对应目标散射中心的位置和

(2) 删除矩阵 \underline{U}_s 、 \underline{U}_{s1} 和 \underline{U}_{s2} 的后 PR 行得到矩阵 \underline{U}_s 、 \underline{U}_{s1} 和 \underline{U}_{s2} 。

记 $\underline{F}_x = (\underline{U}_s)^+ \overline{\underline{U}}_s$, $\underline{F}_y = (\underline{U}_{s1})^+ \overline{\underline{U}}_{s1}$, $\underline{F}_z = (\underline{U}_{s2})^+ \overline{\underline{U}}_{s2}$, 上标“+”表示矩阵求伪逆。由文献[10]可知, 存在 $\hat{l} \times \hat{l}$ 阶的非奇异矩阵 \underline{T} , 使得

$$\begin{cases} \underline{X}_d = \underline{T}(\underline{U}_s)^+ \overline{\underline{U}}_s \underline{T}^{-1} = \underline{T} \underline{F}_x \underline{T}^{-1} \\ \underline{Y}_d = \underline{T}(\underline{U}_{s1})^+ \overline{\underline{U}}_{s1} \underline{T}^{-1} = \underline{T} \underline{F}_y \underline{T}^{-1} \\ \underline{Z}_d = \underline{T}(\underline{U}_{s2})^+ \overline{\underline{U}}_{s2} \underline{T}^{-1} = \underline{T} \underline{F}_z \underline{T}^{-1} \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\underline{X}_d = \text{diag}(x'_i)$, $\underline{Y}_d = \text{diag}(y'_i)$, $\underline{Z}_d = \text{diag}(z'_i)$, $\text{diag}(\cdot)$ 表示以括弧内向量元素为对角线元素的对角矩阵。因此, 一旦矩阵 \underline{T} 确定, 模型位置参数 $\{x'_i, y'_i, z'_i\}_{i=1}^{\hat{l}}$ 就可以由矩阵 \underline{X}_d 、 \underline{Y}_d 和 \underline{Z}_d 得到。但是, 当矩阵的特征值重数大于 1 时, 其对应的特征向量不唯一, 因此非奇异矩阵 \underline{T} 也不唯一。唯一(此处的唯一性不考虑因常系数导致的差别)的变换矩阵 \underline{T}_u 可以通过对矩阵组合 $\alpha \underline{F}_x + \beta \underline{F}_y + \gamma \underline{F}_z$ 的特征值分解求得^[10], 其中 α 、 β 和 γ 为标量, 并满足 $\alpha + \beta + \gamma = 1$, 其作用是保证矩阵 $\alpha \underline{F}_x + \beta \underline{F}_y + \gamma \underline{F}_z$ 的特征值重数不大于 1。将 \underline{T}_u 带入式(12)即可求得矩阵 \underline{X}_d 、 \underline{Y}_d 和 \underline{Z}_d , 从而得到位置参数估计如下:

$$\begin{cases} \hat{x}_i = \frac{1}{2\pi\Delta k_x} \arg\{ \underline{X}_d(i, i) \} \\ \hat{y}_i = \frac{1}{2\pi\Delta k_y} \arg\{ \underline{Y}_d(i, i) \}, i = 1, 2, \dots, \hat{l} \\ \hat{z}_i = \frac{1}{2\pi\Delta k_z} \arg\{ \underline{Z}_d(i, i) \} \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中 $\arg(\cdot)$ 代表求相位角。需要指出的是, 由于 \underline{T}_u 是矩阵 \underline{X}_d 、 \underline{Y}_d 和 \underline{Z}_d 共同的特征矩阵, 且是唯一的, 因此求解的 $\{(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i)\}$ 已实现配对, 即式(13)直接给出了散射中心的三维位置估计, 避免了对 $\{\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{\hat{l}}\}$ 、 $\{\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_{\hat{l}}\}$ 和 $\{\hat{z}_1, \hat{z}_2, \dots, \hat{z}_{\hat{l}}\}$ 进行关联和配对处理。

3.2 类型参数及相干散射矩阵的估计

对散射中心类型参数的估计可归结为对 CP-GTD 模型中 $\underline{\Gamma}(\alpha_i)$ 的估计。定义目标的极化 MUSIC 谱, 理论上讲, 通过高维搜索就可得出散射中心的位置和类型估计^[5], 但是高维搜索是一个复杂的过程, 运算量极大, 难以操作。在位置参数确定后, 目标的 MUSIC 谱可重新定义为

$$P_M(\alpha | (\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i)) = \frac{\underline{b}^H(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i) \underline{\Gamma}^H(\alpha) \underline{\Gamma}(\alpha) \underline{b}(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i)}{\underline{b}^H(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i) \underline{\Gamma}^H(\alpha) \underline{U}_N \underline{U}_N^H \underline{\Gamma}(\alpha) \underline{b}(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i)} \quad (14)$$

此时, 只需对类型参数进行搜索即可, 当类型估计与位置 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 的散射中心一致时, 信号模式矢量在噪声空间上投影的倒数最大, 通过峰值搜索即可确定散射中心的类型参数估计值 $\hat{\alpha}_{0,i}$ 。由于散射中心的类型参数 α_i 取值范围有限, 一般满足 $\alpha_i \in \{-1, -0.5, 0, 0.5,$

$1\}$, 可对搜索结果按最近邻准则进行离散化赋值得到标准的类型参数估计。令

$$d_k(\alpha_i) = \left| \frac{k}{2} - \alpha_{0,i} \right|, k \in \{-2, -1, 0, 1, 2\} \quad (15)$$

若 $d_m(\alpha_i) = \min_{k=0, \pm 1, \pm 2} \{d_k(\alpha_i)\}$, 则类型估计值 $\hat{\alpha}_i = m/2$ 。

求得散射中心的位置和类型参数后, 根据估计结果可以得到式(7)的阵列流型 $\hat{\underline{A}}$, 进而求得各散射中心极化散射矩阵的最小二乘解为

$$\hat{\underline{s}} = [\hat{s}_{\text{HH}} \quad \hat{s}_{\text{HV}} \quad \hat{s}_{\text{VH}} \quad \hat{s}_{\text{VV}}] = \text{pinv}(\hat{\underline{A}}) \cdot \underline{z} \quad (16)$$

通常需对 \hat{s}_i 进行归一化处理, 即

$$\hat{s}_i = \frac{\hat{s}_i}{\text{span}(\hat{s}_i)} \exp(-j \arg(\hat{s}_{i, \text{HH}})) \quad (17)$$

其中, $\text{span}(\hat{s}_i) = \sqrt{|\hat{s}_{i, \text{HH}}|^2 + |\hat{s}_{i, \text{HV}}|^2 + |\hat{s}_{i, \text{VH}}|^2 + |\hat{s}_{i, \text{VV}}|^2}$ 表示散射强度。归一化相干极化矩阵的首项元素为实数, 利于各散射中心属性的判断。

4 仿真实验及性能分析

根据图 1 所示的测量模型设定一个包含 5 个散射中心的椎体目标, 具体参数如表 1 所示, 其中, $j = \sqrt{-1}$, 目标满足互易性, 即 $s_{i, \text{HV}} = s_{i, \text{VH}}$, 且各散射中心散射矩阵满足 $\text{span}(\hat{s}_i) = 1$ 。仿真雷达载频为 9GHz, 频率步进量为 20MHz, 频率点数 $N = 16$; 测量期间转台相对雷达转角为 5° , 共计观测 $M = 16$ 次; 雷达在弧形导轨上的转角为 5° , 共计观测 $L = 16$ 次。依据三维 CP-GTD 模型生成目标回波, 仿真过程中, $P = Q = R = 8$ 。假设噪声为高斯白噪声, 定义信噪比为目标回波信号功率与噪声功率之比。

表 1 散射中心参数

序号	位置(x, y, z)	span(\hat{s}_i)	类型 α	s_{HH}	s_{HV}	s_{VV}
1	(0.5, -0.5, 0.5)	1	1	0.25	0.433	0.75
2	(-0.5, 0.5, 0.5)	1	0.5	0.5	$-0.5 * j$	0.5
3	(-0.5, -0.5, 0.5)	1	0	0.75	0.433	$0.25 * j$
4	(0.5, 0.5, 0.5)	1	-0.5	0.707	0	-0.707
5	(0, 0, 1.5)	1	-1	0.60	0.374	0.60

为评估本文所提方法在散射中心参数估计中的性能, 选取单极化状态下 GTD 模型的估计方法作为对照。图 2 是当信噪比为 5dB 时, Monte-Carlo 仿真 100 次时的散射中心位置估计结果(超分辨率成像), 图中“ \circ ”表示散射中心的真实位置, 实心圆点表示单次估计结果, 数字表示散射中心编号。其中, 图 2(a)、(b)、(c)分别是利用 HH、HV、VV 单极化通道下 GTD 模型的估计结果, 图 2(d)是基于 CP-GTD 模型的估计结果。由于 4 号散射中心在 HV 极化状态下的散射幅度为 0, 图 2(b)只能估计出 4 个散射中心。对比可知, 基于 CP-GTD 模型的位置估计结果优于单极化 GTD 模型的估计结果。

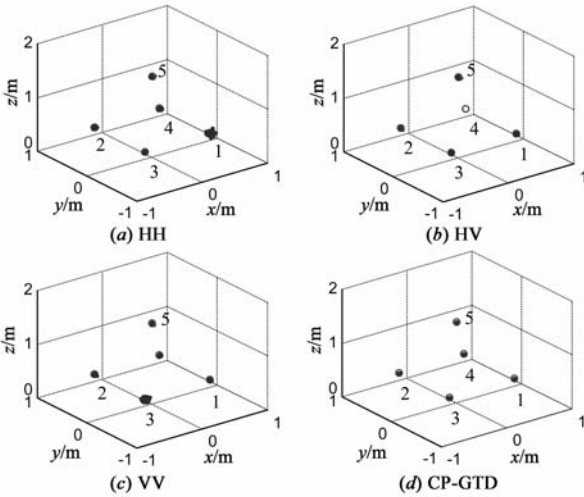


图2 散射中心位置参数估计结果(仿真100次, SNR=5dB)

本文要估计的参数包括散射中心数目、位置、散射强度、类型和相干散射矩阵. 由于散射中心数目估计稳定性较高, 本文选取散射中心位置、散射强度及类型参数估计的均方作为算法估计精度的评估指标. 位置误差定义为 $Mse(r) = \sqrt{E[(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2 + (z - \hat{z})^2]}$, 其中 (x, y, z) 为位置真值, $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 为位置估计值, $E[\cdot]$ 为求集合平均, 其余参数评估指标定义类似, 即 $Mse(\rho) = \sqrt{E[(\hat{\rho} - \rho)^2]}$, ρ 表示相应的估计参数. 鉴于篇幅有限, 本文仅以第 1 和第 5 个散射中心的估计结果为例进行分析说明, 其他估计结果类似. 图 3 和图 4 分别对比了两种方法对散射中心位置、散射强度以及类型参数的估计误差. 两种方法均能较准确估计散射中心的位置和散射强度, 估计误差都不超过 10%, 相对而言, 基于 CP-GTD 模型的参数估计结果都要优于基于单极化 GTD 模型的估计结果. 图 5 对比了两种方法对散射中心类型参数估计的成功率, 类型参数估计成功定义为五个散射中心的类型参数全部估计正确. 从图 5 可知, 当信噪比大于 20dB 时, 基于 CP-GTD 模型对散射中心类型的估计成功率可达到 80% 以上, 性能要明显好于单极 GTD 模型. 综上可知, 基于 CP-GTD 模型对散射中心的位置、散射强度和类型参数的估计性能都要优于单极化 GTD 模型的方法, 这是因为 CP-GTD 模型包含有雷达目标在任意收发极化状态下的完整信息, 信息

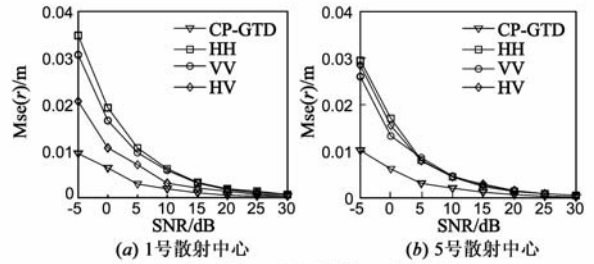


图3 散射中心位置估计误差对比

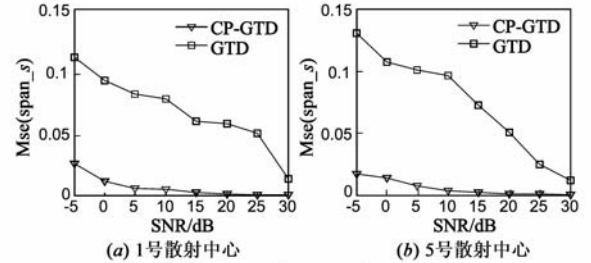


图4 散射中心强度(span)估计误差对比

处理获得了更精确的估计结果.

基于 CP-GTD 模型的三维散射中心估计的另一个优势是能够直接估计出散射中心的相干极化散射矩阵. 在互易性条件下, 可用 ϕ_{HV-HH} 和 ϕ_{VV-HH} 两个相对相位来描述相干散射矩阵的相干相位, 其中, ϕ_{HV-HH} 为散射矩阵元素 s_{HV} 和 s_{HH} 的相位差, $\phi_{HV-HH} = \arg(s_{HV} s_{HH}^*)$, ϕ_{VV-HH} 的定义类似. 图 6 和图 7 分别给出了散射中心相干散射矩阵中各元素的幅度和相干相位估计均方误差, 图中数字为散射中心编号. 图 6 中, 各元素的估计误差随信噪比的增大而减小, 但即使在信噪比为 -5dB 时, 估计误差也很小; 图 7 中, 只有 4 号散射中心的 ϕ_{HV-HH} 的误差较大, 这是因为 4 号散射中心在 HV 极化状态下的散射幅度为 0, 相对其他散射中心太弱, 导致相位估计误差较大, 当信噪比大于 0dB 时, 其他散射中心的相干相位估计误差都在 4° 以内. 可见, 本文方法能够较准确的估计出极化散射中心的相干散射矩阵.

5 小结

极化与高分辨结合是雷达目标识别最具应用前景的研究方向之一. 针对全极化 ISAR 成像雷达体制, 本文建立了能够精确描述雷达目标高频电磁极化散射的

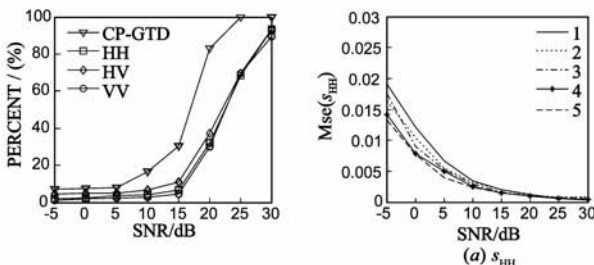


图5 散射中心类型(α)估计成功概率

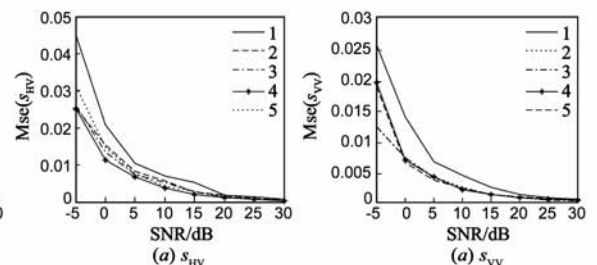


图6 基于CP-GTD模型的相干散射矩阵元素估计误差

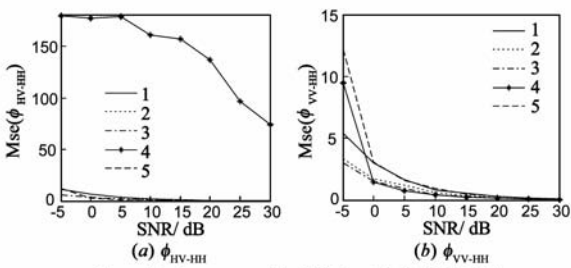


图7 基于CP-GTD模型的相干相位估计误差

三维 CP-GTD 模型,根据转台-弧形导轨观测方法,提出了一种基于 CP-GTD 模型的三维散射中心参数估计方法,该方法利用三维全极化观测数据,能够有效估计出散射中心的位置、散射强度、类型以及相干极化散射矩阵等特征参数.与基于单极化观测模型参数估计方法相比,本文方法更充分地利用了全极化观测数据,不仅在位置、散射强度以及类型等参数估计方面具有更好的性能,而且能够直接估计出目标散射中心的相干散射矩阵,不需进行额外的散射中心关联和配对处理,具有较强的抗噪能力.值得指出的是,本文虽然只分析了步进频信号情形,实际上线性调频信号经过匹配滤波或 STRETCH 处理之后也可得到类似结果.

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,2005.229-242.
- [2] W M Steady, R L Morses. High resolution exponential modeling of fully polarized radar returns[J]. IEEE Trans on AES, 1991, 27(3):459-468.
- [3] L C Potter, D M Chiang, R Carriere, M J Gerry. A GTD-based parametric model for radar scattering[J]. IEEE Trans on AP, 1995, 43(10):1058-1067.
- [4] 刘涛,黄高明,王雪松,等.基于约束总体最小二乘算法的全极化散射中心参数估计[J].电子学报,2009,37(9):1913-1918.
Liu Tao, Huang Gao-ming, Wang Xue-song, et al. Parametric estimation of full polarization scattering centers based on CTLS[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9):1913-1918. (in Chinese)
- [5] 代大海,王雪松,肖顺平.基于二维 CP-GTD 模型的全极化 ISAR 超分辨率成像[J].自然科学进展,2007,17(10):1439-1448.
Dai Da-hai, Wang Xue-song, Xiao Shun-ping. A super-resolution imaging method of fully polarized ISAR based on 2D CP-GTD model[J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(10):1439-1448. (in Chinese)

- [6] K T Kim, H T Kim. Two-dimensional scattering center extraction based on multiple elastic modules network[J]. IEEE Trans on AP, 2003, 51(4):848-860.
- [7] 任双桥,刘永祥,等.基于多姿态角下一维距离像的雷达目标三维成像[J].电子学报,2005,33(6):1089-1091.
REN Shuang-qiao, LIU Yong-xiang, et al. Radar target 3-D imaging based on multi-aspect range profiles[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6):1089-1091. (in Chinese)
- [8] S Fazio, L Hong. A new methodology for recognition and reconstruction of moving rigid-body targets[J]. SPIE, 2006, 6234:1-9.
- [9] L Michael, L Bryant, L Gostin, et al. 3-D E-CSAR imaging of a T-72 tank and synthesis of its SAR reconstructions[J]. IEEE Trans on AES, 2003, 39(1):211-227.
- [10] 孙厚军,李世勇,等.基于一种超分辨率算法的三维散射中心提取方法[J].电子学报,2008,36(3):467-472.
SUN Hou-jun, LI Shi-yong, et al. A method to extract three dimensional scattering centers based on a super-resolution algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(3):467-472. (in Chinese)
- [11] K T Kim, S W Kim, H T Kim. Two-dimensional ISAR imaging using full polarisation and super-resolution processing techniques[J]. IEE Proc-Radar, Sonar Navig, 1998, 145(4):240-246.
- [12] H T Wu, J F Yang, F K Chen. Source number estimation using transformed gerchgorin radii[J]. IEEE Trans on SP, 1995, 43(6):1325-1333.

作者简介



徐少坤 男,1983年2月出生,湖北广水人,2005年和2007年分别获得国防科技大学工学学士和工学硕士学位,现为国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生.从事雷达目标特性、雷达信号处理、宽带雷达对抗等技术方面的有关研究.

E-mail: xsk0220@163.com

刘记红 女,1983年10月出生,河南商水人,国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生.从事雷达信号处理、压缩感知理论、雷达成像等相关研究工作. E-mail: ljh632@163.com

魏玺章 男,1976年4生,河北沧州人,国防科技大学副教授,硕士生导师,从事目标特性,雷达目标识别、空间电子对抗等研究工作.

黎湘 男,1967年9月生,湖南浏阳人,国防科技大学教授,博士生导师,中国电子学会高级会员.从事空间信息处理、自动目标识别及智能信号处理等研究工作.